

PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA  
AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA EN ESPACIOS  
INTERIORES DESDE UN ENFOQUE DE MÍNIMO COSTO FINANCIERO

LAURA YAZMIN AMADO DUARTE



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2018

PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA  
AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA EN ESPACIOS  
INTERIORES DESDE UN ENFOQUE DE MÍNIMO COSTO FINANCIERO

LAURA YAZMIN AMADO DUARTE

Trabajo de investigación para optar el título de Magister en Ingeniería Electrónica

Director

Rodolfo Villamizar Mejía

Doctor en Tecnologías de la Información

Codirectores

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Gabriel Ordóñez Plata

Doctor Ingeniero Industrial en Ingeniería Eléctrica

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

2018

# DEDICATORIA

---

A mi esposo German Osma

A mi mamá, Lucila Duarte

A mis hermanos, Diana y Omar

A mis sobrinos, Karoll y Matias

# AGRADECIMIENTOS

---

A Dios por su bendición.

A mi esposo por su apoyo, paciencia y comprensión incondicionales.

A mi familia por su compañía.

A mi amigo Jorge Cárdenas por su compañía y apoyo

A los doctores Rodolfo Villamizar Mejía, Gabriel Ordóñez Plata y German Alfonso Osma Pinto por su orientación como Director y Codirectores.

A la Universidad Industrial de Santander por su contribución a mi formación personal y profesional y a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - E3T.

# CONTENIDO

---

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>19</b>
MARCO TEORICO.....	21
ESTADO DEL ARTE.....	34
ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	41
TRABAJOS ACADÉMICOS Y PROYECTOS PROMOVIDOS.....	42
<b>I. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>44</b>
1.1. DECLARACIÓN DEL PROBLEMA.....	44
1.2. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	49
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	50
<b>2. PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA E CONTROL DE UN SIH</b> .....	<b>53</b>
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ESPACIO (FÍSICA Y LUMÍNICA NATURAL).....	54
2.2. CARACTERIZACIÓN LUMÍNICA Y DE OPERACIÓN DE LAS LUMINARIAS DEL SIH.....	55
2.3. DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE CONTROL (CANTIDAD Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS) A SER ANALIZADAS .....	56
2.4. MODELADO DE LA ILUMINACIÓN TOTAL INTERIOR Y CONSUMO DE ENERGÍA PARA CADA ALTERNATIVA DE CONTROL .....	57
2.5. CUANTIFICACIÓN DE LAS CANTIDADES MÍNIMAS DE LOS COMPONENTES REQUERIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CADA ALTERNATIVA DE CONTROL.....	60
2.6. DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN DE COSTO FINANCIERO TOTAL POR ALTERNATIVA .....	60
2.7. ESTIMACIÓN DEL COSTO FINANCIERO TOTAL DE CADA ALTERNATIVA DE CONTROL Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL.....	62
2.8. CONSTRUCCIÓN DEL INFORME DE DISEÑO DEL SIH SELECCIONADO.....	62
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN</b> .....	<b>63</b>
3.1. CASOS DE ESTUDIO .....	67
3.2. MÉTODO DE MEDICIÓN UTILIZADO .....	72

3.3. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA ILUMINACIÓN NATURAL INTERIOR Y EXTERIOR .....	82
3.4. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA ILUMINANCIA ARTIFICIAL .....	86
3.5. CURVAS DE POTENCIA DE LA LUMINARIA DIMERIZABLE .....	95
<b>4. MODELADO DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO Y DE CONSUMO DE ENERGÍA .....</b>	<b>97</b>
4.1. FUNDAMENTACIÓN DEL MODELADO .....	98
4.2. CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE LOS CASOS DE ESTUDIO PARA SU MODELADO ..	99
4.3. MODELADO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO .....	101
4.4. MODELADO DEL CONSUMO DE ENERGÍA .....	117
4.5. RESUMEN DE HALLAZGOS DEL MODELADO .....	122
<b>5. MODELADO DE LOS SIH ALTERNATIVOS .....</b>	<b>123</b>
5.1. CONFIGURACIONES DE LUMINARIAS Y ALTERNATIVAS DE CONTROL .....	124
5.2. MODELADO DE LA ILUMINANCIA INTERIOR Y CONSUMO DE POTENCIA PARA CADA ALTERNATIVA DE CONTROL .....	132
5.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SIH .....	153
5.4. ESTIMACIÓN DEL COSTO FINANCIERO TOTAL DE CADA ALTERNATIVA .....	162
5.5. ESTRUCTURA DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE MENOR COSTO FINANCIERO .....	170
<b>6. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO .....</b>	<b>177</b>
6.1. RESULTADOS DEL CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL Y COSTO FINANCIERO TOTAL	177
6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL SELECCIONADA (REPORTE TÉCNICO) .....	182
<b>7. CONCLUSIONES, RESULTADOS, TRABAJO FUTURO Y OBSERVACIONES .....</b>	<b>190</b>
7.1. CONCLUSIONES .....	190
7.2. RESULTADOS .....	192
7.3. TRABAJO FUTURO .....	193
7.4. OBSERVACIONES .....	194
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>195</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>206</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>218</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

TABLA 1. CONCEPTOS DE ILUMINACIÓN. ....	22
TABLA 2. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA ILUMINACIÓN NATURAL. ....	24
TABLA 3. TIPOS DE LÁMPARAS Y SUS CARACTERÍSTICAS TÍPICAS. ....	27
TABLA 4. TIPOS DE SIH SEGÚN EL CONTROL EJERCIDO SOBRE LA ILUMINACIÓN NATURAL.....	29
TABLA 5. CASOS DE MODELADO DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO Y ENERGÉTICO DE SIH. ....	39
TABLA 6. PUBLICACIONES REALIZADAS.....	42
TABLA 7. SOLUCIONES ESTÁNDAR PARA EL CONTROL DE ILUMINACIÓN.....	48
TABLA 8. CUADRO DE CONVENCIONES DE LA FIGURA 6. ....	65
TABLA 9. FICHA DESCRIPTIVA CASO DE ESTUDIO – AULA IE 305.....	69
TABLA 10. FICHA DESCRIPTIVA CASO DE ESTUDIO – SALA DE REUNIONES.....	70
TABLA 11. CÁLCULOS PARA HALLAR EL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN MALLADO A PARTIR DE LA ALTERNATIVA NO.1 PARA LOS DOS CASOS DE ESTUDIO. ....	74
TABLA 12. CÁLCULOS PARA HALLAR EL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN Y CELDAS DEL MALLADO A PARTIR DE LA ALTERNATIVA NO.2 PARA LOS DOS CASOS DE ESTUDIO ....	76
TABLA 13. VALORES DE ILUMINANCIA ARTIFICIAL CARACTERÍSTICA DEL AULA IE 305 PARA UN SOLO GRUPO DE CONTROL.....	88
TABLA 14. VALORES DE ILUMINANCIA ARTIFICIAL CARACTERÍSTICA DE LA SALA DE REUNIONES PARA DIFERENTES NIVELES DE DIMERIZACIÓN Y UN SOLO GC.....	88
TABLA 15. VALORES DE ILUMINANCIA ARTIFICIAL PARA UN GC=UNA LUMINARIA_SALA DE REUNIONES .....	91
TABLA 16. VALORES DE ILUMINANCIA ARTIFICIAL PARA UN GC=DOS LUMINARIAS_SALA DE REUNIONES.....	91
TABLA 17. ILUMINANCIA ARTIFICIAL PARA DIFERENTES VALORES DE $\beta$ PARA LA LUMINARIA DE LA SALA DE REUNIONES.....	95
TABLA 18. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....	97
TABLA 19. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DE LA SUPERFICIE DE TRABAJO. ....	100
TABLA 20. MEDIDAS DE ERROR DE LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR EN EL AULA IE 305 .....	114

TABLA 21. MEDIDAS DE ERROR DE LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR EN LA SALA DE REUNIONES.....	115
TABLA 22. VECTORES $v_i$ PARA $NK$ LUMINARIAS.....	126
TABLA 23. CÁLCULO DEL NÚMERO DE CONFIGURACIONES Y ALTERNATIVAS DE CONTROL PARA UN CASO RECINTO CON 4 LUMINARIAS.....	129
TABLA 24. VALORES DE $SNK$ , $Ngc$ , $Ncp$ Y $NSIH$ PARA $NK$ LUMINARIAS. TOMADO DE [90], [91].....	129
TABLA 25. EJEMPLOS DE CONFIGURACIONES Y ALTERNATIVAS DE CONTROL PARA UN RECINTO CON 4 LUMINARIAS.....	130
TABLA 26. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DE LA SUPERFICIE DE TRABAJO.....	133
TABLA 27. FORMULACIÓN Y CANTIDAD DE RESTRICCIÓN DEL ESTADO DE OPERACIÓN Y FLUJO LUMINOSO.....	148
TABLA 28. FORMULACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DEL ESTADO DE OPERACIÓN Y PORCENTAJE DE FLUJO LUMINOSO PARA SU USO EN GAMS.....	152
TABLA 29. CANTIDAD DE COMPONENTES REQUERIDOS CONSIDERANDO UN AHORRO.....	157
TABLA 30. CUANTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES REQUERIDOS POR UNA ALTERNATIVA DE CONTROL DETERMINADA.....	158
TABLA 31. CÁLCULO DE LAS CANTIDADES DE LOS COMPONENTES.....	160
TABLA 32. COSTOS DE ADQUISICIÓN, INSTALACIÓN Y ADECUACIÓN ELÉCTRICA DE LOS COMPONENTES ADICIONALES.....	164
TABLA 33. COSTOS DE INSTALACIÓN Y ADECUACIÓN ELÉCTRICA DE LOS COMPONENTES REUSADOS.....	166
TABLA 34. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS Y SUB-ETAPAS DE CÁLCULO DE LA ALTERNATIVA DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL.....	174
TABLA 35. CONJUNTO DE RESULTADOS SELECCIONADOS OBTENIDOS EN LA BÚSQUEDA DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL (VPN) PARA LA SALA DE REUNIONES, A PARTIR DE UN $e_{min} = 300 \text{ lux}$ .....	179
TABLA 36. CONJUNTO DE RESULTADOS SELECCIONADOS OBTENIDOS EN LA BÚSQUEDA DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL (VPN) PARA LA SALA DE REUNIONES, A PARTIR DE UN $e_{min} = 400 \text{ lux}$ .....	179
TABLA 37. CONJUNTO DE RESULTADOS SELECCIONADOS OBTENIDOS EN LA BÚSQUEDA DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL (VPN) PARA LA SALA DE REUNIONES, A PARTIR DE UN $e_{min} = 500 \text{ lux}$ .....	180
TABLA 38. CONJUNTO DE RESULTADOS SELECCIONADOS OBTENIDOS EN LA BÚSQUEDA DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL (VPN) PARA LA SALA DE REUNIONES, A PARTIR DE UN $e_{min} = 600 \text{ lux}$ .....	180
TABLA 39. CANTIDADES DE CADA TIPO DE COMPONENTES DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL No. 3 DE LA SALA DE REUNIONES.....	181

TABLA 40. CONJUNTO DE RESULTADOS SELECCIONADOS OBTENIDOS EN LA BÚSQUEDA DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL (VPN) PARA EL AULA IE305, A PARTIR DE UN $e_{min} = 300 \text{ lux}$ .	181
TABLA 41. CANTIDADES DE CADA TIPO DE COMPONENTES DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL No. 1079 DEL AULA IE305.	182
TABLA 42. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL SELECCIONADA PARA LA SALA DE REUNIONES.	184
TABLA 43. ESCENARIOS DE IRRADIACIÓN SOLAR Y OCUPACIÓN.	186
TABLA 44. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL SELECCIONADA PARA EL AULA IE305.	187

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

FIGURA 1. TECNOLOGÍAS PARA ILUMINACIÓN NATURAL SEGÚN EL TIPO DE FUENTE Y TRATAMIENTO DE LA LUZ. ....	24
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE ILUMINACIÓN DE LAZO CERRADO DE UN SIH .....	31
FIGURA 3. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ILUMINACIÓN – ESCENARIO: NIVEL DE RADIACIÓN SOLAR ALTO.....	46
FIGURA 4. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ILUMINACIÓN – ESCENARIO: NIVEL DE RADIACIÓN SOLAR BAJO.....	47
FIGURA 5. ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE UN SIH. ....	54
FIGURA 6. ESQUEMA DESCRIPTIVO GENERAL DEL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN LUMÍNICA DE LOS ESPACIOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MODELOS EXPERIMENTALES Y GENERALIZADOS DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO.....	65
FIGURA 7. DIAGRAMA RESUMEN DE LA FIGURA 6. ....	65
FIGURA 8. EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.....	67
FIGURA 9. AULA IE – 305.....	69
FIGURA 10. ESQUEMA DEL SIH DEL AULA IE – 305. ....	69
FIGURA 11. SALA DE REUNIONES.....	70
FIGURA 12. ESQUEMA DEL SIH DE LA SALA DE REUNIONES. ....	70
FIGURA 13. OBTENCIÓN DEL MALLADO DE MEDICIÓN A PARTIR DE LA ALTERNATIVA NO. 1 - SALA DE REUNIONES. ....	74
FIGURA 14. OBTENCIÓN DEL MALLADO DE MEDICIÓN A PARTIR DE LA ALTERNATIVA NO. 2 - SALA DE REUNIONES .....	76
FIGURA 15. MALLADA DE MEDICIÓN DE (3X6) DEL AULA IE – 305 – ALTERNATIVA DE MEDICIÓN NO.1.....	78
FIGURA 16. MALLADA DE MEDICIÓN DE (3X3) DE LA SALA DE JUNTAS– ALTERNATIVA DE MEDICIÓN NO.1 .....	78

FIGURA 17. MALLADA DE MEDICIÓN DE (4X7) DEL AULA IE – 305 – ALTERNATIVA DE MEDICIÓN NO.2.....	79
FIGURA 18. MALLADA DE MEDICIÓN DE (3X6) DE LA SALA DE JUNTAS– ALTERNATIVA DE MEDICIÓN NO.2.....	79
FIGURA 19. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA.....	80
FIGURA 20. CURVA DE AJUSTE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA NATURAL PARA EL LUXÓMETRO 1. ....	81
FIGURA 21. CURVA DE AJUSTE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA NATURAL PARA EL LUXÓMETRO 3. ....	81
FIGURA 22. CURVA DE AJUSTE MEDICIÓN ILUMINANCIA ARTIFICIAL PARA EL LUXÓMETRO 4. ....	82
FIGURA 23. ESCENARIO DE EXPERIMENTACIÓN – AULA IE-305. ....	84
FIGURA 24. ESTRATEGIA PARA LA TOMA DE MEDICIONES AULA IE 305.....	84
FIGURA 25. ESTRATEGIA PARA LA TOMA DE MEDICIONES SALA DE REUNIONES.....	84
FIGURA 26. VARIACIÓN DE LA ILUMINANCIA NATURAL VENTANA SURORIENTE – AULA IE-305.....	85
FIGURA 27. VARIACIÓN DE LA ILUMINANCIA NATURAL VENTANA SUROCCIDENTE – AULA IE-305. ....	85
FIGURA 28. VARIACIÓN DE LA ILUMINANCIA NATURAL – SALA DE REUNIONES. ....	86
FIGURA 29. ESCENARIO DE MEDICIÓN ILUMINACIÓN ARTIFICIAL PARA UN GC= TODAS LAS LUMINARIAS - AULA IE 305. ....	87
FIGURA 30. CONFIGURACIÓN GC=UNA LUMINARIA_AULA IE 305.....	90
FIGURA 31. DISTRIBUCIÓN DE ILUMINANCIA ARTIFICIAL PARA UN GC=UNA LUMINARIA_AULA IE 305.....	90
FIGURA 32. CONFIGURACIÓN GC=TRES LUMINARIAS_AULA IE 305.....	90
FIGURA 33. DISTRIBUCIÓN ILUMINANCIA ARTIFICIAL PARA UN GC=TRES LUMINARIAS_AULA IE 305.....	90
FIGURA 34. CONFIGURACIÓN GC= UNA LUMINARIA SALA REUNIONES.....	91
FIGURA 35. CONFIGURACIÓN GC=DOS LUMINARIAS SALA REUNIONES.....	91
FIGURA 36. CURVAS DE ILUMINANCIA DE LA LUMINARIA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA $rpk$ .....	93
FIGURA 37. BOSQUEJO DEL PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA LUMINARIA (LK). ....	93
FIGURA 38. CURVAS DE ILUMINANCIA LUMINARIA AULA IE 305. ....	93
FIGURA 39. CURVAS DE ILUMINANCIA LUMINARIA SALA DE REUNIONES PARA $\beta = 10$ .....	94
FIGURA 40. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UNA LUMINARIA DIMERIZABLE. ....	96

FIGURA 41. DF VS DISTANCIA - AULA IE 305, RESPECTO A LA.....	99
FIGURA 42. DF VS DISTANCIA - AULA IE 305, RESPECTO A LA RADIACIÓN EN TERRAZA...	99
FIGURA 43. DF HORARIO– SALA DE REUNIONES, RESPECTO A LA RADIACIÓN EN LA FACHADA SUR.*DV: DISTANCIA DESDE LA VENTANA.....	103
FIGURA 44. DF PROMEDIO – SALA DE REUNIONES, RESPECTO A LA RADIACIÓN EN FACHADA SUR. ....	103
FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN DE $DF_{promSRn} \times m$ - SALA DE REUNIONES. ....	104
FIGURA 46. DISTRIBUCIÓN DEL $DF_{prom305\_senxm}$ DEL AULA IE 305 – VENTANA SURESTE. ....	104
FIGURA 47. DISTRIBUCIÓN DEL $DF_{prom305\_son} \times m$ DEL AULA IE 305 – VENTANA SUROESTE. ....	105
FIGURA 48. DISTRIBUCIÓN DE LA ILUMINANCIA NATURAL INTERIOR $EDestn \times mt$ EN EL AULA IE 305 PARA UN VALOR DE ILUMINANCIA EXTERIOR DETERMINADO. ....	106
FIGURA 49. DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR LOS VALORES DE $EA_{ac305n} \times mt$ (LUX) DEL AULA IE 305.....	108
FIGURA 50. DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR LOS VALORES DE $EA_{areqn} \times mt$ (LUX) DE LA SALA DE REUNIONES.....	110
FIGURA 51. ILUMINANCIA ARTIFICIAL DIMERIZADA SOBRE LA SUPERFICIE DE TRABAJO EN PORCENTAJE VS TENSIÓN DE CONTROL DE DIMERIZACIÓN DE LA SALA DE REUNIONES [38]. ....	111
FIGURA 52. DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR LOS VALORES DE $EA_{acSRn} \times mt$ (LUX) DE LA SALA DE REUNIONES.....	112
FIGURA 53. COMPARACIÓN ENTRE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR ESTIMADA Y LA MEDIDA DEL AULA IE 305 A LAS.....	114
FIGURA 54. COMPARACIÓN ENTRE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR ESTIMADA Y LA MEDIDA DEL AULA IE 305 A LAS.....	115
FIGURA 55. ERROR RELATIVO (%) DE LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR PARA EL AULA IE305. ....	115
FIGURA 56. COMPARACIÓN ENTRE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR ESTIMADA Y LA MEDIDA DE LA SALA DE REUNIONES A LAS.....	116
FIGURA 57. COMPARACIÓN ENTRE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR ESTIMADA Y LA MEDIDA DE LA SALA DE REUNIONES A LAS.....	116
FIGURA 58. ERROR RELATIVO (%) DE LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA TOTAL INTERIOR PARA LA SALA DE REUNIONES.....	116
FIGURA 59. CURVA DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR UNA LUMINARIA DIMERIZABLE. ....	119
FIGURA 60. POSIBLES CONFIGURACIONES PARA $NK = 4$ . ....	126

FIGURA 61. EJEMPLO DE CONFIGURACIONES IGUALES DE LUMINARIAS. ....	127
FIGURA 62. EJEMPLO DE CONFIGURACIÓN DE ALTERNATIVA DE CONTROL DEL SIH DEL AULA IE-305. ....	128
FIGURA 63. EJEMPLO GRÁFICO DE CONFIGURACIONES DE LUMINARIAS PARA $N_{gc} = 2$ Y $NK=4$ QUE SON IGUALES.....	131
FIGURA 64. DISTRIBUCIÓN DEL $DF_{prom\_wsen} \times m$ DEL AULA IE 305 – VENTANA SURESTE Y MALLADO DE 28 PUNTOS.....	136
FIGURA 65. DISTRIBUCIÓN DEL $DF_{prom\_wson} \times m$ DEL AULA IE 305 – VENTANA SUROESTE Y MALLADO DE 28 PUNTOS. ....	136
FIGURA 66. DISTRIBUCIÓN DE $DF_{prom\_SRn} \times m$ - SALA DE REUNIONES. ....	137
FIGURA 67. EJEMPLO MATRIZ DE PERTENENCIA DE LAS LUMINARIAS A UN GRUPO DE CONTROL ESPECIFICO DEL RECINTO $ZN_{gc} \times NK$ . ....	139
FIGURA 68. ILUSTRACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE ILUMINANCIA DE LA LUMINARIA $k$ EN EL PUNTO $pN$ DEL MALLADO, $(apk, p)$ .....	140
FIGURA 69. CURVAS DE CARACTERIZACIÓN DE LA LUMINARIA DIMERIZABLE.....	146
FIGURA 70. ESQUEMAS DE COMPONENTES PARA UNA CONFIGURACIÓN DE UN GRUPO DE CONTROL (GC1: L1, L2, L3 Y L4). ....	154
FIGURA 71. ESQUEMAS DE COMPONENTES PARA UNA CONFIGURACIÓN DE DOS GRUPOS DE CONTROL (GC1: L1, L2 Y L3 Y GC2:L4). ....	156
FIGURA 72. ESQUEMA DE LOS FLUJOS DE CAJA DEL PROYECTO (MODIFICACIÓN DEL SIH DE UN RECINTO) PARA UN HORIZONTE DE TIEMPO DE 20 AÑOS.....	169
FIGURA 73. DIAGRAMA DE ETAPAS DE CÁLCULO DE LA ALTERNATIVA DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL. ....	173
FIGURA 74. CONSUMO ENERGÉTICO DIARIO POR ESCENARIO Y NIVEL DE ILUMINANCIA MÍNIMO. ....	185
FIGURA 75. CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL Y COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL #3 SEGÚN EL NIVEL MÍNIMO DE ILUMINANCIA.....	186
FIGURA 76. COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DIARIO ENTRE LAS ALTERNATIVAS #1079 (SELECCIONADA) Y #1 (ACTUAL). ....	188

# ÍNDICE DE ANEXOS

---

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR INCIDENTE PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA NATURAL EXTERIOR SOBRE VENTANAS .....	219
ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE OCUPACIÓN E IRRADIACIÓN SOLAR.	223
ANEXO C. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN PARA EL SIH EXISTENTE EN LA SALA DE REUNIONES .....	228
ANEXO D. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN PARA UNA ALTERNATIVA POTENCIAL DE CONTROL DEL SIH EN LA SALA DE REUNIONES.....	236
ANEXO E. DESCRIPCIÓN DEL USO DE MATLAB Y GAMS.....	242
ANEXO F. APLICACIÓN DE LA CUANTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL SIH.....	248

# RESUMEN

---

TÍTULO: PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA EN ESPACIOS INTERIORES DESDE UN ENFOQUE DE MÍNIMO COSTO FINANCIERO <sup>1</sup>

AUTOR: LAURA YAZMIN AMADO DUARTE<sup>2</sup>

PALABRAS CLAVE: Iluminación híbrida, experimentación, modelado, alternativa de control, automatización.

DESCRIPCIÓN: Este trabajo de investigación define un procedimiento para el dimensionamiento de la alternativa de control de la iluminación eléctrica de sistemas de iluminación híbrida, para espacios seleccionados con características similares a los existentes en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, considerando el menor costo financiero total.

Este procedimiento consta de ocho (8) pasos secuenciales: (i) Caracterización del espacio (física y lumínica natural), (ii) Caracterización lumínica y de operación de las luminarias del SIH, (iii) Definición de las alternativas de control (cantidad y características técnicas) de potencial aplicación, (iv) Modelado de la iluminación total interior y consumo de energía para cada alternativa de control, (v) Cuantificación de las cantidades mínimas de los componentes requeridos para la implementación de cada alternativa de control, (vi) Definición de la función de costo financiero total por alternativa, (vii) Estimación del costo financiero total de cada alternativa de control y selección de la alternativa de menor costo financiero total y (viii) Construcción del informe de dimensionamiento de la alternativa de control del SIH seleccionada.

El procedimiento se aplicó a dos espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica, aula IE305 y Sala de reuniones (piso 5) con iluminación fluorescente, lo que permitió establecer la alternativa de control de menor costo financiero para cada recinto. Tal proceso se basó en el modelado experimental de los sistemas de iluminación de los dos recintos interiores. En total, se consideraron 756 y 5428 alternativas de control para cada recinto, respectivamente; por lo que se debió utilizar softwares especializado, MATLAB y GAMS.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Investigación de Maestría

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía. Codirectores: Dr. German Alfonso Osma Pinto y Dr. Gabriel Ordóñez Plata.

# ABSTRACT

---

TITLE: PROPOSAL OF PROCEDURE FOR THE DESIGN OF THE AUTOMATION OF HYBRID LIGHTING SYSTEMS IN INDOOR SPACES FROM A MINIMUM FINANCIAL COST APPROACH<sup>3</sup>

AUTHOR: LAURA YAZMIN AMADO DUARTE<sup>4</sup>

KEYWORDS: Hybrid lighting, experimentation, modeling, control alternative, automation.

DESCRIPTION: This research work presents a procedure for the dimensioning of the electrical lighting control alternative of hybrid lighting systems (HLS), for selected spaces with similar characteristics to existing ones in the Electrical Engineering Building, considering the lower total financial cost.

This procedure consists of eight (8) sequential steps: (i) Characterization of the space both in its physical part and in its daylighting, (ii) Lighting and operation characterization of the ILS luminaires, (iii) Definition of the control alternatives (quantity and technical characteristics) of potential application. (iv) Modeling of the total indoor lighting and energy consumption for each control alternative, (v) Quantification of the minimum quantities of the required components for the implementation of each control alternative, (vi) Definition of the total financial cost function by alternative, (vii) Estimation of total financial cost of each control alternative and selection of the alternative of lower total financial cost and (viii) Construction of the dimensioning report of the selected control alternative for the HLS.

The procedure was applied to two indoor spaces of Electrical Engineering Building, classroom IE305 (third floor) and meeting room (fifth floor) with an fluorescent lighting system, which allowed establish the control alternative of lower financial cost for each space. Such a process was based on the experimental modeling of the lighting systems of the two indoor spaces. In total, were considered 756 and 5428 control alternative for each space, respectively, reason why it was necessary to use specialized software, MATLAB y GAMS.

---

<sup>3</sup> Master Thesis

<sup>4</sup> Faculty of Physical-Mechanics Engineering. Department of Electrical and Electronics Engineering and Telecommunications. Advisor. PhD Rodolfo Villamizar Mejía. Co-advisors: PhD German Alfonso Osma Pinto y PhD Gabriel Ordóñez Plata.

# INTRODUCCIÓN

---

El consumo de energía eléctrica en edificaciones se debe básicamente a iluminación, climatización y a otros equipos. Para el caso específico de la iluminación artificial en edificaciones, la Agencia Internacional de Energía (IEA – International Energy Agency) estima que el servicio de iluminación equivale aproximadamente al 4% del consumo energético total en las edificaciones de tipo residencial y al 12% en otras edificaciones [1].

Esto conlleva a desarrollar soluciones orientadas al menor consumo energético en edificaciones para mitigar el daño al medio ambiente. En ese sentido, la construcción verde es una respuesta a esta necesidad, tanto en edificaciones como en viviendas. Las edificaciones verdes afectan en menor medida al medio ambiente en comparación con las edificaciones tradicionales, propendiendo por la calidad de vida de sus ocupantes y la reducción del consumo de energía en un 30% y de las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 35% [2].

El diseño energético de las edificaciones verdes se basa en la incorporación de aplicaciones que propenden por el uso racional de la energía (URE), a partir de las cuales se aprovechan las condiciones climáticas específicas del emplazamiento (lote de la edificación), con la finalidad de reducir el consumo energético por iluminación y climatización o generar energía eléctrica en sitio.

Para el caso específico de la iluminación, en la literatura se aprecian diversas publicaciones científicas sobre la integración de los componentes natural y artificial de la

iluminación por medio de alternativas de control<sup>5</sup> [3], los cuales se denominan sistemas de iluminación híbrida - SIH ([4], [5]).

Sin embargo, la mayoría de estas publicaciones exponen investigaciones desarrolladas en zonas templadas, como Estados Unidos y Europa, lo cual denota carencia de estudios aplicables para las zonas tropicales debido a la diferencia de los niveles y comportamiento de la irradiación solar entre las dos zonas.

Lo anterior motiva el desarrollo de investigaciones en este campo, como este trabajo de investigación, más aún cuando se ha reportado que un SIH puede reducir el consumo de energía eléctrica en 41,5% [4], 32% [6], 41,62% [7] y 54% [8]. Tales resultados son posibles debido a que la automatización permite en menor o mayor grado el aprovechamiento de la luz natural disponible.

No obstante, el uso de soluciones automatizadas conlleva un mayor costo en la implementación, la operación y el mantenimiento de un SIH; por lo que es necesario estudiar la relación beneficio-costos para favorecer financieramente a los usuarios en el marco del uso racional de la energía.

En razón a lo mencionado, este trabajo de investigación de maestría propone un procedimiento para determinar (selección y dimensionamiento) la alternativa de control de menor costo financiero total, para un sistema de iluminación híbrida (SIH) de un espacio interior (oficina o aula) determinado. Este procedimiento se basa en el modelado de la iluminancia interior (natural y artificial), el consumo energético y el costo financiero total de un conjunto de alternativas de control. Al respecto, es importante precisar que tal procedimiento no busca realizar el diseño eléctrico como tal, sino que se orienta al control y la automatización del mismo, y que por ende, se

---

<sup>5</sup> Una alternativa de control consiste en la definición de los grupos de control (agrupación específica de las luminarias) y sus estrategias de control de iluminación eléctrica. Es requisito para un SIH que exista una combinación de la estrategia de control de aprovechamiento de la luz natural y la estrategia de ocupación. En ese sentido, la estrategia de control comprende: i) La técnica de control, es la forma como es ajustado el flujo luminoso de las luminarias que conforman los grupos de control, que puede ser: dimerización y conmutación (On/Off); ii) Los componentes de control que permiten la implementación de la estrategia de control y iii) Las consignas de operación de los grupos de control.

basará en el diseño eléctrico de iluminación artificial que haya sido establecido para los espacios interiores a ser analizados.

El comportamiento lumínico del SIH debido a una alternativa de control es determinado por las características técnicas de la estrategia de control, la iluminación natural interior disponible y el sistema de iluminación artificial existente. Con base en ello, se estima el consumo energético de la solución potencial de control (alternativa de control), y que, junto con diversas consideraciones financieras, permite cuantificar el costo financiero total de la solución. Finalmente, se lleva a cabo una búsqueda exhaustiva para seleccionar la alternativa de control de menor costo financiero total, a partir de las alternativas de control posibles, que surgen de un proceso combinatorio de cuatro estrategias de control establecidas y las diferentes configuraciones posibles de grupos de control dadas para el recinto.

Con el fin de facilitar la comprensión de las generalidades de la investigación, este capítulo presenta la declaración del problema (Sección 1.1), la motivación y justificación (Sección 1.2), los objetivos y alcances (Sección 1.3) de este trabajo de maestría, los principales conceptos relacionados con la iluminación en interiores y los sistemas de iluminación híbrida (SIH) (Sección 1.4), el control y automatización de éstos (Sección 1.5) y el modelado de la iluminancia (Sección 1.6). Asimismo, este capítulo incluye la estructura del documento (Sección 1.7).

## **MARCO TEORICO**

Esta sección presenta generalidades sobre la iluminación y el control de los SIH.

### **Iluminación**

La iluminación es un pilar de la calidad de vida de los seres humanos desde tiempos remotos. En general, ésta puede ser proporcionada por fuentes de luz natural, como el sol (directa) y la bóveda celeste (difusa), o por fuentes de luz artificial que funcionan con energía eléctrica [9].

Para el caso de la iluminación interior, se analiza específicamente la iluminancia o nivel de iluminación que es la cantidad de luz en lux que recibe la superficie de trabajo del usuario (aproximadamente a 75 cm sobre el piso), siendo la variable base del modelado abordado en este trabajo de investigación. La Tabla 1 presenta conceptos relacionados con la iluminación interior.

Tabla 1. Conceptos de iluminación.

Magnitudes	Definición	Unidad
Flujo luminoso (F)	Cantidad de energía luminosa emitida por una fuente.	Lumen (lm)
Iluminancia o nivel de iluminación (E)	Cantidad de luz que recibe una superficie	Lux (lx) lux=lumen/m <sup>2</sup>
Intensidad luminosa (I)	Energía luminosa emitida en una dirección	Candela (cd)
Luminancia o brillo (L)	Intensidad (I) o flujo de luz (F) emitido por unidad de superficie	Cd/m <sup>2</sup>
Irradiancia (G)	Potencia por unidad de superficie	W/m <sup>2</sup>
Eficacia luminosa o rendimiento luminoso ( $\eta$ )	Flujo emitido por unidad de potencia de las fuentes luminosas	lm/W o lux/(W/m <sup>2</sup> )*

Fuente: Elaboración propia, con base en [9], [10].

\* Definida también como el cociente entre la iluminancia natural exterior y la irradiación solar en si misma [11], [12].

### • Iluminación natural

La iluminación natural de un espacio interior consiste en usar aberturas que permitan el ingreso de la luz natural proveniente del exterior. La mayoría de sistemas de iluminación natural buscan suministrar luz difusa y evitar la luz directa del sol dado que puede causar deslumbramiento y aumento excesivo de la carga térmica del espacio<sup>6</sup>. Algunos sistemas pueden aprovechar la luz directa sin afectar el campo visual de los ocupantes; tal es el caso de los tubos solares que filtran los rayos infrarrojos (mayores responsables del aporte de la carga térmica) y ultravioletas [13]. Diversos estudios han demostrado que los beneficios de la iluminación natural no se limitan a la reducción del consumo energético, sino que también mejoran la satisfacción, la motivación de los ocupantes y la productividad de los trabajadores [14].

<sup>6</sup> Este fotosensor detecta el nivel de iluminación en el espacio, la cual es transformada en una

El potencial de iluminación natural de un espacio depende de la cantidad y dirección de la luz solar que llegue del exterior, y del tamaño y ubicación de las ventanas y otros orificios, que son los medios para conducir la luz natural al interior de los espacios [10].

**La luz natural.** Es la parte visible de la irradiación solar percibida por el ojo humano. Considerada como la forma más económica y eficiente de usar la energía solar en las edificaciones [15]. Su naturaleza es dinámica ya que varía en cantidad y espectro de acuerdo a la altitud del sol y la transmisión atmosférica [13].

La luz que incide sobre una ventana en un día claro está compuesta por tres componentes: la luz solar directa, la luz difusa del cielo y la luz reflejada desde superficies externas [31].

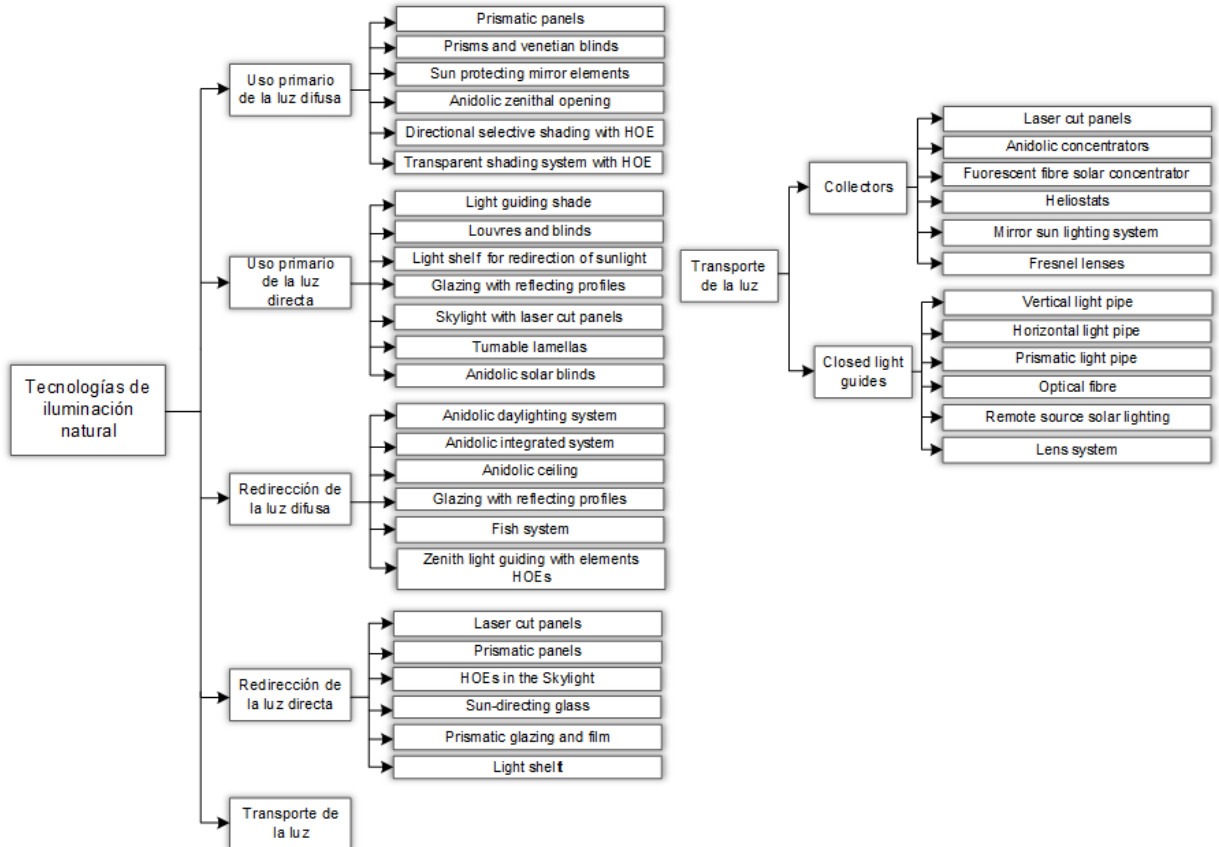
- *Luz solar directa:* Es considerada como la luz que ingresa a un espacio directamente desde el sol. Es unidireccional y de gran intensidad. Generalmente, este tipo de luz no es adecuada para iluminar un espacio interior, ya que puede producir deslumbramiento y una excesiva ganancia de calor [10], [16].
- *Luz difusa:* Es la luz natural deseable para iluminar un espacio interior. Se caracteriza por tener una menor intensidad pero es muy estable en el tiempo y está disponible en todas las direcciones [10], [16]. Las edificaciones son mayormente iluminadas por luz difusa [17].
- *Luz reflejada:* Proporción de luz natural que alcanza una superficie después de diferentes trayectorias de reflexión, debido a distintos tipos de obstrucciones externas como el suelo y otras edificaciones, entre otras [31].

**Sistemas de iluminación natural.** La ventana es el medio más utilizado como sistema de iluminación natural. Su contribución depende mayormente de la luz incidente sobre las fachadas de la envolvente de la edificación y de su área, tipo de acristalamiento, ubicación en la fachada y orientación [5], [18].

La Figura 1 agrupa diversas opciones tecnológicas de iluminación natural de acuerdo con las siguientes características, uso primario de luz difusa, uso primario

de luz directa, re-dirección de la luz difusa, redirección de luz directa y transporte de la luz al interior de los espacios. Adicionalmente, la Tabla 2 presenta criterios para la clasificación de las tecnologías según ubicación, posición, función y capacidad de movimiento.

Figura 1. Tecnologías para iluminación natural según el tipo de fuente y tratamiento de la luz.



Fuente: Elaboración propia, con base en [18] y [19].

\*HOE: *Holographic optical element*.

Tabla 2. Criterios de clasificación de tecnologías para iluminación natural.

Criterio	Clasificación
Ubicación con respecto a la envolvente	Exterior, en la ventana, en el interior, combinado
Posición	Genital (techo), lateral (e.g ventana), transportada (e.g. tubo solar)
Función	Protección a deslumbramiento, sombreado solar, re-direccionamiento, transporte de luz, uniformidad de la luz día, estética, térmica
Capacidad de movimiento	Fijo, ajustable, seguimiento solar

Fuente: Elaboración propia, con base en [18]

**Condiciones de cielo.** La condición de cielo afecta la disponibilidad de la luz natural y, en consecuencia la reducción del consumo energético obtenido por el uso de controles de iluminación artificial integrados a la luz natural. Esto debido a que las condiciones de cielo varían de acuerdo a la época del año o las estaciones y el clima local, el cual está sujeto a la posición geográfica (latitud y longitud) del lugar y la altitud [5].

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE – *Commission Internationale de L’Eclairage*) define las siguientes condiciones de cielo:

- *Condición de cielo cubierto:* Representa el escenario más desfavorable y más usado para realizar cálculos de iluminación natural; en este caso solo hay luz difusa que incide en la ventana proveniente del cielo y la tierra y el brillo no es significativo [20], [21].
- *Condición de cielo claro:* En este caso hay pocas o ninguna nube y se caracteriza por tener una alta luminancia e irradiación solar [15].
- *Condición de cielo intermedio:* Esta condición se encuentra definida entre la condición de cielo cubierto y cielo claro. Se caracteriza porque varía ampliamente de acuerdo a la visibilidad que haya del sol según la forma y la cantidad de las nubes [22].

**Disponibilidad de la luz natural.** Hace referencia tanto a la presencia de luz natural en el exterior como a la luz natural interior que viene del sol y la bóveda celeste en una ubicación específica para un tiempo y condición de cielo dado [23].

La disponibilidad de luz exterior depende mayormente de las condiciones de cielo, la altitud del sol y la transmisión atmosférica [13]. La disponibilidad de la luz interior depende de la disponibilidad de la luz natural exterior, la hora del día, el área de la(s) abertura(s), la forma, la orientación y el tipo de acristalamiento de las ventanas, la presencia de obstrucciones externas que afectan el ángulo de cielo que puede ser visto a través de las ventanas [5], [13], [24], la ubicación geográfica y orientación del cuarto, las dimensiones y la profundidad del cuarto [25].

El conocimiento de la disponibilidad de luz natural interior es determinante para reducir el consumo de energía eléctrica [24] debido a la iluminación artificial. Se aclara que siempre es necesario instalar un sistema de iluminación artificial para satisfacer el confort visual en periodos diurnos de baja irradiación solar y periodos nocturnos. Tal conocimiento ayuda a estimar la reducción potencial del consumo energético y a la toma de decisión sobre invertir o no en un sistema de control de iluminación (que ajuste automáticamente la iluminación artificial para complementar la luz natural en un instante dado) [13].

- **Iluminación artificial**

La iluminación artificial consiste en iluminar un espacio con luz que posee un espectro similar al de la luz natural, a partir de fuentes artificiales como el fuego, combustibles fósiles y energía eléctrica. Las fuentes de iluminación a base de energía eléctrica son las más usadas; transforman la energía eléctrica en luz visible para un grado de eficiencia determinado. Son de diversos tipos, por lo que su selección depende del espacio (oficinas, aulas, hospitales, etc.) y la exigencia visual según la tarea a desarrollar.

Los sistemas de iluminación eléctricos básicos se componen de los siguientes elementos:

**Lámparas.** Es una fuente de luz fabricada para producir una radiación óptica, usualmente visible. Actualmente, el tipo de lámpara más usado es la fluorescentes en sus dos clases, de tubo (lineales) y compactas (CFL, por sus siglas en inglés) [14]. Otros tipos de lámpara de tendencia creciente en el mercado son aquellas que usan tecnología de estado sólido (SSL por sus siglas en inglés), denominadas LED (*Light-emitted diode*), OLED (*organic light-emitting diode*) y LEP (*light-emitting polymers*) [14]. La Tabla 3 presenta información técnica sobre algunos tipos de lámparas.

Tabla 3. Tipos de lámparas y sus características típicas.

Tipo de lámpara	Características				Aplicaciones
	Eficacia luminosa (lm/W)	Vida útil en horas (h)	Costo de instalación	Costo de operación	
Incandescente (GSL)	5-15	1000	bajo	Muy alto	Iluminación general
Tungsteno halógeno	12-35	2000-4000	bajo	alto	Iluminación general
Vapor de mercurio	40-60	12000	moderado	moderado	Iluminación exterior
Tubo fluorescente T5*	20-93	8000-19000	bajo	bajo	Iluminación general
CFL	40-65	6000-1200	bajo	bajo	Iluminación general
Lámpara de inducción	60-80	60000-100000	alto	bajo	Lugares donde es difícil el acceso para el mantenimiento
Haluro metálico	50-100	6000-12000	alto	bajo	Pequeñas tiendas y edificios comerciales
Sodio a alta presión (estándar)	80-100	12000-16000	alto	bajo	Iluminación exterior, iluminación de calles, bovedas
Sodio a alta presión (color mejorado)	40-60	6000-10000	alto	bajo	Exterior, iluminación interior comercial
LED	20-120	20000-100000	alto	bajo	Todo en un futuro cercano

Fuente: Elaboración propia, con base en [14], [13].

**Luminarias.** Una luminaria es un dispositivo completo de iluminación, compuesto por una o varias fuentes de luz (lámparas) y elementos de operación (transformador, balastos, encendedor (*ignitor*), etc). También hace parte de este dispositivo componentes de conexión, protección y posicionamiento de las lámparas y partes para distribuir la iluminación [14].

**Auxiliares.** Son aquellos elementos además de las lámparas, de los cuales depende la eficiencia energética. Estos incluyen balastos, transformadores, arrancadores (*starters*) y dimmers.

- *Balastos:* Son los encargados de proporcionar una corriente controlada a las lámparas. Se pueden clasificar en balastos magnéticos y electrónicos. Los balastos magnéticos ya no son utilizados por su baja eficiencia. Actualmente, se usan balastos electrónicos de dos tipos, convencionales (no modulan el flujo luminoso) y dimerizables (modulan el flujo luminoso) [14].
- *Dimmers:* Son dispositivos que permiten variar la intensidad de luz que emiten las lámparas (no todos los tipos de lámparas son compatibles con este dispositivo) [14].

- **Iluminación híbrida (natural – artificial)**

La iluminación híbrida es proporcionada por un sistema de iluminación que integra tanto la iluminación natural como la iluminación artificial. A este tipo de integración se le denomina Sistema de iluminación híbrida (SIH) [14] y consta de:

- *Sistema de iluminación natural.* Proporciona la iluminación natural.
- *Sistema de iluminación eléctrico.* Proporciona la iluminación artificial.
- *Sistema de control de iluminación.* Permite la integración tanto del componente natural como del componente artificial de iluminación.

Los SIH suministran la iluminancia requerida por el usuario sobre la superficie de trabajo según la luz natural disponible en el recinto, de acuerdo a la actividad y régimen de ocupación [26], [27]–[30]. Por tanto, reducen el uso de luz artificial [5], [31], [32], [33].

La complejidad de un SIH depende del tipo de sistema de iluminación natural que lo compone, desde la ventana hasta sistemas de uso primario de luz difusa y la luz directa y con ajuste de la dirección, transporte y distribución de la luz natural al interior de los espacios [3], [18], [19].

### **Control de los SIH**

Aunque en general la definición de un SIH indica la inclusión de un control automatizado, se puede indicar de manera amplia que hay dos enfoques de control, manual y automatizado. Es manual cuando el usuario evalúa las condiciones de iluminación y opera dispositivos para modificar el aporte de las fuentes de luz natural y luz artificial, tales como dimmers, interruptores y mecanismo de sombreamiento [4], [30], [32].

El control de un SIH es automatizado cuando integra sensores, actuadores, controladores, que pueden operar de forma independiente o integrada a un sistema de automatización del edificio, y opera según consigna predefinida o desde un sistema

de inteligencia artificial. Un SIH automatizado puede presentar diversos grados de complejidad, robustez y tecnología [4], [5], [32], [34].

El grado de aprovechamiento de la luz natural por parte de un SIH depende de las características técnicas de la alternativa de control, lo cual define el régimen de operación de uso de las luminarias (fuente de luz complementaria) y por ende determina la reducción del consumo energético. A mayores prestaciones de la alternativa de control menor es el uso de la iluminación eléctrica [5], [27], [28], [30].

- **Clasificación de los sistemas de control de iluminación**

El control de un sistema de iluminación se puede clasificar según la integración del control de la iluminación natural, el tipo de lazo y la operación de las luminarias.

**Control conjunto de la iluminación natural.** Algunos SIH pueden controlar tanto la luz artificial como en algún grado la luz natural disponible del recinto. A partir de lo indicado [3], [5], [27], [35], [36], se pueden clasificar los SIH en tres tipos según la interacción con la iluminación natural: sin control, control independiente y control integrado, los cuales son presentados por la Tabla 4.

Tabla 4. Tipos de SIH según el control ejercido sobre la iluminación natural.

Tipo de SIH	Característica	Ventaja	Desventaja
Sin control	No controla la disponibilidad de iluminación natural interior	Menor costo	Pueden darse escenarios de deslumbramiento y mayor ganancia térmica
Control independiente	Hay control de la contribución de luz natural interior; sin embargo, no está integrado con el control de iluminación artificial	Disminuye en algún grado escenarios de deslumbramiento y ganancia térmica	No se garantiza el mayor aprovechamiento de la luz natural
Control integrado	Hay control simultáneo e integrado de la luz natural y luz artificial en el recinto	Mayor confort visual para el usuario Reduce la ganancia térmica	Mayor complejidad del sistema Mayor costo

Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de SIH no tiene control sobre la penetración de la iluminación natural al recinto debido a alguna de las siguientes razones o combinación de éstas: el diseño de la edificación propende por mitigar la ganancia térmica y evitar el deslumbramiento.

miento, el alto costo de soluciones para controlar la iluminación natural y el no interés en controlar la penetración de luz natural. En casos de deslumbramiento o irradiación solar directa en el recinto, usuarios pueden optar por el uso de medios para bloquear la disponibilidad de luz natural, como persianas.

Los SIH con control independiente de luz natural y luz artificial operan separadamente y cuenta con su propio controlador y pueden o no compartir información entre ellos. Shen *et al.* [30] presentan un ejemplo de un SIH de control independiente donde las persianas de las ventanas controlan la penetración de la luz natural, a partir de un lazo abierto y las luminarias operan según una solución de lazo cerrado.

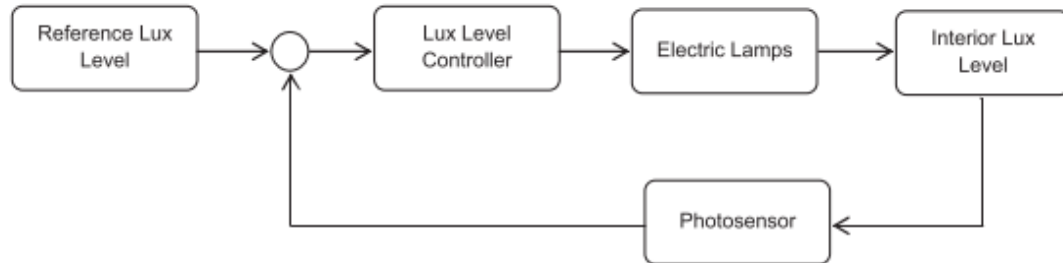
Los SIH con control integrado centralizan el control de luz natural y luz artificial y responden a un solo algoritmo de operación, que propenden por mantener un nivel de iluminación interior deseado sobre la superficie de trabajo [5], [19], [28], [30]. El control de la luz natural se logra por medio de mecanismos y dispositivos que pueden regular su disponibilidad [5], [19], [28], y en algunos casos, también pueden direccionarla al interior de los espacios [37].

El control de luz natural puede ser realizado a partir de luminarias híbridas (luz artificial y luz natural) sin ajuste del aporte de luz natural [19], luminarias híbridas con ajuste del aporte de luz natural [12], tubos solares con *dimmer* [38] y dispositivos automatizados de sombreado [5], [21], entre otros, que ajustan el aporte de la luz natural y en consecuencia ayudan a reducir la carga térmica de ésta [14], [5], [19], [33], [66].

**Tipo de lazo.** El control de iluminación en un SIH puede ser realizado a partir de un lazo cerrado o lazo abierto. El control de lazo cerrado detecta continuamente el nivel de iluminación interior en la zona y lo comunica al controlador del nivel de iluminación (combinación de luz proveniente de la fuente natural y de las lámparas), para que éste realice el ajuste requerido en los niveles de la iluminación eléctrica [5]. La Figura 2 representa el diagrama de flujo del control de lazo cerrado. Por el contrario, el control de lazo abierto se caracteriza por no tener realimentación del nivel de iluminación. Este control solo detecta los niveles de luz natural disponibles en el

cuarto, a partir de los cuales el controlador proporcionará la salida de luz eléctrica correspondiente [5], [30].

Figura 2. Diagrama de flujo del control de iluminación de lazo cerrado de un SIH



Fuente: [5].

**Operación de las luminarias.** Según el tipo de luminaria y dispositivos del SIH, se puede realizar una operación On/Off de las luminarias de forma total o parcial por grupos de control o una operación dimerizada del flujo luminoso de las luminarias, que permita ajustar la iluminancia artificial entre casi 0% y 100% de su valor máximo [5], [30], [40].

- **Definiciones a tener en cuenta para el diseño de un sistema de control de iluminación**

**Técnica de control – TC.** Es la forma como es realizado el ajuste del flujo luminoso emitido por las lámparas [41].

- *Conmutación:* Es la operación de encendido y apagado de las lámparas, a partir de la cual la salida de luz de las lámparas sólo puede tomar dos valores, 100% o 0% [41].
- *Dimerización:* Es la operación de regulación entre un rango de 0% a 100% de la intensidad de la salida de luz de las lámparas [41].

**Actuador de control – AC.** Es el medio para implementar la técnica de control [41].

- *Interruptor*: Interrumpe de forma directa el circuito de alimentación de las lámparas [14], [41].
- *Dimmer*: Regula el circuito de alimentación de las lámparas para causar un cambio en la intensidad de su salida de luz [14], [41].
- *Balasto electrónico dimerizable*: Es un elemento auxiliar que compone una luminaria, el cual recibe las señales de control y ajusta la salida de luz de las lámparas [14], [42]. Este elemento es considerado como un tipo de dimmer.
- *Relé*: Interrumpe el circuito de alimentación en función de una tensión de control de menor valor [41], [43].
- *Contactor*: Interrumpe el circuito de alimentación en función de una tensión de control. Un contactor puede soportar cargas de mayor potencia que el relé [43].
- *BUS*: A través de un sistema de bus distribuido (red de control), al que se encuentran conectados sensores y actuadores que disponen de inteligencia propia, por lo que no se hace indispensable contar con un controlador central [43], [44], [41], un ejemplo de ello son los sistemas KNX [29]. En algunos casos, también se dispone de una unidad de control conectada al bus, que permite gestionar y realizar diferentes configuraciones de grupos de control (luminarias o lámparas), como por ejemplo el sistema DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) [45].
- *PLC*: A través de un sistema centralizado que se caracteriza por poseer un solo elemento de control, al que se conectan todos los sensores y actuadores. Los sistemas basados en autómatas programables (o también PLC, de su acrónimo en inglés *Programmable Logic Controller*) son un ejemplo de ello. Este tipo de sistema ha dado paso al desarrollo de sistemas descentralizados, los cuales cuentan con más de un controlador interconectados entre sí [41], [43], [44].

**Modo de control – MC.** Hace referencia a la forma en como es operado el actuador de control [41].

- *Manual*: Operación manual del usuario [41].
- *Automático stand-alone*: Los dispositivos de control forman un pequeño sistema que funciona de manera autónoma y automática, no requieren de software para operar [41], [44].
- *Automático integrado*: Operación automática a partir de la integración de los dispositivos de control a un sistema de automatización y gestión de edificios [14], [41].

**Estrategias de control – EC.** Define el cómo debe ser alcanzado el objetivo de control, reducir el consumo eléctrico [14]. Un sistema de control de iluminación puede estar basado en una o más estrategias de control. Las más frecuentemente utilizadas son:

- *Ocupación*: El encendido y apagado de las lámparas depende de la presencia de personas en el espacio o área de trabajo a controlar [14], [41].
- *Aprovechamiento de la luz natural*: La dimerización, encendido y apagado de las lámparas depende de la disponibilidad de luz natural en el espacio. De manera tal que solo se usa la luz artificial cuando la luz natural es insuficiente para cumplir con el nivel de iluminación requerido [14], [41].
- *Programación por horarios*: Esta estrategia permite encender y apagar automáticamente las luminarias basándose en los horarios y patrones de ocupación del espacio [14], [41].
- *Zonificación*: Consiste en zonificar el espacio en áreas de iluminación de acuerdo a los requerimientos de iluminación de la tarea de trabajo visual a desarrollar y la zona útil de trabajo. Por ejemplo, un espacio como un aula de clase puede ser dividido en tres zonas, la zona cerca de las ventanas que recibe la mayor cantidad de luz natural, la zona donde están ubicados los pupitres (área útil de trabajo), la zona frente al tablero y en algunos casos una zona que es usada como pasillo dentro del salón, esto si el salón es de grandes dimensiones

y toda su área no está ocupada por pupitres, en este caso, esta zona requerirá menor iluminación que el área útil de trabajo [41].

Todas las estrategias de control mencionadas arriba pueden ser aplicadas en casi cualquier edificación. Éstas pueden ser sistemas *stand-alone* o parte de un sistema de gestión y automatización de edificios. Este último sistema posibilita la combinación e interacción entre diversas estrategias y tecnologías de control para integrar un sistema de control y monitorización de iluminación [14]. Ejemplos de esta clase de sistemas son KNX [29], Andover Continuum [38], DALI (exclusivo para control de iluminación) [14], [4], entre otros.

De ser implementado un sistema de gestión y automatización de edificios, el control de iluminación puede ser integrado con otros sistemas de control como el del aire acondicionado, seguridad, etc. Este tipo de sistema integrado permite compartir sensores y actuadores [14].

**Grupos de control GC.** Un grupo de control es una parte del sistema de iluminación operado de manera independiente por un actuador de control [41]. Puede estar conformado por una lámpara, una luminaria, un conjunto de lámparas, un conjunto de luminarias o todo el sistema de iluminación [41]. Los grupos de control son seleccionados dependiendo del tipo de actuador con el fin de simplificar el cableado [31].

## ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan una breve revisión de la literatura acerca del modelado de la iluminación interior, la disponibilidad de luz natural, los SIH, y su consumo energético.

### Iluminancia natural interior

La iluminancia natural interior es definida por el comportamiento lumínico, el cual puede ser descrito a partir de modelos, que representan las condiciones de un espacio, y la relación entre los diferentes parámetros y variables concernientes a la

iluminación interior. Por ejemplo, *el Daylight factor (DF)* es una relación entre la luz natural interior y la luz artificial exterior. Este factor ha sido modelado de diferentes formas, dentro de las cuales se encuentra una matriz en función de la posición geométrica en el espacio [28], [46].

Asimismo, la iluminancia natural interior es modelada en [46] como una función de la posición geométrica en el cuarto y es variable en el tiempo. Este modelo tiene en cuenta el DF y la iluminancia exterior.

Por otra parte, la iluminancia interior es modelada como: La combinación de la luz natural y artificial a partir de una iluminancia total sobre la superficie de trabajo [3], [4], [28] en la cual se tienen en cuenta parámetros tales como irradiación solar, iluminancia externa, posición de persianas, estado de las luces, entre otros.

De manera similar, en [5] es desarrollado un modelado por simulación que incluye iluminación artificial, iluminación natural, posición del sol, estadísticas climáticas y tipo de cielo, además de otros factores, para evaluar el desempeño de la iluminación interior en un edificio de oficinas en la zona tropical. Con respecto a la iluminancia artificial interior, en [6] es estimado su valor a partir de la superposición lineal de todas las fuentes artificiales existentes.

Otros factores relacionados con la iluminación interior son objeto de modelado, como el control de iluminación. *Parise et al.* [1] describen el efecto de las técnicas de control de iluminación (On/Off y dimerización) sobre la iluminancia artificial interior del espacio a partir de sencillas ecuaciones matemáticas. *Fischer et al.* [6] y *Wang et al.* [7] presentan la relación entre los niveles de dimerización de las luminarias y la iluminancia medida o deseada en la superficie de trabajo.

### **Cálculo de la disponibilidad de la luz natural**

Existen diversas maneras para determinar o predecir la disponibilidad de la luz natural en un espacio interior a partir de métodos dinámicos y estáticos que permiten cuantificar la luz natural.

*Dinámicos:* Se caracteriza por tener en cuenta aspectos que afectan el comportamiento dinámico de la luz natural, tales como las condiciones de cielo durante el año según datos climáticos, la orientación del edificio, la influencia de la radiación solar directa, entre otros. [51], [52]. Dentro de estos métodos se encuentra el *Daylight Autonomy* (DA) [21], [23], *Useful Daylight Illuminance* (UDI), [52], [23], que se basan en el *climate based daylight modelling* – CBDM [23]. Otro método es *Daylight Coefficient* (DC), propuesto por Tregenza y Waters [53], [54], [55], el cual puede ser usado para el análisis dinámico del perfil del nivel de luz natural anual.

*Estáticos:* Estos métodos usualmente se caracterizan por considerar una condición de cielo a la vez y una serie de supuestos simplificados [24], [51], [52]. El *Daylight Factor* (DF) es el método estático más sencillo y comúnmente utilizado [21], [35], [56] y empleado en este trabajo de investigación. Otras alternativas son el método CIE, el método IESNA [57] y el Estándar Europeo 15193.

Estos métodos se pueden basar en (i) modelos simplificados como tablas y diagramas, (ii) modelos complejos soportados en herramientas computacionales y de simulación o (iii) modelos a escala usando condiciones de cielo reales o artificiales [52].

- **Modelado del Daylight Factor (DF)**

La contribución de la luz natural en un espacio interior puede ser estimada de forma cuantitativa a partir de su DF característico y la disponibilidad de luz natural exterior [15]. El DF puede referirse a un valor mínimo, un rango de valores o un valor promedio de la iluminancia [13].

La CIE (*Commission Internationale de L'Eclairage*) define el DF como la relación porcentual entre la iluminancia natural interior ( $E_{in}$ ) sobre una superficie horizontal en un punto dado con respecto a la iluminancia natural exterior ( $E_{ext}$ ). El DF de un recinto puede ser un único valor si se toma solo un punto representativo de la superficie de trabajo o puede ser un conjunto de valores si se toman varios puntos de

la superficie de trabajo. La relación porcentual se obtiene a partir de la medición simultánea de  $E_{in}$  y  $E_{ext}$ , donde ésta última es medida en un plano horizontal sin obstrucciones [13].

El DF puede ser obtenido por medio de métodos analíticos, algoritmos computacionales, herramientas de simulación o experimentación. Algunos métodos analíticos identificados en la literatura son *Split Flux Method* ([12], [13], [15], [21], [56]–[61]) y *Average daylight factor (ADF)* ([12], [58], [61]–[65]). Las herramientas de simulación más usadas son *Radiance*, *Daysim*, *Adeline*, *Ecotect*, *Relux*, *Virtual Environment (VE)* ([12]), *VELUX - Daylight Visualizer 2.6* ([21]) y *DIALUX* ([35]), que mayormente se basan en las técnicas *Radiosity* y *Ray-tracing* ([55], [58], [66]).

Según lo expuesto en literatura, el DF es mayormente evaluado en la condición de cielo cubierto cuando solo existe irradiación difusa [35], como en el caso del modelo de cielo cubierto CIE, y la distribución de luminancia del cielo es conocida o estimada [57] y puede ser considerada simétrica [35], [67]. En esta condición la posición del sol no es relevante, por lo que el cálculo del DF es independiente de la ubicación del cuarto [21], [35], [67], del tiempo, de la época del año y de la orientación de la ventana; éste solo es afectado por la geometría del modelo [21]. Adicionalmente, el DF también ha sido aplicado para cielos claros [56] y otros tipos de cielo CIE [62].

Por otro parte, la literatura se enfoca en el cálculo del DF con base en la iluminancia horizontal (sobre terraza); sin embargo, con base en diversas investigaciones ([15], [20], [62], [64], [65], [68]), incluyendo este trabajo y un trabajo de investigación previo del grupo GISEL ([69]), es más correcto tomar  $E_{ext}$  sobre las fachadas (vertical) debido a las siguientes razones: i) Las ventanas de los edificios están ubicadas principalmente de forma vertical [17], ii) La luz natural interior tiene mayor afinidad a la luz que incide sobre las ventanas que a la iluminancia natural horizontal externa [64], [12], iii) El conocimiento de luz difusa que ingresa por las ventanas es fundamental, ya que los edificios son mayormente iluminados por luz difusa [17].

El uso frecuente del DF radica en que es un método simplificado que representa la cantidad de luz natural interior como una proporción (un valor relativo expresado en

%) de la luz natural exterior y, es considerado como un indicador comparable de la calidad de la iluminación natural interior, que puede ser contrastado con los valores mínimos de referencia del DF según la normatividad [52]. Puede ser usado en etapas tempranas de diseño de iluminación natural interior [33], [35] o para evaluar el desempeño de la iluminación natural en edificios ya construidos [12].

A partir del valor del DF característico para un punto interior sobre la superficie de trabajo, se puede estimar la iluminancia natural interior en un instante  $t$  en dicho punto multiplicando el DF por la iluminancia natural exterior,  $E_{in} = DF \cdot E_{ext}/100\%$  [46], [62], [68].

Es posible considerar que el DF es un valor constante ante diversas variaciones de la iluminación natural exterior [57], [62], ya que producen variaciones proporcionales en la iluminancia interior [20], [57].

Es importante mencionar que el DF no permite obtener información del riesgo de deslumbramiento (clave para estimar la posible presencia de confort visual) [13], [23], [52], [67].

### **Modelado de los SIH**

El modelado de los SIH puede tener diferentes enfoques, entre los cuales se encuentran optimización, control, diseño y predicción. Se puede minimizar el consumo de energía eléctrica debido al uso de luz artificial [6], [7], [12], lo cual puede considerar la satisfacción de un nivel de iluminancia predeterminado [13] o las preferencias de iluminación de los ocupantes [12], la selección de la posición de los sensores de iluminancia dentro del espacio [14], soluciones de diseño optimas relacionadas con los componentes del sistema de iluminación híbrida, tales como área de ventana ideal [15], parámetros geométricos y posición de estanterías de luz [16].

El modelado del control de un SIH está orientado a integrar la luz natural y la luz artificial de manera inteligente [5], [17], [18] y mantener el nivel de iluminación requerido [19]. El modelado dirigido al diseño aborda factores como los costos de

instalación, operación y mantenimiento durante la vida útil del sistema de iluminación [1], la estimación del impacto de la luz natural y de las estrategias de control en el desempeño energético del sistema de iluminación [4], la reducción potencia en el costo de energía [1], [5], [20], la configuración de las luminarias [21], la demanda energética de iluminación artificial y diferentes características arquitectónicas del cuarto [22]. El modelado para la predicción busca estimar la iluminancia natural interior [23] y la demanda energética por iluminación [22].

Dependiendo del enfoque del modelado, éste puede ser de tipo matemático o analítico [4], apoyado en programación con herramientas computacionales como Matlab [2], [6], [18], a partir de métodos estadísticos (regresión lineal [4], regresión polinómica [9], [10], [11], o regresión no lineal multivariable [22]) o técnicas de inteligencia artificial (*Machine learning* [6], redes neuronales [7], [66], algoritmos genéticos [18], lógica difusa [3], [19], técnicas híbridas [23]), a través de herramientas especializadas en simulación de iluminación y afines (Radiance [6], Dialux [2], [4], Virtual Environment (VE) [5], Daysim [4], [11], [22]. También puede ser usada una combinación de diferentes opciones de modelado como las mencionadas [26], [79].

La Tabla 5 muestra algunos ejemplos de modelado reportados en la literatura.

Tabla 5. Casos de modelado del comportamiento lumínico y energético de SIH.

Ref Año	Espacio	Propósito	¿Qué modela?	Tipo de modelado	Modelo
[46] 2013	Cuarto	Diseño de un sistema de iluminación	Iluminancia artificial (Sistema de iluminación eléctrico) Iluminancia natural Consumo energético Retorno de la inversión	Matemático, por medio del método Lumen y uso de Dialux	$kE = E - ED$ (1) $E_D(x, y, t) = DF(x, y) * E_{ext}(t)$ (2) $W_{CS} = k_y * P * t$ (3) $ROI = (1 - k_y) \times P \times t \times \frac{C}{C}$ (4) $k$ = Factor de reducción de la iluminancia artificial $E$ = Iluminancia artificial $ED$ = Iluminancia natural interior $DF$ = Daylight Factor $E_{ext}$ = Iluminancia natural exterior $W_{CS}$ = Consumo energético anual total $k_y$ = Impacto sobre la energía del control de iluminación natural $P$ = Potencia eléctrica instalada $T$ = Tiempo de operación $ROI$ = Retorno de la inversión $(1 - k_y)$ = Ahorro energético anual en p.u. debido al control

Ref Año	Espacio	Propósito	¿Qué modelo?	Tipo de modelo	Modelo
					<p>c= Costo de un kWh                      C= Costo total de la instalación del control de iluminación natural</p>
[50] 2013	Oficina	Minimizar el consumo de energía por iluminación	Relación entre los niveles de dimerización y la iluminancia medida en la superficie de trabajo y la potencia consumida por las luminarias	Red neuronal (Matlab), algoritmo de optimización de programación no lineal y Dialux	<p><i>Función objetivo:</i></p> $E = \min \sum_1^M E_i = \min \sum_1^M P_i d_i$ <p>E=Consumo energético total de todas las luminarias                      Pi=Potencia nominal de la luminaria                      di= Nivel de dimerización de la luminaria</p> <p>La iluminancia de la superficie de trabajo y el nivel de dimerización de la luminaria tienen una relación no lineal establecida por un modelo de red neuronal.</p>
[47] 2014	Oficina	Estimar la iluminancia interior en edificios	Iluminancia interior sobre la superficie de trabajo	Modelo de caja negra fuzzy (Matlab)	<div style="text-align: center;"> </div> <p><b>Entradas:</b>                      Iluminancia externa                      Posición de persianas                      Radiación solar Global                      Radiación solar Difusa                      Estado de las luces (on/off)                      Posición de persianas (1 - 5)</p> <p><b>Salida:</b>                      Estimación de la iluminancia interior</p>
[28] 2015	Oficina	Maximizar el uso de la luz natural	Incluye el modelo de la Iluminancia total interior	Matemático a partir de teoría de matrices en Matlab y uso de Dialux	$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{11} & \dots & g_{nm} \\ g_{21} & g_{21} & \dots & g_{nm} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \emptyset_{s1} \\ \emptyset_{s2} \\ \vdots \\ \emptyset_{sm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(w) \\ f_2(w) \\ \vdots \\ f_n(w) \end{bmatrix}$ <p style="text-align: center;"><math>\times E_{NL} \quad (1)</math></p> <p>E= Iluminancia total interior  <math>g_{ij} \times \emptyset_{si}</math>= Iluminancia artificial interior  <math>f_i(w) \times E_{NL}</math>= Iluminancia natural interior  <math>E_{NL}</math>= Iluminancia natural exterior  <math>f_i(w)</math>= Función Daylight Factor</p>

Fuente: Elaboración propia

### Consumo de energía

El consumo de energía eléctrica es otro aspecto importante a considerar en un proyecto de iluminación, ya que a partir de éste se puede evaluar el desempeño energético de los sistemas de iluminación.

Al respecto se han desarrollado diversas investigaciones que abordan su modelado. Roisin *et al.* [4] y Chaiwiwatworakul *et al.* [8] presentan una relación de tipo lineal

entre la potencia eléctrica consumida por la lámpara y su flujo luminoso. Osma *et al.* [9] y Ozenc *et al.* [10] establecieron funciones polinómicas para expresar la potencia consumida respecto de los niveles de dimerización y la energía consumida con respecto a los niveles de dimerización, respectivamente. Doulos *et al.* [11] realizaron un estudio para desarrollar funciones polinómicas que representa las relaciones entre el porcentaje de salida de luz respecto a la tensión de control de dimerización, la potencia consumida relativa respecto a la tensión de control de dimerización y la potencia consumida relativa respecto al porcentaje de salida de luz.

## **ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

Este documento se ha dividido en siete capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

**Capítulo 1:** Presenta la declaración del problema identificado, la motivación, justificación y objetivos del trabajo de investigación.

**Capítulo 2:** Expone el procedimiento propuesto para realizar la selección y dimensionamiento de la alternativa de control de un SIH.

**Capítulo 3:** Describe la experimentación realizada para dos casos de estudio (aula IE305 y Sala de Reuniones del Edificio de Ingeniería Eléctrica) con el fin de analizar y modelar el comportamiento lumínico y energético de dos SIH.

**Capítulo 4:** Presenta el modelado del comportamiento lumínico y energético del SIH del aula IE305 y Sala de Reuniones del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

**Capítulo 5:** Explica los modelos obtenidos de comportamiento lumínico, consumo de energía y costo financiero total correspondientes a diversas alternativas de control de un SIH para determinados espacios.

**Capítulo 6:** Expone la alternativa de control de menor costo financiero total para el aula IE305 y Sala de Reuniones, como resultado de la aplicación de los modelos descritos en el Capítulo 5 y un proceso de búsqueda exhaustiva (fuerza bruta).

**Capítulo 7:** Presentan las principales conclusiones y observaciones de este trabajo de investigación, se plantean posibles trabajos futuros y finalmente se enumeran los trabajos de divulgación publicaciones realizadas durante la ejecución del presente trabajo.

## TRABAJOS ACADÉMICOS Y PROYECTOS PROMOVIDOS

En el transcurso de los estudios de maestría, se realizó una ponencia en un evento académico internacional, el CIIMCA 2015, a partir de la cual se logró una publicación científica sobre modelado de la iluminancia en espacios interiores. Adicionalmente, se participó como coautora en tres publicaciones relacionadas con SIH. La Tabla 6 relaciona la información detallada de las publicaciones.

Tabla 6. Publicaciones realizadas.

1	Modeling of lighting behaviour of a hybrid lighting system in inner spaces of Building of Electrical Engineering <i>Laura Amado, German Osma y Rodolfo Villamizar</i> <a href="https://doi.org/10.1088/1757-899X/138/1/012011">doi:10.1088/1757-899X/138/1/012011</a>	Materials Science and Engineering (MSE)	IOP Conferences Series <sup>7</sup>	v138
2	Characterization of hybrid lighting systems of the electrical engineering building in the Industrial University of Santander <i>Diego Galvis, Carlos Expósito, German Osma, Laura Amado y Gabriel Ordóñez</i> <a href="https://doi.org/10.1088/1757-899X/138/1/012012">doi:10.1088/1757-899X/138/1/012012</a>			2016
3	Building automation systems as tool to improve the resilience from energy behavior approach <i>German Osma, Laura Amado, Rodolfo Villamizar y Gabriel Ordóñez</i> <a href="https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.524">doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.524</a>	Procedia Engineering	ELSEVIER	2015
4	Control of a Hybrid Illumination System in a Tropical Zone <i>German Osma, Gabriel Ordóñez, Laura Amado y Rodolfo Villamizar</i> <a href="https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.704.368">doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.704.368</a>	Applied Mechanics and Materials	Trans Tech Publications	2015

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se indica que se participó en la codirección de los trabajos de grado titulados *Caracterización de la iluminación en los espacios interiores del Edificio de*

<sup>7</sup> Evento académico: *II International Congress of Mechanical Engineering and Agricultural Science (CIIMCA 2015)*. Celebrado en la Universidad Pontificia Bolivariana. Sede Bucaramanga. Octubre de 2015.

*Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander<sup>8</sup> y Herramienta computacional para el análisis de la iluminación y la climatización automatizada de espacios específicos del Edificio de Ingeniería Eléctrica Universidad Industrial de Santander<sup>9</sup>.*

---

<sup>8</sup> Trabajo de grado en Ingeniería Eléctrica. Autores: Diego Galvis y Carlos Expósito. Director: Dr. German Osma. Grupo de Investigación GISEL. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Año: 2014.

<sup>9</sup> Trabajo de grado en Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica. Autores: Leidy Carolina Acevedo, Andrés Suárez y Julián Benítez. Director: Dr. German Osma. Grupo de Investigación GISEL. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Año: 2014.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

---

Este capítulo presenta la declaración del problema identificado, la motivación, justificación y objetivos del trabajo de investigación.

## 1.1. DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

Una adecuada iluminación (e.g. nivel de iluminación) de espacios interiores de edificaciones favorece la calidad de vida de los ocupantes [77], influyendo de manera directa en su confort visual, estado de ánimo y productividad [81]. Para lograr esto, se requiere de iluminación artificial que constituye una carga significativa de consumo de energía eléctrica [5], [8], [82], [83] (28% en el sector residencial, 48% en el sector comercial y público y 16% en el sector industrial [14] y 8% en otros sectores de lo correspondiente a este rubro de consumo). Esto conlleva a la búsqueda de tipos de sistemas de iluminación que logren reducir el consumo energético, sin afectar la calidad de vida de los usuarios.

En general, estos sistemas se basan en el aprovechamiento de la irradiación solar incidente en las aberturas de un recinto, lo que permite reducir el consumo de energía eléctrica debido a la iluminación artificial [5], [26], [84], [85]. Se debe resaltar que la irradiación solar es un recurso abundante en el entorno tropical, de comportamiento cuasi-estable durante el año [18] y genera de forma natural confort visual para el usuario [6], siempre y cuando si se evita el exceso de irradiación solar directa en los espacios interiores.

La integración de la iluminación natural y artificial se puede lograr de forma manual (según la interpretación y disciplina del usuario), o automatizada (por medio de sensores, fotoceldas y/o controladores).

La integración automatizada de las iluminaciones se puede denominar iluminación híbrida y permite lograr un mayor impacto en la reducción del consumo energético [26], tanto en zonas templadas [4] como tropicales [38]. Por ejemplo, para el caso de lugares de clima templado como Turín (Italia) [4] o Turquía [83], se han reportado reducciones de consumo energético que pueden llegar a 30% con respecto al caso de uso exclusivo de iluminación artificial. De manera similar para la zona tropical, investigaciones en Singapur [74] y Colombia [38] documentan reducciones cercanas a 12% y 69%, respectivamente.

Un sistema de iluminación híbrida (SIH) está compuesto por las fuentes de iluminación natural y artificial (luminarias) y por los componentes de la alternativa de control específica. Esta última determina la operación de las luminarias (encendido/apagado y nivel de flujo luminoso) y la reducción en el consumo de energía. Tal reducción depende de las características técnicas de la alternativa de control.

Son funciones de la alternativa de control medir la iluminación natural en un instante de tiempo, cuantificar la necesidad de iluminación artificial en el espacio y ajustar el aporte luminoso artificial según las prestaciones de los dispositivos que conforman el SIH.

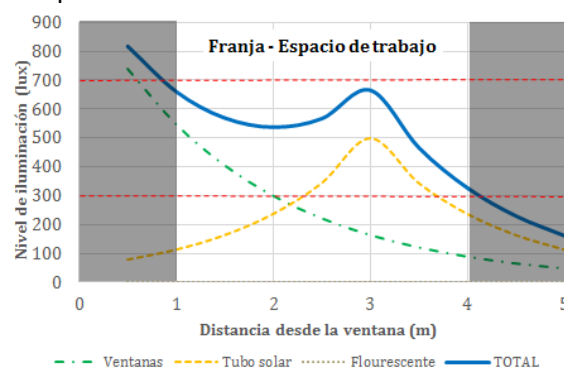
El aporte de iluminación artificial puede ser de dos clases según el tipo de control del SIH, total (encendido y apagado total de las luminarias) o parcial (gradual o de tipo dimerizada) [7], [26], [41]. El aporte es gradual cuando se varía la contribución lumínica total de las luminarias de forma escalonada a partir del encendido o apagado de cada luminaria o grupo de éstas, lo cual origina un número finito de escenarios de iluminación artificial; este tipo control no modula el flujo luminoso de cada

lámpara aun cuando la operación de cada lámpara en la luminaria<sup>10</sup> pueda ser independiente.

El aporte de iluminación artificial es dimerizado cuando la contribución es ajustada según el requerimiento específico de nivel de iluminación, a partir de la modulación del flujo luminoso de cada luminaria o grupo de éstas.

Las figuras 3 y 4 presentan un ejemplo de un sistema SIH automatizado para una oficina<sup>11</sup> cuya profundidad es de 5 metros medidos desde la ventana, en condición de no ocupación. La zona efectiva de trabajo en esta oficina abarca desde 1 metro hasta 4 metros medidos desde la ventana. Esta oficina tiene iluminación natural lateral (ventana) y cenital (tubo solar). Los niveles mínimos y máximos recomendados para esta superficie de trabajo son 300 lux y 700 lux, respectivamente. La Figura 3 considera el caso de irradiación solar en nivel alto en un instante de tiempo, tal que la contribución de iluminación natural (línea azul) es suficiente debido a los significativos aportes de iluminación de la ventana (línea de trazos verde) y al tubo solar (línea de trazos naranja). En este caso no hay contribución artificial dado que la iluminancia es mayor a 300 luxes en la región de interés (entre 1 metro y 4 metros de la ventana).

Figura 3. Descripción del comportamiento de iluminación – escenario: Nivel de radiación solar alto.



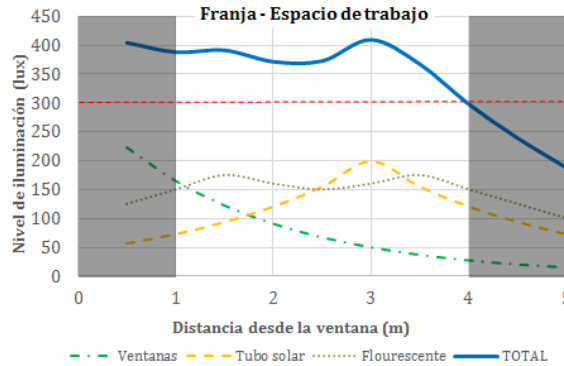
Fuente: Elaboración propia

<sup>10</sup> Una luminaria puede estar conformada por varias lámparas. Por ejemplo, para el caso del Edificio de Ingeniería Eléctrica, el gran número de luminarias instaladas poseen cuatro tubos fluorescentes, es decir cuatro lámparas.

<sup>11</sup> Tomado de la propuesta de tesis doctoral de German Alfonso Osma Pinto, Modelado y optimización del diseño exergético de viviendas a partir de aplicaciones URE, 2014.

La Figura 4 muestra un caso donde la contribución de iluminación natural es insuficiente en un instante de tiempo y el sistema de iluminación fluorescente debe aportar la iluminancia faltante, hasta satisfacer el valor mínimo (300 lux) en todo punto de la franja de trabajo, siendo el punto crítico (de menor iluminación) aquel ubicado a 4 metros de la ventana.

Figura 4. Descripción del comportamiento de iluminación – escenario: Nivel de radiación solar bajo.



Fuente: Elaboración propia

Es necesario mencionar que la implementación de un SIH requiere un mayor esfuerzo financiero (costos de inversión inicial, de operación y mantenimiento) para el cliente, en comparación con los correspondientes de un sistema tradicional (de accionamiento manual o con solo sensor de ocupación). Esto se debe a la inclusión de dispositivos de medición y control (sensores, actuadores y controladores) que hacen parte de la automatización de la alternativa de control de iluminación. Por otro lado, la alternativa puede demandar el uso de luminarias dimerizables con el mismo aporte lumínico característico de las luminarias On/Off instaladas o seleccionadas en la etapa de diseño, lo cual puede darse para los dos tipos de iluminación más utilizado, fluorescente y de estado sólido (*Solid state lighting* -SSL<sup>12</sup>) - LED.

<sup>12</sup> SSL (*Solid state lighting*): Es una tecnología alternativa para desarrollar sistemas de iluminación eficientes energéticamente en comparación con las lámparas compactas fluorescentes (CFL). SSL está basada en la tecnología de diodos emisores de luz (LEDs) [14].

Actualmente, los proyectos de iluminación desarrollados en la zona tropical (mayormente de inversión privada) se caracterizan por la incorporación de alternativas de control en algún grado, incluyendo el aprovechamiento de la iluminación natural. La Tabla 7 presenta algunas de las soluciones que se pueden encontrar en el mercado y que para efectos de identificación en este libro se denominan como soluciones A, B, C y D.

Tabla 7. Soluciones estándar para el control de iluminación.

Solución	Componentes	Operación	Desventajas
Referencia	SO	Todas las luminarias se encienden si se detecta presencia en el espacio por medio del sensor de ocupación.	No se aprovecha la iluminación natural.
A	SO <sub>fotoinc</sub>	Todas las luminarias se encienden al 100% de su capacidad siempre y cuando se detecte movimiento y el nivel de iluminación natural sea inferior al mínimo requerido. Éstas se apagarán después de un tiempo programado, únicamente cuando ya no detecte movimiento.	Este tipo de sensor mide el nivel de iluminación natural en el espacio una sola vez, cuando enciende las luminarias y no tiene la capacidad de apagarlas, a pesar de que la iluminación natural sea suficiente y ya no se requiera la iluminación eléctrica. Razón por la se genera un consumo de energía innecesario.
B	SO + Foo	Sólo permitirá el encendido de las luminarias si se detecta presencia y la iluminación natural es insuficiente. El flujo luminoso artificial no es modulado y las lámparas operan al 100% de su capacidad. Foo determina los estados de encendido y apagado a partir de dos <i>set-points</i> .	Este control puede producir cambios significativos en el estado de iluminación que pueden causar discomfort en los ocupantes.
C	SO+ Fdim	A partir de la detección de presencia por el sensor de ocupación y el nivel de iluminación sensado por el Fdim al interior del espacio, se permitirá el encendido de las luminarias. Fdim ajusta la contribución luminica de las luminarias que permita satisfacer un nivel mínimo de iluminación.	Fdim lleva las luminarias a un valor mínimo de flujo luminoso cuando hay un nivel satisfactorio de iluminación natural; sin embargo, no puede apagarlas y éstas siguen consumiendo energía (nivel mínimo de consumo diferente de cero).
D	SO+ Fdim +Con	SO y Fdim sensan el estado de ocupación y el nivel de iluminación, las cuales son las señales de entrada de un controlador, que define el régimen de operación de las luminarias (dimerización del flujo luminoso y estado On/Off).	Un costo financiero mayor en comparación con la solución B y C, aunque resuelve problemas descritos en los otros casos.

SO: Sensor de ocupación, SO<sub>fotoinc</sub><sup>13</sup>: Sensor de ocupación con fotocelda incluida, Foo: Fotosensor On/Off<sup>14</sup>, Fdim: Fotosensor On/Off<sup>15</sup>, Fdim: Fotosensor dimerizable<sup>16</sup>, Con: Controlador

Fuente: Elaboración propia

<sup>13</sup> Este sensor incluye una fotocelda que detecta el nivel de iluminación natural en el espacio. Envía una señal de control a un relé para encender las luces si se detecta movimiento y encuentra que el nivel de iluminación natural es inferior al nivel programado. Las luces se apagan después de que el tiempo de demora fijado haya expirado siempre que no detecte movimiento [93].

<sup>14</sup> Este fotosensor detecta el nivel de iluminación en el espacio, la cual es transformada en una señal de salida que activa un simple interruptor On/Off o un relé para encender o apagar las luces [94].

<sup>15</sup> Este fotosensor detecta el nivel de iluminación en el espacio, la cual es transformada en una señal de salida que activa un simple interruptor On/Off o un relé para encender o apagar las luces [94].

<sup>16</sup> Este fotosensor detecta el nivel de iluminación en el espacio, a partir del cual genera una señal de salida variable. Esta señal es enviada a un controlador que ajusta continuamente la contribución de la iluminación eléctrica [94].

En la actualidad, se aprecia una tendencia creciente de implementación de SIH en nuevas construcciones y remodelación de espacios interiores a niveles comercial e industrial. Mayormente, se observa que la selección de la alternativa de control de los SIH es determinada según la experticia del diseñador y el presupuesto asignado. Tal dinámica de dimensionamiento evidencia la falta de estudios especializados en esta temática.

Específicamente, se aprecia la carencia de una estrategia de dimensionamiento del control del SIH que considere las características específicas de un espacio dado (dimensiones y aporte de iluminación natural), el diseño eléctrico base (que da cumplimiento al nivel de iluminación según RETILAP) y un desempeño financiero más atractivo para el cliente durante la vida útil del sistema que comprende los costos de inversión, operación y mantenimiento [5].

Este trabajo de investigación busca atender parte de esta carencia, a partir de la propuesta de un procedimiento para la selección y dimensionamiento de la alternativa de control de un SIH, basado en un sistema de iluminación eléctrico ya instalado.

## **1.2. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Actualmente, existe la necesidad mundial de desarrollar soluciones con enfoque URE, lo cual propende por un estilo de vida más amigable con el planeta. En ese sentido, las investigaciones para mitigar el consumo de energía en edificaciones son un valioso aporte.

Dado que los sistemas de iluminación artificial ocasionan parte del consumo energético de las edificaciones, es necesario reducir este consumo. Una forma de lograrlo se basa en la integración de las iluminaciones natural y artificial a partir de estrategias de control.

Tal integración debe obedecer a criterios técnicos y financieros que faciliten la tarea de dimensionamiento para el diseñador y sea atractivo para el usuario.

Adicionalmente, lo propuesto en este trabajo de investigación se encuentra en consonancia con la difusión, promoción y aplicación de estrategias URE para iluminación que establece la reglamentación y normatividad colombiana, tales como el RETILAP, la Resolución 180919 de 2010 (adopción plan de acción para el desarrollo del programa PROURE 2010-2015) y la Resolución 41286 de 2016 (adopción plan de acción para el desarrollo del programa PROURE 2017-2022).

### 1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo general de este trabajo se definió como: *Proponer un procedimiento para la selección de la alternativa de control del sistema de iluminación híbrida en espacios interiores (aulas y oficinas) del Edificio de Ingeniería Eléctrica, bajo un enfoque de menor costo financiero total.*

Para lograr su cumplimiento se definieron tres objetivos específicos que a continuación se enuncian junto con sus respectivos alcances.

**OE1.** *Obtener el modelo experimental del comportamiento de la iluminancia y del consumo de energía del sistema de iluminación híbrida de dos espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica.*

Se establece el modelo experimental del nivel de iluminación híbrida (natural + artificial) y del consumo energético para dos espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica (Aula IE 305 y Sala de Reuniones), para una altura de trabajo de 0,75m, con base en la caracterización de: i) La iluminación natural específica del espacio interior analizado y ii) El sistema de iluminación eléctrica existente.

El modelo de iluminación<sup>17</sup> se basa en el aprovechamiento de iluminación natural e integración con la iluminación artificial. Considera la iluminancia natural exterior, las

---

<sup>17</sup> El modelo de iluminación trata sobre el valor de la iluminancia

dimensiones del espacio, la ubicación de las ventanas, la actividad humana (ocupación) y la alternativa de control existente.

**OE2.** *Determinar los modelos de iluminancia y de consumo de energía para diversas alternativas de control del SIH de cada espacio seleccionado.*

A partir del modelo base obtenido como resultado del objetivo específico No. 1, se plantea el modelado lumínico y de consumo energético para diversas alternativas de control aplicables a la iluminación híbrida de los espacios seleccionados.

Se pueden considerar tantos grupos de control como luminarias existan y se incluye el nivel mínimo de iluminación.

**OE3.** *Seleccionar y describir la alternativa de control del SIH de menor costo financiero total de cada uno de los espacios interiores seleccionados del Edificio de Ingeniería Eléctrica.*

Para cada alternativa se establece la función de costo financiero total como una función de valor presente neto (VPN) que considera la inversión inicial (incluye los costos asociados a la adecuación de la instalación eléctrica para la implementación de la alternativa de control seleccionada), los costos de operación y mantenimiento del sistema durante su vida útil.

Cada función de costo considera un número y tipo específicos de sensores (ocupación, fotoceldas On/Off, fotoceldas dimerizables), actuadores (e.g contactores y balastos) y controladores (e.g. Controlador lógico programable – PLC).

Posteriormente, se identifica la alternativa de control de menor costo financiero total a partir del enfoque de búsqueda exhaustiva, dado que las alternativas posibles surgen de un proceso combinatorio. Esto permite definir la cantidad y tipo de componentes de la alternativa de menor costo financiero.

Con base en los resultados obtenidos, se construye un reporte técnico que describe la alternativa de control del SIH para cada uno de los espacios interiores seleccionados del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Tal descripción abarca la presentación

esquemática de la alternativa de control, las especificaciones técnicas de los componentes y un análisis financiero.

Dado que la aplicación del procedimiento se realizó a espacios con iluminación fluorescente (tubos T5 y T8 de 60 cm), será objeto de un trabajo futuro estudiar espacios con iluminación LED.

## **2. PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA E CONTROL DE UN SIH**

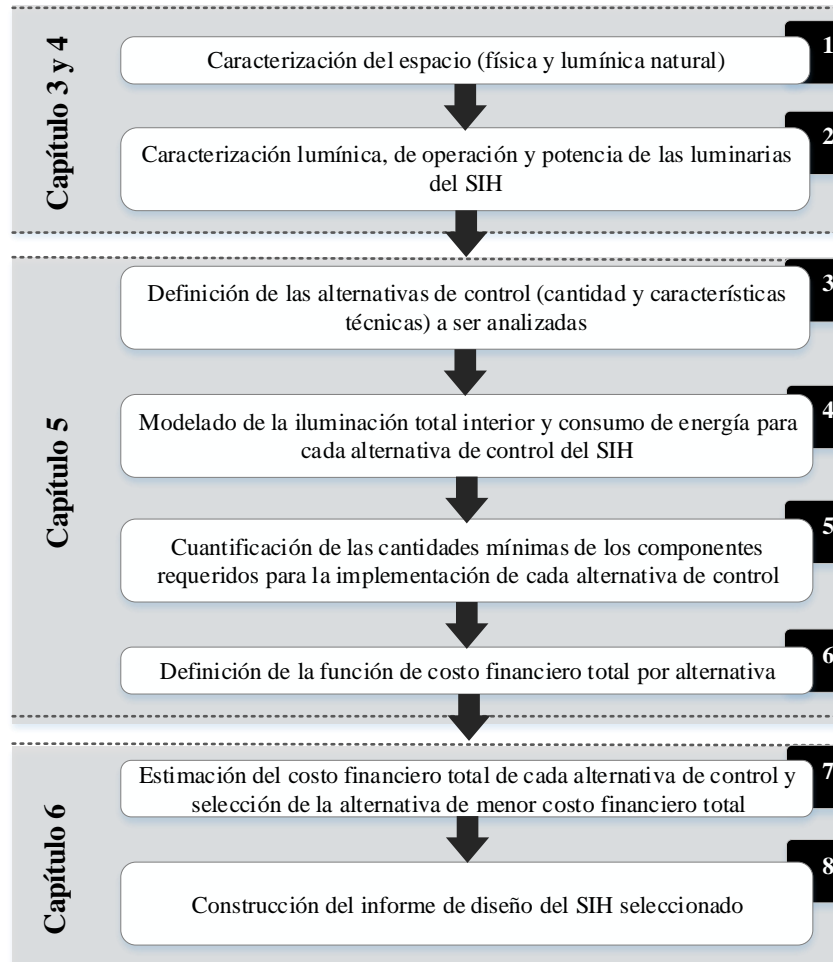
---

Este procedimiento se estableció con base en la experiencia de análisis de los espacios interiores seleccionados del Edificio de Ingeniería Eléctrica (aula IE 305 y sala de reuniones) y se espera sea efectivo para el estudio de espacios interiores de características similares con áreas entre 10 m<sup>2</sup> y 100 m<sup>2</sup>, ventanas ubicadas en fachadas norte, sur o ambas, protección de la irradiación solar directa, altura interior de aproximadamente 2,50 m y uso de luminarias fluorescentes o LED, ya sean On/Off o dimerizables.

El procedimiento consta de ocho pasos: i) Caracterización del espacio (física y lumínica natural), ii) Caracterización lumínica, de operación y potencia de las luminarias del SIH, iii) Definición de las alternativas de control (cantidad y características técnicas) a ser analizadas, iv) Modelado de iluminancia total interior y consumo de energía para cada alternativa de control del SIH, v) Cuantificación de las cantidades mínimas de los componentes requeridos para la implementación de cada alternativa de control, vi) Definición de la función de costo financiero total por alternativa, vii) Estimación del costo financiero total de cada alternativa de control y selección de la alternativa de menor costo financiero total, viii) Construcción del informe de diseño (cantidad y clase de dispositivos de medición y control, y análisis energético de la solución). La función de costo financiero total se construye a partir del valor presente neto (VPN) de la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento.

La Figura 5 presenta el esquema del procedimiento de dimensionamiento, en el cual se indica el capítulo del libro donde se observa la aplicación de cada etapa.

Figura 5. Esquema del procedimiento de dimensionamiento de la alternativa de control de un SIH.



Fuente: Elaboración propia

## 2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ESPACIO (FÍSICA Y LUMÍNICA NATURAL)

La caracterización física hace referencia a los atributos del recinto interior, tales como: dimensiones (largo, ancho y altura), ubicación, orientación y dimensiones de las ventanas, entre otras. Para esto, se realiza una inspección del lugar.

Ahora, la caracterización lumínica natural describe el comportamiento de la iluminancia natural al interior del recinto, para lo cual se emplea la matriz  $DF_{prom}$  característica del espacio. La matriz es constituida por los factores de luz diurna (*daylight factor* - DF) para un conjunto de puntos determinados que se encuentran uniformemente distribuidos sobre la superficie de trabajo interior, definida como el área del suelo del recinto a una altura de 0,75 m sobre el suelo. Esta matriz puede ser obtenida a partir de mediciones (experimentación)<sup>18</sup> o simulaciones<sup>19</sup>.

La matriz  $DF_{prom}$  permite estimar la iluminancia natural del recinto ( $E_D$ ) en función de la iluminancia natural exterior incidente sobre las ventanas ( $E_E(t)$ ). Asimismo, la iluminancia natural exterior incidente es una función de la irradiancia solar incidente ( $G_w(t)$ ) sobre la superficie  $w$  (fachada), para lo cual se usa un factor de conversión  $f_c$ .

$$E_D(t, x, y) = E_E(t) \cdot DF_{prom}(\%) = f_c \cdot G_w(t) \cdot DF_{prom}(\%) \quad (2.1)$$

## 2.2. CARACTERIZACIÓN LUMÍNICA Y DE OPERACIÓN DE LAS LUMINARIAS DEL SIH

Inicialmente, se describe el sistema de iluminación artificial (eléctrico) a partir de esquemas de conexión y ubicación de luminarias y sensores (ocupación y fotoceldas) y la identificación de las características técnicas de las luminarias (control y potencia). Para esto, se realiza una inspección del sistema y se revisan las fichas técnicas de los componentes.

Posteriormente, se identifican los grupos de control existentes junto con las luminarias que los integran y las estrategias de control propias. Con base en esta información, se definen las variables y escalares a ser consideradas para la formulación de

---

<sup>18</sup> Caso de este trabajo de investigación

<sup>19</sup> Existe software de simulación de iluminación interior (p.e. DIALux)

las condiciones de operación del SIH, tales como el estado de ocupación del recinto, el nivel mínimo de iluminación recomendado según el uso del espacio  $emin$ , el porcentaje de flujo luminoso de operación  $\varphi_{gi}(t)$  y el estado de operación de las luminarias  $OO_{gi}(t)$  (que conforma los grupos de control del recinto) en el instante  $(t)$  y  $(t - 1)$ .

Por medio de un proceso de medición (o simulación) se establecen (i) las curvas de iluminancia para una luminaria en los dos ejes de servicio (X y Y), (ii) la contribución de iluminancia de la luminaria  $k$  en el punto  $p_N$  del mallado,  $(a_{p(k,p)})$ , la cual puede ser expresada como la suma ponderada de las curvas de iluminancia de la luminaria en los ejes X y Y sobre el plano de trabajo (iii), y la curva de potencia de operación de la luminaria según el nivel de dimerización (aplica solo para luminarias dimerizables) o potencia de operación consumida por las luminarias On/Off.

### **2.3. DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE CONTROL (CANTIDAD Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS) A SER ANALIZADAS**

Una alternativa de control consiste en la definición de los grupos de control (agrupación específica de las luminarias) y sus estrategias de control de iluminación eléctrica. Es requisito para un SIH que exista una combinación de la estrategia de control de aprovechamiento de la luz natural y la estrategia de ocupación. En ese sentido, la estrategia de control comprende: i) La técnica de control, que es la forma cómo es ajustado el flujo luminoso de las luminarias que conforman los grupos de control y que puede ser: dimerización o conmutación (On/Off); ii) Los componentes de control que permiten la implementación de la estrategia de control y iii) Las condiciones de operación de los grupos de control, los cuales garantizan una iluminancia satisfactoria para el usuario sobre la superficie de trabajo.

Las condiciones de operación de un SIH son establecidas según los grupos de control y la técnica de control de cada uno de éstos. Un grupo de control es la agrupación de una o más luminarias; su número puede variar entre 1 y  $NK$ , donde  $NK$  es

el número de luminarias del recinto. Se dice que hay un grupo de control cuando todas las luminarias son agrupadas en un solo circuito eléctrico y de control y operan de igual manera para cualquier instante de tiempo  $t$ ; se puede decir que hay  $NK$  grupos de control cuando cada luminaria conforma un grupo de control que opera de forma independiente a las demás.

En la práctica, una estrategia de control se especifica por sus componentes de control. En este trabajo de investigación se analizan 4 estrategias de control ( $N_{ec} = 4$ ): (i) sensor de ocupación con fotocelda incluida, (ii) sensor de ocupación y fotocelda On/Off, (iii) sensor de ocupación y fotocelda dimerizable y (iv) sensor de ocupación, fotocelda dimerizable y controlador. Estas estrategias se definieron con base en la oferta de mercado.

La cantidad de alternativas de control a ser analizadas para un recinto pueden ser definidas por el diseñador o cliente, según su experticia o interés. Para este trabajo se analizaron todas las alternativas posibles ( $N_{SIH}$ ) con el fin de realizar un análisis comparativo más completo.  $N_{SIH}$  se determina a partir de la expresión (2.2), donde  $S(NK, N_{gc})$  es el número de Stirling de segunda especie que indica el número de agrupaciones posibles de  $NK$  luminarias para  $N_{gc}$  grupos de control, donde  $N_{gc}$  varía entre 1 y  $NK$ , y  $N_{ec}$  es el número de estrategias de control estudiadas. Para un recinto con  $NK = 4$  (Sala de reuniones) y con  $N_{ec} = 4$ ,  $N_{SIH}$  es igual a 756.

$$N_{SIH} = \sum_{j=1}^{NK} (S(NK, N_{gc}) \cdot N_{ec}^{N_{gc}}) \quad (2.2)$$

## 2.4. MODELADO DE LA ILUMINACIÓN TOTAL INTERIOR Y CONSUMO DE ENERGÍA PARA CADA ALTERNATIVA DE CONTROL

El modelado de iluminancia total interior se basa en la expresión (2.3) que describe la iluminancia total interior  $E_T$ , donde,  $E_A$  es la iluminancia artificial en función de la

alternativa de control presente y  $E_D$  es la iluminancia natural interior dada por la expresión (2.1);  $t$  indica que la iluminancia se calcula para todo instante de tiempo y  $x, y$  representa la posición del punto  $p$  que hace referencia a que la iluminancia varía según la ubicación sobre la superficie de trabajo.

$$E_T(t, x, y) = E_A(t, x, y) + E_D(t, x, y) \quad (2.3)$$

En condición de ocupación, la iluminancia total en un punto  $p(x, y)$  para un instante de tiempo  $t$ ,  $e_T(p, t)$ , debe ser igual o superior a un valor de iluminancia mínimo  $e_{min}$ , tal como expresa (2.4). El RETILAP define  $e_{min}$  según el tipo de recinto. En caso de no existir ocupación,  $e_A(p, t)$  es igual a 0, y por ende  $e_T(p, t)$  es igual a  $e_D(p, t)$ .

$$e_T(p, t) = e_A(p, t) + e_D(p, t) \geq e_{min} \quad (2.4)$$

La expresión (2.5) indica cómo calcular el valor de  $e_A(p, t)$ , donde  $N_{gc}$  es el número total de grupos de control;  $a_{p(k,p)}$  es la iluminancia máxima que aporta la luminaria  $k$  sobre el punto  $p$ ;  $OO_{gi}(t)$  es el estado de operación de las luminarias del grupo de control  $gi$  en el instante  $t$ , que puede ser 1 (encendido) o 0 (apagado);  $\varphi_{gi}(t)$  es el nivel de flujo luminoso de las luminarias del grupo de control  $gi$  en el instante  $t$ , puede ser 0 (0%) o 1 (100%) para luminarias On/Off, o variar entre un valor mínimo (0.06 (6%) o 0.10 (10%)) y 1 (100%) para luminarias dimerizables;  $z(gi, k)$  es un factor que indica la pertenencia de la luminaria  $k$  al grupo de control  $gi$ , por lo que puede tomar un valor de 0 o 1.

$$e_A(p, t) = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} a_p(k) \cdot OO_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t) \cdot z(gi, k) \quad (2.5)$$

La energía consumida por el SIH,  $CE_{SIH}$ , se define como muestra (2.6), donde  $P_{SIH}(t)$  es la potencia demandada por las luminarias del SIH en el instante  $t$ ,  $P_{aux\_SIH}$  es la carga instalada permanente debida a los componentes auxiliares de control<sup>20</sup> del SIH,  $Nt$  es el número total de periodos de tiempo ( $\Delta t$ ) a evaluar para el cálculo del consumo de energía.

$$\begin{aligned} CE_{SIH} &= \int_{t_1}^{t_2} P_{cons}(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} (P_{SIH}(t) + P_{aux\_SIH}) \cdot dt \quad (kWh) \\ &= \sum_{ti=1}^{Nt} (P_{SIH_{ti}}(t) + P_{aux\_SIH}) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2.6)$$

Los valores  $P_{aux\_SIH}$  suelen ser muy bajos en comparación a las potencias de las luminarias, por lo que podrían ser despreciados; sin embargo, sus consumos de energía podrían ser no despreciables debido a que operan de manera permanente (24 horas/día – 365 días/año – 8 760 horas/año).

Dado que los componentes utilizados (sensores de ocupación y fotoceldas) están orientados por diseño a reducir el consumo de energía, se plantea la determinación de las condiciones de operación del SIH a partir de la formulación y solución de un problema de optimización (minimización) no lineal entero mixto<sup>21</sup>, donde la potencia consumida por las luminarias del SIH,  $P_{SIH}(t)$ , es la función objetivo a ser minimizada expresada por (2.7), en la que  $P_{lum}$  es la potencia consumida por las luminarias del grupo de control  $gi$  y es función del  $\varphi$ . Las restricciones asociadas a este problema de optimización se presentan en el Capítulo 5.

$$\min P_{SHI} = \min \sum_{gi=1}^{Ngc} \sum_{k=1}^{NK} Plum(\varphi_{gi}(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \quad (2.7)$$

<sup>20</sup> Los componentes auxiliares de control pueden ser *power packs* (para alimentación de fotoceldas y sensores de ocupación) y controladores.

<sup>21</sup> En inglés MINLP: *Mixed integer nonlinear programming*.

La solución del problema genera los valores de la potencia consumida,  $P_{SIH}(t)$ ,  $00_{gi}(t)$  (estado de operación de las luminarias) y  $\varphi_i(t)$  (porcentaje de flujo luminoso de operación) de las luminarias por grupo de control para un instante de tiempo  $t$ , por lo que el número total de variables del problema es igual a  $2 \cdot N_{gc}$ . Para el propósito de este estudio solo se hace uso del valor de la potencia consumida.

## **2.5. CUANTIFICACIÓN DE LAS CANTIDADES MÍNIMAS DE LOS COMPONENTES REQUERIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CADA ALTERNATIVA DE CONTROL**

La inversión inicial para la implementación de una alternativa de control de un SIH corresponde al costo de adquisición, instalación y adecuación eléctrica de la cantidad de componentes requeridos,  $N_{rq}$  de control, auxiliares y luminarias para cada alternativa de control a analizar, considerando cualquiera de los siguientes dos casos: i) Un sistema eléctrico de iluminación existente según RETILAP o un SIH existente que se desee modernizar o mejorar. ii) Un SIH nuevo a ser implementado. Donde cada uno de estos casos demandará la adquisición de una cantidad diferente de componentes. Para determinar dicha cantidad, inicialmente se establece el número de componentes requeridos,  $N_{rq}$  para una alternativa específica sin importar si hay o no componentes existentes. Posteriormente, para el caso i, se procede a identificar la cantidad de componentes que podrían ser reutilizados,  $N_{ru}$ , y a partir de esta información se determina la cantidad de componentes nuevos o adicionales,  $\Delta N$  necesarios para la implementación de la alternativa de control. Para el caso ii se tiene que las cantidades requeridas serán las mismas cantidades de componentes nuevos,  $N_{rq} = \Delta N$ .

## **2.6. DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN DE COSTO FINANCIERO TOTAL POR ALTERNATIVA**

Para este trabajo se estableció que el costo financiero total es el valor presente neto de la alternativa expresado por (2.8), ya que el VPN es un índice financiero que

permite evaluar alternativas de inversión o de costo con base en el comportamiento de los flujos financieros,  $CF_t$  para un horizonte de tiempo determinado,  $HT$  a una tasa de interés determinada,  $i$ .  $CF_t$  se define como la diferencia entre el flujo entrante o ganancia ( $Cin_t$ ) y el flujo saliente o costo o gasto ( $Cout_t$ ), tal como muestra (2.9)

$$VPN(i, HT) = \sum_{t=0}^{HT} \frac{CF_t}{(1+i)^t} = -Cinv + \sum_{t=1}^{HT} \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (2.8)$$

$$CF_t = Cin_t - Cout_t \quad (2.9)$$

Dado que una alternativa de control no produce ganancias, solo se consideran flujos salientes. Para  $t = 0$ ,  $CF_0$  (flujo negativo) es igual a la inversión ( $Cinv$ ) o el costo de la implementación de la alternativa de control del SIH analizado; mientras que para  $t \geq 1$ ,  $CF_t$  (flujo negativo) es igual a la suma de los costos de operación ( $Cop_t$ ) y los costos de mantenimiento del SIH ( $Cmn_t$ ), así:  $CF_t = -(Cop_t + Cmn_t)$ .

$Cop_t$  es igual al costo del consumo energético anual ( $C_{eac}$ ) debida a la alternativa de control del SIH analizada, que se calcula como indica (2.10), donde  $C_{kWh}$  es el costo de la unidad de energía que se ha considerado en \$450/kWh<sup>22</sup>,  $P_{cons}(t)$  es la potencia consumida en el instante  $t$  por la alternativa de control y  $EAC_{ac}$  es el consumo energético estimado anual de la alternativa de control del SIH.

$$Cop(t) = C_{eac} = C_{kWh} \cdot \int_{t1}^{t2} P_{cons}(t) \cdot dt = C_{kWh} \cdot EAC_{ac} \quad (2.10)$$

$Cmn_t$  se basa en el cambio de los componentes al final de su vida útil. La vida útil de los componentes de un sistema determina los instantes de tiempo (años) en los

---

<sup>22</sup> Valor del kWh cobrado a la Universidad Industrial de Santander promedio durante enero y diciembre de 2017.

cuales deben ser realizados cambios de los mismos; tales cambios se consideran costos de mantenimiento que se incluyen en el flujo de caja del proyecto.

## 2.7. ESTIMACIÓN DEL COSTO FINANCIERO TOTAL DE CADA ALTERNATIVA DE CONTROL Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE MENOR COSTO FINANCIERO TOTAL

En MATLAB fue desarrollado un script<sup>23</sup> basado en el enfoque de búsqueda exhaustiva, para estimar el costo financiero total ( $VPN$ ) de cada una de las alternativas de control posibles de SIH y seleccionar la del  $VPN$  más atractivo financieramente para el usuario. La aplicación de este script genera como resultados la configuración de la alternativa de control (grupos de control + estrategia de control), consumo energético anual promedio de las luminarias de los grupos de control,  $EAC_{prom}$ , el consumo energético anual de los componentes de control auxiliares,  $EAC_{aux}$ , consumo energético anual total del SIH,  $EAC_{ac}$  y el  $VPN$  de cada una de las alternativas de control analizadas. A partir de estos resultados, el *script* selecciona el  $VPN$  más atractivo y lo muestra junto con la alternativa de control correspondiente y la cantidad de componentes requeridos que la conforman.

Este cálculo fue desarrollado para los dos casos de estudio, sala de reuniones y Aula IE-305.

## 2.8. CONSTRUCCIÓN DEL INFORME DE DISEÑO DEL SIH SELECCIONADO

Una vez seleccionada la alternativa, se procedió a construir un reporte técnico que consta de: (i) un esquema del SIH seleccionado, (ii) las cantidades y especificaciones mínimas de los dispositivos del SIH, (iii) el presupuesto para la implementación del SIH, y (iv) un análisis energético del SIH.

---

<sup>23</sup> La ejecución del script desarrollado requiere que MATLAB tenga instalado Financial Toolbox.

# 3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

---

Este capítulo describe la experimentación llevada a cabo para caracterizar<sup>24</sup> el comportamiento lumínico (iluminación natural, iluminación eléctrica e híbrida) sobre la superficie de trabajo de dos espacios interiores (denominados casos de estudio), a partir de lo cual se obtuvo el modelo experimental y generalizado de iluminancia total interior de los recintos (descritos en los Capítulos 4 y 5, respectivamente), teniendo en cuenta sus características físicas (dimensiones, fuentes de luz natural y su orientación y el sistema de iluminación eléctrico existente). Por tanto, este capítulo trata sobre la caracterización de los SIH en operación del aula IE305 y la Sala de reuniones del área administrativa (piso 5).

La Figura 6 bosqueja el proceso de caracterización lumínica que permitió la obtención de los modelos experimentales y generalizados de comportamiento lumínico para los casos de estudio.

Esta caracterización consta de tres etapas: medición de iluminancia natural, medición de iluminancia artificial y obtención de las curvas de iluminancia de las luminarias. Estas etapas pueden ser desarrolladas de forma simultánea.

---

<sup>24</sup> Caracterizar. Consiste en describir el comportamiento de iluminación natural y/o artificial sobre un mallado de puntos que representa la superficie de trabajo del recinto (a una altura de 0,75m), considerando las características del sistema de iluminación artificial, las fuentes de luz natural y las dimensiones del espacio

La *primera etapa* consiste en la medición de la iluminancia natural interior sobre la superficie de trabajo,  $E_{D\_med_{nxm}}(t)$ , y la iluminancia natural exterior incidente en ventanas,  $E_{E\_med}(t)$ , para determinar la matriz del *daylight factor* promedio característica de cada espacio ( $DF_{prom_{nxm}}(\%)$ ), a partir de la cual se puede estimar la matriz de distribución de la iluminancia natural interior,  $E_{D\_est_{nxm}}(t)$ .

Figura 6. Esquema descriptivo general del proceso de caracterización lumínica de los espacios para la obtención de los modelos experimentales y generalizados del comportamiento lumínico.

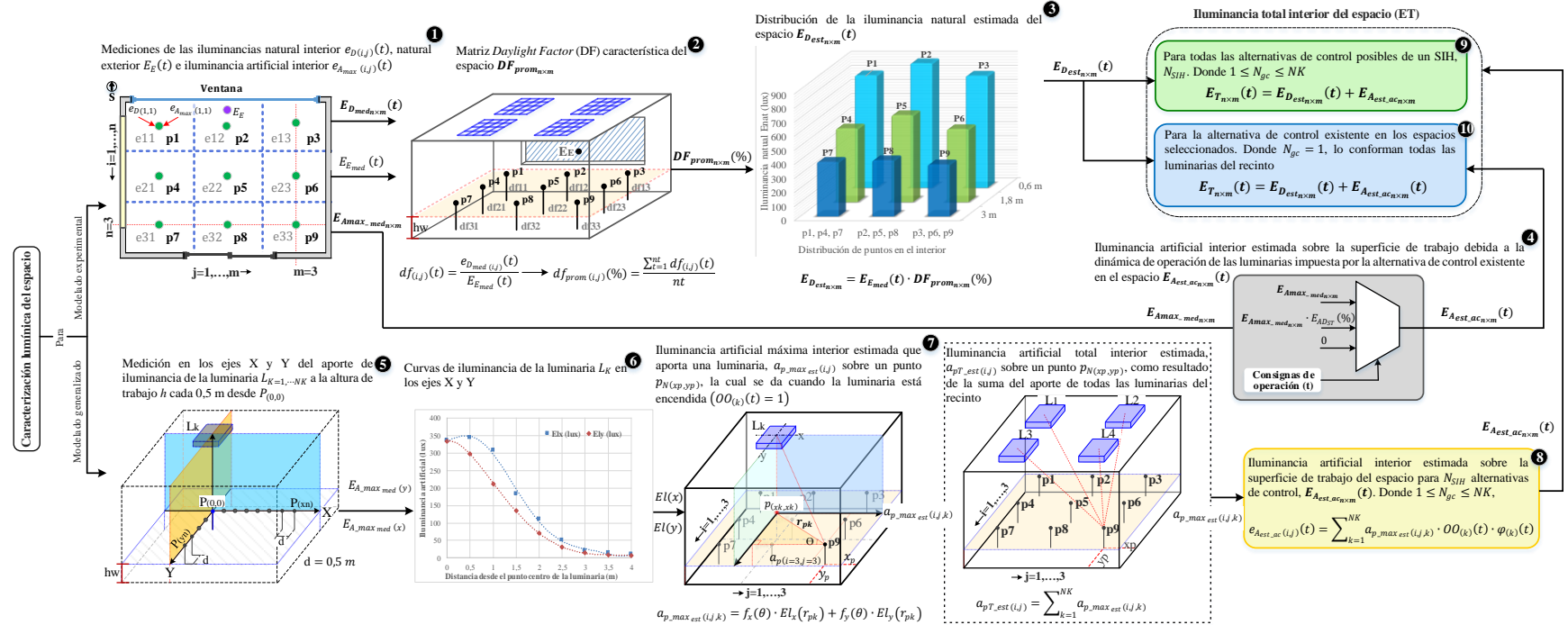
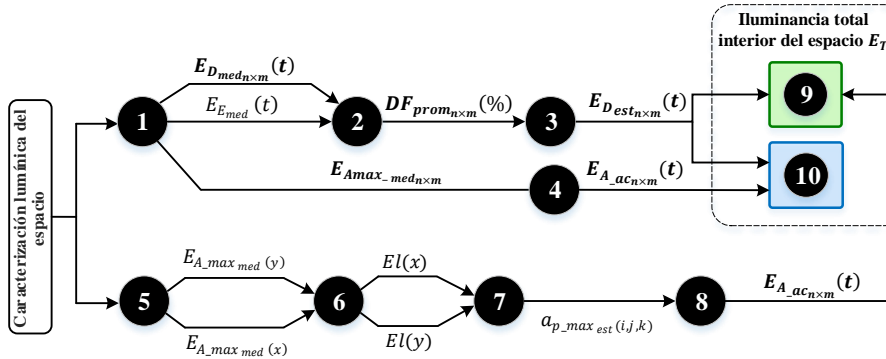


Figura 7. Diagrama resumen de la Figura 6.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Cuadro de convenciones de la Figura 6.

hw=Altura del plano de trabajo (0,75 m) n=número de filas m=número de columnas  
 $r_{pk}$ =Distancia horizontal entre el punto  $p_N(x_k, y_k)$  (posición de la luminaria  $L_k$  proyectada en el plano de trabajo) y el punto  $p_N(x_p, y_p)$  (posición del punto del malla de la superficie de trabajo para la evaluación de la iluminancia interior,  $N = 1, \dots, n \times m$ )  
 $\theta$ =Ángulo formado por  $r_{pk}$   
 $NK$ =Número de luminarias del recinto  $N_{gc} = 1, \dots, NK$ , Número de grupos de control del recinto  
 $N_{SIH}$ =Número de alternativas de control posibles de un SIH  
 $f_x(\theta)$  y  $f_y(\theta)$ =Pesos de la participación de la iluminancia artificial de la luminaria  $L_k$  en los ejes X y Y  
 $OO_{(k)}(t)$ =Estado de operación de las luminarias en el instante de tiempo  $t$  según la alternativa de control del SIH, cuyo valor es 0 (apagado) o 1 (encendido).  
 $\varphi_{(k)}(t)$ =Porcentaje de flujo luminoso de operación de las luminarias en el instante de tiempo  $t$   
 $E_{AD_{ST}}(t)(\%)$ =Porcentaje de dimerización de las luminarias para cada instante de tiempo  $t$   
 $nt$ =Número de periodos de tiempo  
 NOTA: Las siguientes matrices tiene un tamaño  $n \times m$ :  $E_{D_{med_{n \times m}}}(t)$ ,  $E_{Amax_{med_{n \times m}}}$ ,  $DF_{prom_{n \times m}}(\%)$ ,  $E_{D_{est_{n \times m}}}(t)$ ,  $E_{A_{ac_{n \times m}}}(t)$ ,  $E_{T_{n \times m}}(t)$

La segunda etapa consiste en la medición de la iluminancia artificial máxima interior sobre la superficie de trabajo,  $E_{A_{med}_{n \times m}}$ , con el fin de obtener la iluminancia artificial aportada por todas las luminarias, dado que éstas conforman un sólo grupo de control ( $N_{gc} = 1$ ) debido a que las luminarias de cada recinto en estudio están agrupadas en un solo grupo de control (condición de operación real de los SIH).

A partir de  $E_{A_{med}_{n \times m}}$  y las consignas de operación de las luminarias, es estimada la iluminancia artificial según la alternativa de control,  $E_{A_{est_{ac}_{n \times m}}}(t)$  (existente en cada espacio seleccionado) que en conjunto con la distribución de la iluminancia natural interior estimada  $E_{D_{est}_{n \times m}}(t)$ , definen el modelo experimental de iluminancia total interior del espacio  $E_{T_{n \times m}}(t)$ , propuesto en el paso número 10 de la Figura 6.

La *tercera etapa* se enfoca en determinar las curvas de iluminancia artificial de las luminarias sobre los ejes X y Y a ser utilizadas en el modelado generalizado. Para tal fin, fueron tomadas mediciones de iluminancia artificial de una luminaria por cada caso de estudio. Con base en estas curvas, se puede estimar la contribución de la iluminancia artificial máxima de una luminaria  $a_{p_{max_{est}(i,j)}}$  sobre un punto  $p_{N(xp,yp)}$  del mallado de la superficie de trabajo.

Luego, cada elemento de la matriz de iluminancia artificial según la alternativa de control del espacio,  $E_{A_{est_{ac}_{n \times m}}}(t)$  establecida para  $N_{gc}$  ( $1 \leq N_{gc} \leq NK$ ) grupos de control, es definido en el paso número 8 de la Figura 6, como la sumatoria de las contribuciones de iluminancias  $a_{p_{max_{est}(i,j)}}$  de todas las luminarias sobre cada punto  $p_{N(xp,yp)}$ , teniendo en cuenta el estado de operación de las luminarias  $OO_{(k)}(t)$  de cada grupo de control en el recinto y el porcentaje de flujo luminoso de operación  $\varphi_{(k)}(t)$ . Finalmente, en el paso número 9 de la Figura 6 es formulado el modelo generalizado de iluminancia total interior del espacio  $E_{T_{n \times m}}(t)$  para  $N_{SIH}$  alternativas de control posibles de un SIH.

Es importante mencionar que se validaron los modelos experimentales de iluminancia total interior de los SIH existentes en los dos recintos (Sala de Reuniones y aula

IE305) para superficies de 9 y 18 puntos, respectivamente. Asimismo, se indica que el modelado de iluminancia total interior de los SIH alternativos se basó en superficies de 18 y 28 puntos, respectivamente, con el fin de considerar alternativas de control con más de un grupo de control.

La descripción de esta experimentación parte con la exposición de los casos de estudio; seguidamente se muestra el método de medición establecido. Posteriormente, se presenta el procedimiento de medición de las iluminancias natural y artificial empleado. Finalmente, el presente capítulo finaliza con la descripción de las curvas de potencia de la luminaria dimerizable a ser consideradas en los capítulos 4 y 5.

### 3.1. CASOS DE ESTUDIO

El modelado de comportamiento lumínico y de consumo de energía es establecido para dos casos de estudio de sistemas de iluminación híbrida, el Aula IE 305 (piso 3) y la Sala de Reuniones del área administrativa (piso 5), que son espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander.

#### Edificio de Ingeniería Eléctrica

La Figura 8 muestra el Edificio de Ingeniería Eléctrica, ubicado en la ciudad de Bucaramanga ( $7,13^\circ$  latitud norte y  $73,13^\circ$  longitud oeste), cuyo clima es cálido con un comportamiento de la irradiación solar cuasi-estable durante el año [86].

Figura 8. Edificio de Ingeniería Eléctrica.



Fuente: [86].

La estructura del edificio en su eje más largo se encuentra alineado en sentido este-oeste, lo cual favorece significativamente el aprovechamiento de la luz natural. Sus cinco plantas constituyen un área de 2 700 m<sup>2</sup>, distribuida entre oficinas, aulas de clase y zonas de estudio [86].

Esta edificación cuenta con aplicaciones URE<sup>25</sup>, entre las cuales se destaca la iluminación híbrida, compuesta por la combinación de iluminación eléctrica fluorescente e iluminación natural a partir de fuentes laterales (ventanas) en las fachadas norte y sur y fuentes cenitales (tubos solares) en las terrazas del piso quinto y cuarto, y sistemas de control y automatización de iluminación.


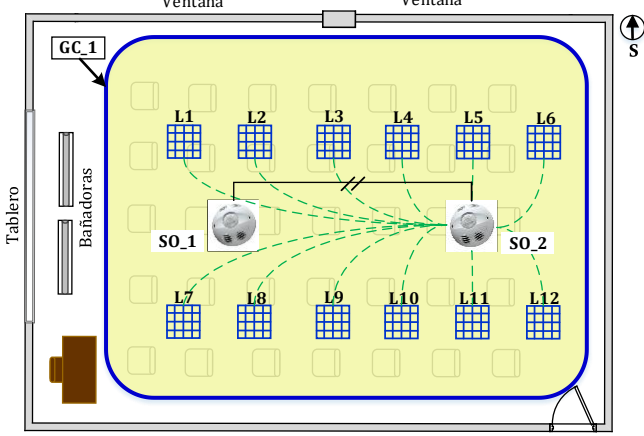
- **Aula IE 305**

El primer caso de estudio es el aula IE305 localizada en el piso 3, con un área de 78,54 m<sup>2</sup> (11,9 m x 6,6 m) y una altura piso techo de aproximadamente 2,40 m. Este espacio cuenta con un SIH que consiste de 12 luminarias fluorescentes (4 lámparas o tubos por luminaria), dos ventanas en la fachada sur y una alternativa de control de iluminación de tipo automático *stand-alone*, el cual enciende las luminarias al 100% de su intensidad luminosa siempre y cuando se detecte ocupación y el nivel de iluminación natural sea inferior al mínimo requerido. Éstas se apagarán después de un tiempo programado, únicamente cuando ya no detecte ocupación. La Tabla 9 presenta la ficha descriptiva del SIH del aula IE 305.

---

<sup>25</sup> Aplicaciones URE (Uso racional de la energía): “Es todo aquel sistema a ser implementado en la edificación que contribuye a satisfacer necesidades de confort visual, confort térmico y suministro de energía, y tiene por objeto disminuir el consumo de energía de las redes de energía” [18].

Tabla 9. Ficha descriptiva caso de estudio – Aula IE 305.

Caso de estudio	Componentes del SIH
 <p data-bbox="407 699 688 730">Figura 9. Aula IE – 305.</p>	 <p data-bbox="857 730 1409 762">Figura 10. Esquema del SIH del aula IE – 305.</p>

Alternativa de control de iluminación		Iluminación eléctrica	Iluminación natural				
Grupos de control	Estrategia de control (aprovechamiento de la luz natural y ocupación)						
Un grupo de control <sup>26</sup> (GC_1). Compuesto por 12 luminarias (ver Figura 10).	<table border="1"> <tr> <th data-bbox="480 892 678 942">Técnica de control</th> <th data-bbox="685 892 948 942">Componentes de control</th> </tr> <tr> <td data-bbox="480 951 678 1071"> <i>Conmutación On/Off</i> (Flujo luminoso: 0% o 100%)                     </td> <td data-bbox="685 951 948 1071"> <i>so<sub>fi</sub> *</i>: 2 (SO_1 y SO_2). Marca LEVITON, modelo OSC10-M0W                     </td> </tr> </table>	Técnica de control	Componentes de control	<i>Conmutación On/Off</i> (Flujo luminoso: 0% o 100%)	<i>so<sub>fi</sub> *</i> : 2 (SO_1 y SO_2). Marca LEVITON, modelo OSC10-M0W	Doce luminarias de techo fluorescentes cuadradas (60cm x 60cm) de 68 W (4 tubos T5 de 14W y 2 balastos electrónicos de 6 W)	Dos ventanas en la fachada sur de 1,5 m x 5,5 m.
Técnica de control	Componentes de control						
<i>Conmutación On/Off</i> (Flujo luminoso: 0% o 100%)	<i>so<sub>fi</sub> *</i> : 2 (SO_1 y SO_2). Marca LEVITON, modelo OSC10-M0W						

\* *so<sub>fi</sub>*: Sensor de ocupación con fotocelda incluida para el censado de luz natural

Fuente: Elaboración propia


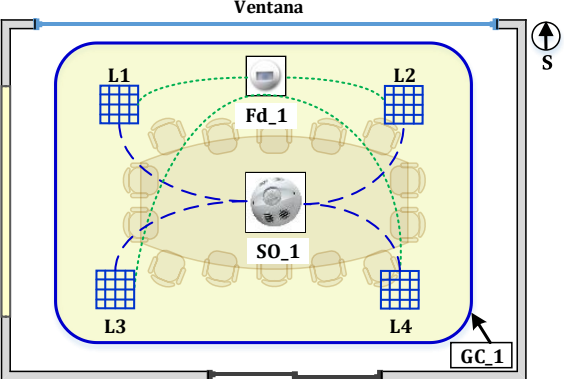
• **Sala de reuniones**

El segundo espacio es una sala de reuniones ubicada en el piso 5, con un área de 21,6 m<sup>2</sup> (6,0 m x 3,6 m) y una altura piso techo de aproximadamente 2,5 m. El SIH implementado en este espacio está compuesto por 4 luminarias fluorescentes dimerizables (4 lámparas o tubos por luminaria), una ventana en la fachada sur y una

<sup>26</sup> Grupo de control (GC): Es una parte del sistema de iluminación operado separadamente por medio de un interruptor o una técnica de control, ya sea On/Off o dimerización. Un GC puede estar conformado mínimo por una lámpara (en cuyo caso habrán más de un grupo de control) y máximo por todas las luminarias de un recinto (en cuyo caso solo habrá un grupo de control) [20].

alternativa de control de iluminación que opera integrada al sistema de automatización *Andover Continuum*<sup>27</sup> del Edificio. Su funcionamiento consiste en dimerizar las lámparas entre un 10 % - 100 % de su intensidad luminosa en función de la ocupación y la disponibilidad de luz natural y, si pasado un tiempo no se detecta ocupación, las luminarias son apagadas. La Tabla 10 presenta la ficha descriptiva del SIH de la sala de reuniones.

Tabla 10. Ficha descriptiva caso de estudio – Sala de reuniones.

Caso de Estudio	Componentes del SIH
 <p data-bbox="418 1066 769 1094">Figura 11. Sala de reuniones.</p>	 <p data-bbox="938 1056 1435 1113">Figura 12. Esquema del SIH de la sala de reuniones.</p>

Alternativa de control		Iluminación eléctrica	Iluminación natural				
Grupos de control	Estrategia de control (aprovechamiento de la luz natural y ocupación)						
Un grupo de control (GC_1) compuesto por 4 luminarias (ver Figura 12).	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="464 1230 667 1287">Técnica de control</th> <th data-bbox="667 1230 971 1287">Componentes de control</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="464 1287 667 1516"><i>Dimerización</i> (Flujo luminoso: De 10 % a 100%)</td> <td data-bbox="667 1287 971 1516">                     *so: 1 (SO_1). Marca LE-VITON, modelo OSC10-M0W                      f<sub>d</sub>: 1 (Fd_1). Marca Watt-Stopper, modelo LS-301                      U<sub>C</sub>: 1. Marca <i>Schneider Electric</i>, serie <i>Andover Continuum Infinet II i2920</i> </td> </tr> </tbody> </table>	Técnica de control	Componentes de control	<i>Dimerización</i> (Flujo luminoso: De 10 % a 100%)	*so: 1 (SO_1). Marca LE-VITON, modelo OSC10-M0W f <sub>d</sub> : 1 (Fd_1). Marca Watt-Stopper, modelo LS-301 U <sub>C</sub> : 1. Marca <i>Schneider Electric</i> , serie <i>Andover Continuum Infinet II i2920</i>	Cuatro luminarias de techo fluorescentes cuadradas (60 cm x 60 cm) de 80 W (4 tubos T8 de 17 W y 2 balastos electrónicos dimerizables de 6 W).	Ventanal en la fachada sur de 3 m x 5,5 m
Técnica de control	Componentes de control						
<i>Dimerización</i> (Flujo luminoso: De 10 % a 100%)	*so: 1 (SO_1). Marca LE-VITON, modelo OSC10-M0W f <sub>d</sub> : 1 (Fd_1). Marca Watt-Stopper, modelo LS-301 U <sub>C</sub> : 1. Marca <i>Schneider Electric</i> , serie <i>Andover Continuum Infinet II i2920</i>						

\*so: Sensor de ocupación f<sub>d</sub>=fotocelda dimerizable para censado de la luz natural y artificial U<sub>C</sub>: Unidad de control

Fuente: Elaboración propia

<sup>27</sup> *Andover Continuum*: Es un sistema de automatización y supervisión de edificios de la marca *Schneider Electric* basado en protocolo BACnet. Este sistema integra video-vigilancia, control de accesos, control de climatización y control de iluminación [95].

## Selección de los casos de estudios

La selección de los espacios tomados como casos de estudio se basa en los siguientes lineamientos:

- *Área máxima del espacio (dimensiones)*: Para el desarrollo de la experimentación se consideró un área máxima de 100 m<sup>2</sup> para la selección de los espacios. Esto debido a que para un área mayor, el número de puntos del mallado de medición incrementa, lo cual implica el uso de más recursos en cuanto a equipo de medición, personal y tiempo para la recolección de los datos. Adicionalmente, la mayoría de espacio de una edificación universitaria no supera esta área.
- *Fuentes de luz natural laterales (ventanas) y su orientación*. Con el fin de conocer el efecto del aprovechamiento de la luz natural sobre el uso de la iluminación eléctrica, se buscó que los espacios seleccionados recibieran una cantidad significativa de luz natural. Motivo por el cual fueron escogidas las ventanas de la fachada sur, en razón a que la orientación este - oeste del eje más alargado del Edificio se encuentra en consonancia con la trayectoria del movimiento del sol, lo cual favorece una mayor penetración de luz natural en esta fachada durante el año.
- *Forma regular del espacio (cuadrada o rectangular)*: Dado que el método de medición de iluminación se basa en un mallado construido con los centros de pequeñas celdas, el espacio más adecuado para tal propósito es aquel que tuviese forma cuadrada o rectangular (ver Figura 10).
- *Nivel de automatización y control diferentes*: Se seleccionaron aquellos espacios que incluyesen distintas alternativas de control (Sección 3.1.1), con el fin de obtener los modelos base del comportamiento lumínico y energético de diferentes SIH, y estudiar el impacto de éstos sobre el uso de la iluminación eléctrica.

- *Altura de la superficie de trabajo (0,75m)*: Para la medición de la iluminancia interior natural y artificial sobre el plano de trabajo, se buscó que su altura fuese de 0,75 m por encima del suelo, siguiendo las indicaciones dadas en el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP) para aulas de clase y oficinas [87].
- *Diferente uso del espacio (oficina y aula de clase)*: Con el fin de estudiar la influencia de las características distintivas de dos espacios interiores según su uso, sobre el dimensionamiento de la alternativa de control del SIH, se seleccionó una oficina de altura piso techo (sala de reuniones) y un aula de clase. Tales espacios difieren en:
  - *Patrón de ocupación*: Es un factor a tener en cuenta para el cálculo de las horas de operación del SIH.
  - *Zona útil de trabajo*: En un aula de clase la zona útil de trabajo es aproximadamente toda el área del espacio interior donde pueda ser ubicado un pupitre o el escritorio del profesor. Por el contrario, en una oficina, el área de trabajo se limita a las zonas donde son ubicados los escritorios o mesas para el desarrollo de tareas de escritura, lectura, etc., que por lo general son posiciones fijas. Esta característica es importante para determinar la posición del punto de menor iluminación (punto crítico), para el cual se debe garantizar que se cumpla el nivel de iluminación mínimo requerido según la normatividad.
  - *Potencia instalada*: Hace referencia a la potencia nominal de los elementos del SIH que requieren alimentación eléctrica para funcionar y que según el uso del espacio puede ser de menor o mayor magnitud.

## 3.2. MÉTODO DE MEDICIÓN UTILIZADO

De acuerdo con las tres etapas de caracterización lumínica de los casos de estudio descritas en la introducción de este capítulo, fueron utilizados dos métodos de medición para la toma de lecturas de iluminancia tanto natural como artificial a partir de

luxómetros, los cuales son: (i) Método de medición para la caracterización lumínica de la superficie de trabajo y (ii) Método de medición para la caracterización de la luminaria. Dichos métodos se describen a continuación:

### **Método de medición para la caracterización lumínica de la superficie de trabajo**

Este método es usado en las etapas uno y dos; está basado en un mallado de puntos de medición que representa la superficie de trabajo del recinto (a una altura  $h_w$  de 0,75 m sobre el suelo), y puede ser implementado a partir de dos alternativas, las cuales dependen del número de grupos de control a analizar para la caracterización de la iluminancia artificial interior. Estas alternativas también pueden ser aplicadas para la caracterización de la iluminancia natural interior.

- **Alternativa No. 1 (propuesta)**

Las lecturas de iluminancia artificial interior para un solo GC, compuesto por todas las luminarias del recinto, fueron tomadas de acuerdo a un mallado de puntos de medición a la altura de la superficie de trabajo ( $h_w=0,75m$ ) cuya configuración es  $n \times m$ . Los puntos del mallado corresponden a los puntos medios de las celdas en las cuales fue dividida el área del piso del recinto.

Estas celdas son rectangulares con un área  $A_z$  igual a  $A_T/Np$ , donde  $A_T$  es el área del piso del recinto y  $Np$  es el número de puntos igual a  $n \times m$ , y dimensiones  $w/n$  y  $l/m$ , donde  $w$  y  $l$  indican la profundidad y la longitud del cuarto, respectivamente. Los valores de  $n$  y  $m$  indican la división del recinto a lo ancho y a lo largo, respectivamente;  $n$  debe ser mayor al número de luminarias instaladas a lo ancho,  $N_w$ , y  $m$  debe mayor o igual al número de luminarias instaladas a lo largo,  $N_l$ , para un recinto con un total de  $NK$  luminarias.

La

Tabla 11 presenta los cálculos realizados para hallar el número de puntos de medición y celdas para los dos casos de estudio. La Fuente: Elaboración propia

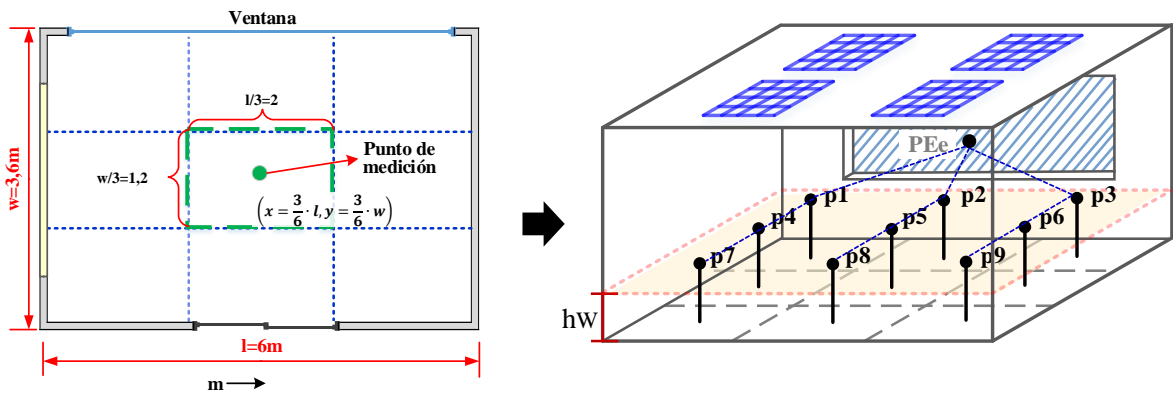
Figura 13 muestra el bosquejo del mallado de medición para la Sala de reuniones.

Tabla 11. Cálculos para hallar el número de puntos de medición mallado a partir de la alternativa No.1 para los dos casos de estudio.

Caso de estudio	Dimensiones del cuarto	$A_T$	$N_W$	$N_L$	$n$	$m$	Número de puntos $N_p$	$A_z$	Dimensiones de la celda
Sala de reuniones	$l = 6\text{m}$ $w = 3,6\text{m}$	$21,6\text{m}^2$	2	2	3	3	9	$2,4\text{m}^2$	$l/m = 2\text{m}$ $w/n = 1,2\text{m}$
Aula IE 305	$l = 11,9\text{m}$ $w = 6,6\text{m}$	$78,54\text{m}^2$	2	6	3	6	18	$3,96\text{m}^2$	$l/m = 1,98\text{m}$ $w/n = 2,2\text{m}$

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Obtención del mallado de medición a partir de la alternativa No. 1 - Sala de reuniones.



a. Construcción del mallado  $n=3$  y  $m=3$

b. Ubicación de luxómetros

Fuente: Elaboración propia

• **Alternativa No. 2 (según la revisión de la literatura)**

La búsqueda de la alternativa de control de iluminación de menor costo financiero lleva a explorar más de un grupo de control, inclusive hasta un número de grupos de control igual al número de luminarias existentes en el recinto. Esto implica una mayor zonificación de la superficie de trabajo, y en consecuencia, un estudio más exacto de lo que sucede en ésta. En ese sentido, se considera conveniente incrementar el número de puntos de medición (muestras) para lograr un mallado más

fino que pueda describir con mayor nivel de exactitud el comportamiento de la iluminación artificial y natural sobre la superficie de trabajo.

El número de puntos del mallado es determinado a partir de la ecuación (3.1) que permite calcular el número mínimo de puntos de medición  $PM_{min}$  con base en el *Room Index RI* (relación entre el área del cuarto y la altura de montaje de las luminarias) definido por la ecuación (3.2) [13], [60], [66], [88].

$$PM_{min} = (RI' + 2)^2 \quad (3.1)$$

$RI'$  es el siguiente número entero de  $RI$ , que se calcula como muestra la ecuación (3.2); donde  $l$  y  $w$  se refiere a las dimensiones del cuarto y  $h$  es la distancia vertical entre el punto centro de la luminaria y el plano de trabajo.

$$RI = \frac{l \times w}{h \times (l + w)} \quad (3.2)$$

Los puntos de medición (en los cuales fue puesto el luxómetro) son ubicados en el centro de pequeñas celdas de igual tamaño, que resultan de dividir las dimensiones del piso del cuarto (ancho y largo) en los factores  $n$  y  $m$ .

Los valores de  $n$  y  $m$  para la alternativa 2 son seleccionados de acuerdo a dos criterios: (i) que  $n \times m$  sea igual o superior a  $PM_{min}$  y (ii) que las celdas sean aproximadamente cuadradas, para lo cual se debe cumplir que el ancho ( $w/n$ ) y largo ( $l/m$ ) sean similares. En algunos casos se debe tomar un valor mayor a  $PM_{min}$  dado que no satisface la condición antes descrita, razón por la cual es necesario aumentar el número de puntos y por consiguiente cambiar los factores  $n$  y  $m$  [13], [88], [74].

La Tabla 12 presenta los cálculos realizados para hallar el número de puntos de medición y celdas para los dos casos de estudio. La Figura 14 muestra el bosquejo del mallado de medición para la sala de reuniones.

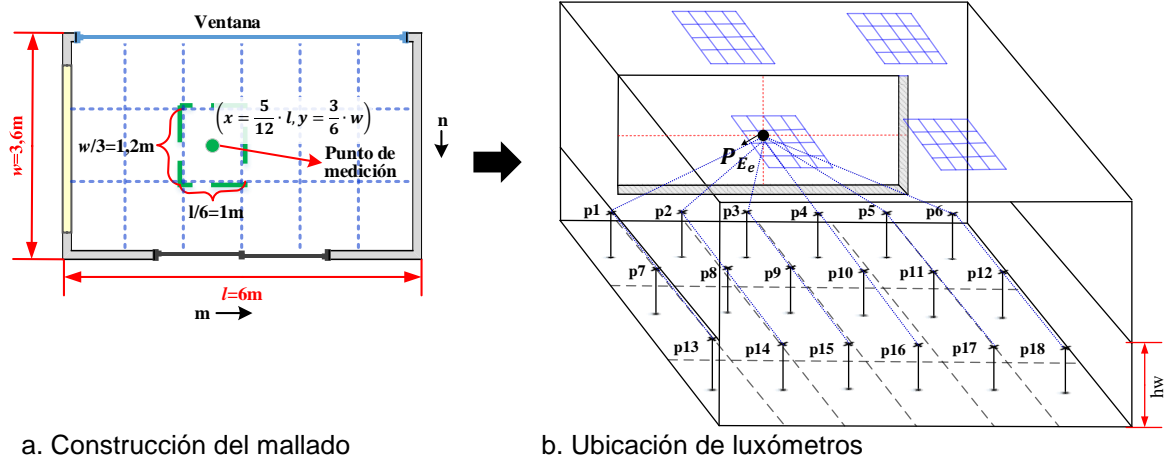
Tabla 12. Cálculos para hallar el número de puntos de medición y celdas del mallado a partir de la alternativa No.2 para los dos casos de estudio

Caso de estudio	Dims. del cuarto	Distancia vertical h	RI	RI'	PM <sub>min</sub>	Dims. de celda s/n PM <sub>min</sub>	PM <sub>req</sub> *	Dimensiones de la celda s/n PM <sub>req</sub>
Sala de reuniones	l= 6m w= 3,6m	h= 1,75m (2,5-0,75)	1,28	2	16	l/4= 1,5m w/4= 0,9m Factores: n=4; m=4	18	l/6= 1m w/3= 1,2 m Factores: n=3; m=6
Aula IE 305	l= 11,9m w= 6,6m	h= 1,75m (2,6-0,75-0,1)	2,42	3	25	l/5= 2,38m w/5= 1,32m Factores: n=5; m=5	28	l/7= 1,7m w/4= 1,65 m Factores: n=4; m=7

Fuente: Elaboración propia

PM<sub>req</sub>\*= Número de puntos de medición requeridos

Figura 14. Obtención del mallado de medición a partir de la alternativa No. 2 - sala de reuniones



a. Construcción del mallado  
Fuente: Elaboración propia

b. Ubicación de luxómetros

Con respecto a las dos alternativas de medición expuestas, se aclara que cuando se utilizó la alternativa No. 1 con menos puntos de medición en comparación con la alternativa No. 2, se logró describir de manera satisfactoria el comportamiento lumínico sobre la superficie de trabajo de acuerdo con los resultados del proceso de validación, los cuales son presentados en el Capítulo 4. El aumento del número de puntos a partir de la alternativa No. 2 no indica que la alternativa No. 1 no sea satisfactoria, sino que un mayor número de puntos permite obtener un mayor nivel de exactitud para cuando se proyecta más de un grupo de control.

En cuanto a la iluminancia natural exterior para los dos casos de estudio, ésta fue medida ubicando el luxómetro de forma vertical, paralelo a la superficie exterior de la ventana y en un punto medio  $P_{Ee}$  de dicha superficie a una altura de 1,5m desde el suelo. En esta posición fue registrada la lectura de la iluminancia natural exterior con respecto a cada punto del mallado, tal y como lo describen las líneas de color azul desde el punto  $P_{Ee}$  a cada punto  $p$  del mallado de medición de las figuras 14a y 14b.

### **Método de medición para la caracterización de la luminaria**

A diferencia del método de medición utilizado en las dos primeras etapas de la caracterización, para la tercera etapa no fue necesario emplear un mallado de medición, en su lugar fue propuesto un método de medición para determinar las curvas de iluminancia de la luminaria en el eje X y Y sobre el plano de trabajo.

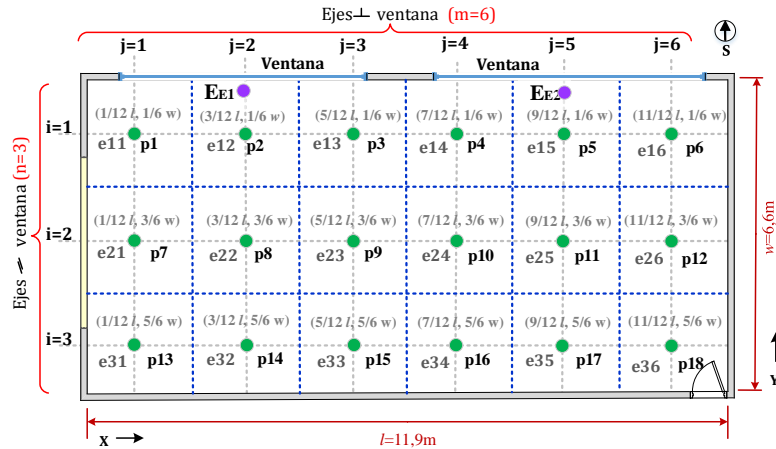
El segundo método de medición de iluminancia artificial se basa en dos líneas de medición dispuestas sobre la superficie de trabajo, una a lo largo del eje X y otra a lo largo del eje Y, las cuales representan los planos longitudinal ( $0^\circ$ ) y transversal ( $90^\circ$ ) de la luminaria, respectivamente. Estas líneas están compuestas por puntos de medición a la altura de trabajo (0,75m), separados cada 50 cm a partir del punto centro de la luminaria, en los cuales fueron ubicados los luxómetros para registrar la iluminancia artificial aportada por la luminaria. Este método junto con el procedimiento de medición es presentando en más detalle en la sección 3.4.3.

Con base en estas curvas y las variables de operación del control del SIH, es posible estimar la iluminancia artificial interior en función de la alternativa de control del SIH por medio del modelo matricial  $E_{A_{est\_ac_{n \times m}}}(t)$ , hallando cada uno de sus elementos,  $e_{A_{est\_ac}(i,j)}(t)$ . Esto aplica cuando se considera desde un GC hasta un número GCs igual al número de luminarias del recinto (NK). Los elementos de este modelo matricial son descritos en el Capítulo 5 a partir de  $e_A(p, t)$ .

### **Mallado de medición representativo de la superficie de trabajo**

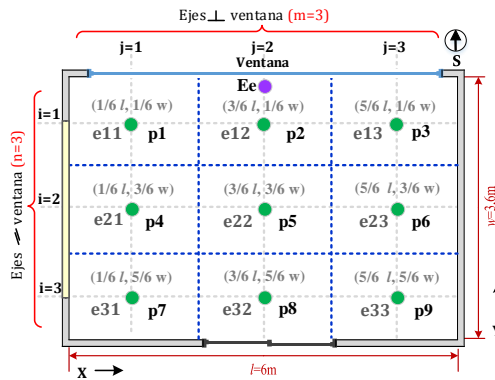
Las figuras 15 y 16 muestran los mallados de medición del aula IE 305 y la sala de juntas, con 18 puntos (3x6) y 9 puntos (3x3), respectivamente; los cuales fueron establecidos con la alternativa de medición No. 1, para medir las iluminancias natural y artificial interiores. Asimismo, las figuras 17 y 18 presentan los mallados de medición del aula IE 305 y la sala de juntas, con 28 puntos (4x7) y 18 puntos (3x6), respectivamente. Estos mallados fueron desarrollados a partir de la alternativa de medición No. 2, para llevar a cabo la medición de la iluminancia natural interior. El punto  $E_e$  indica el lugar de medición de la iluminancia natural exterior para cada caso.

Figura 15. Mallada de medición de (3x6) del aula IE – 305 – Alternativa de medición No.1.



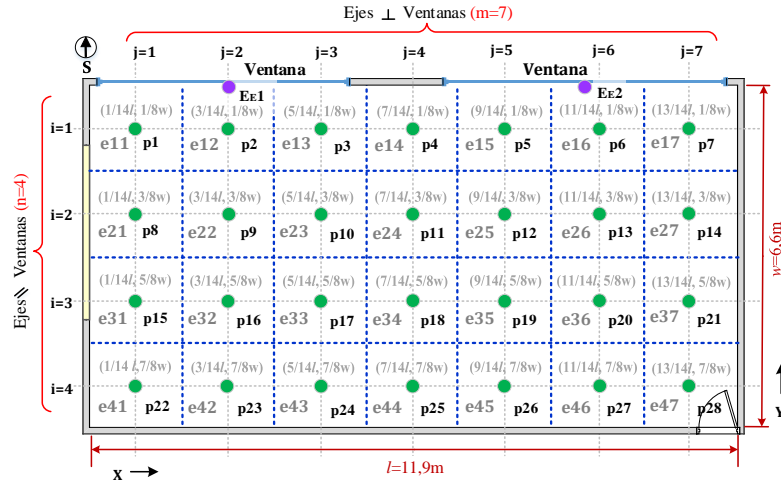
Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Mallada de medición de (3x3) de la sala de juntas– Alternativa de medición No.1



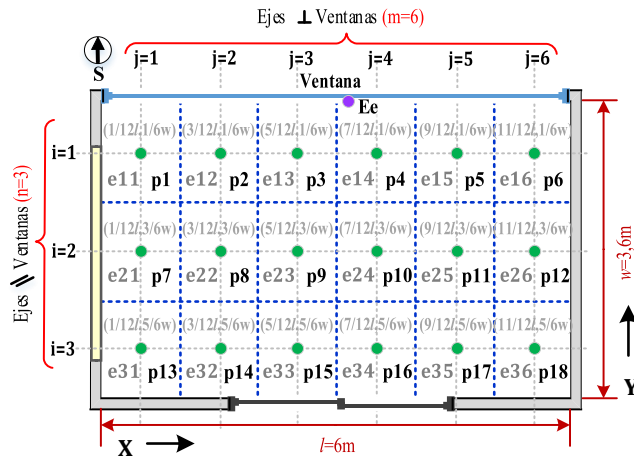
Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Mallada de medición de (4x7) del aula IE – 305 – Alternativa de medición No.2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Mallada de medición de (3x6) de la sala de juntas– Alternativa de medición No.2.



Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa, el mallado de medición es una representación matricial de  $n \times m$  elementos de la iluminancia natural y la iluminancia artificial interior, donde cada punto  $p_N$  ( $N = 1, \dots, n \times m$ ) es definido como uno de los elementos, al cual le corresponde una iluminancia  $e_{i,j}$ , donde  $i$  toma valores de 1 a  $n$  y  $j$  de 1 a  $m$ .

Equipo de medición Figura 19 La Figura 19 muestra los equipos de medición utilizados en este proceso de experimentación; específicamente, se usó un luxómetro marca

*Extech Instruments* (color negro), modelo 407026 (0-50.000 lux, exactitud  $\pm 4\%$ ), etiquetado como *luxómetro 1* y dos *luxómetros* marca *Amprobe* (color rojo), modelo LM-120 (0-200.000 lux, exactitud  $\pm 5\%$ ), etiquetados como *luxómetro 3* y *luxómetro 4*, respectivamente<sup>28</sup>. Adicionalmente, se diseñaron y construyeron dos tipos de base metálica, una para la toma de mediciones de iluminancia natural interior y artificial interior con 0,75 m de altura para simular la superficie de trabajo, y la otra para la medición toma de iluminancia natural exterior con una altura de 1,5 m.

Figura 19. Equipos de medición de iluminancia.



Fuente: Elaboración propia

<sup>28</sup> No se relacionó el *luxómetro 2* dado que no fue utilizado para esta investigación.

Los luxómetros utilizados tienen certificado de calibración; no obstante, se llevó a cabo un proceso para determinar curvas de ajuste de las mediciones obtenidas. Este proceso consistió en (i) realizar mediciones de iluminación con los tres luxómetros de forma simultánea para un rango amplio de valores, (ii) establecer el promedio de las lecturas de los luxómetros para cada toma de datos, (iii) relacionar los datos obtenidos por cada luxómetro con los datos promedios y (iv) determinar las curvas de tendencia por luxómetro. Se considera que el valor promedio de las muestras obtenidas de forma simultánea por diversos medidores de características similares tiende a reducir la incertidumbre de la medición.

Las figuras 20 a 22 muestran las curvas de ajuste y las expresiones (3.3) a (3.5) las ecuaciones de ajuste para los luxómetros 1, 3 y 4, respectivamente, donde  $x$  es el valor medido por los luxómetros y  $y$  el valor esperado que se obtendría a partir del promedio de cuatro luxómetros (incluidos los tres utilizados). El valor de cada muestra adquirida fue ajustado por la curva característica del luxómetro con el cual fue obtenida.

Figura 20. Curva de ajuste medición de iluminación natural para el luxómetro 1.

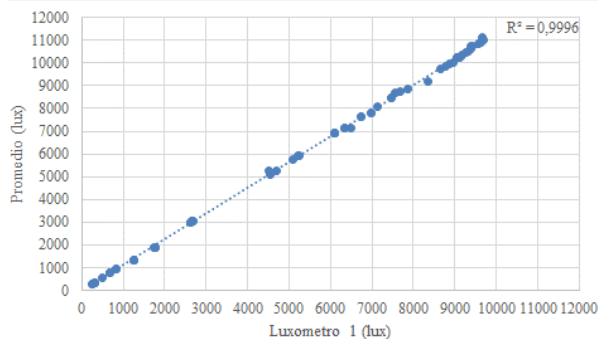
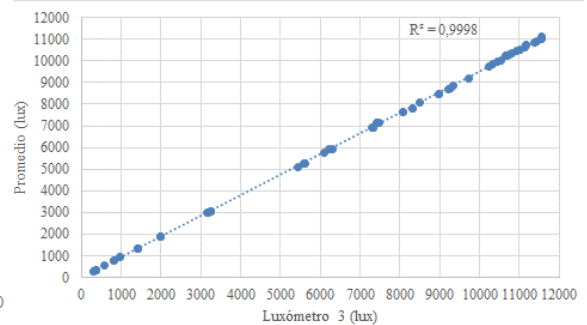
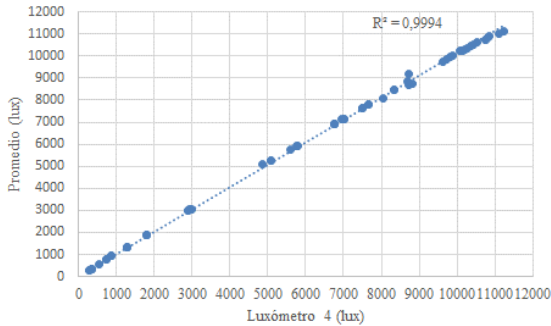


Figura 21. Curva de ajuste medición de iluminación natural para el luxómetro 3.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Curva de ajuste medición iluminancia artificial para el luxómetro 4.



Fuente: Elaboración propia

$$y = 1,1298 \cdot x \quad (3.3)$$

$$y = 0,9519 \cdot x \quad (3.4)$$

$$y = 1,0119 \cdot x \quad (3.3)$$

### 3.3. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA ILUMINACIÓN NATURAL INTERIOR Y EXTERIOR

La medición de las iluminancias natural interior y exterior fue realizada de manera horaria, en el mes de octubre del año 2015 con el mallado de menor cantidad de puntos, 9 y 18 para sala de juntas y aula IE 305, respectivamente, y en el mes de mayo del año 2017 con el mallado de mayor cantidad de puntos (18 y 28). Para tal fin, se estableció un procedimiento que fue desarrollado y aplicado de igual manera para ambos tipos de mallado de medición. Este procedimiento es explicado a continuación para el caso del mallado de mayor cantidad de puntos:

1) Todas las luminarias fueron apagadas durante el proceso de medición, con el fin de garantizar que la iluminancia medida dentro de los espacios fuera producida solo por la luz natural transmitida a través de las ventanas.

2) Las mediciones fueron tomadas con las ventanas abiertas (condición típica de uso) y la puerta cerrada. Para el caso del aula IE 305, la puerta fue tapada ya que tiene un acristalamiento por donde ingresa luz. Esto indica que se despreció la iluminancia proveída a través de la puerta dado que los niveles de iluminancia exterior

incidente sobre la superficie de la puerta son significativamente menores a los incidentes en las ventanas.

3) Para cada caso de estudio fue utilizado el mallado de medición propuesto, con 28 puntos para el aula IE 305 y 18 puntos para la sala de reuniones (ver sección 3.2.1). Adicionalmente, los puntos de medición de cada mallado fueron divididos en dos trayectos y las mediciones iniciaron simultáneamente desde las posiciones p1 y p28 (aula IE 305) y p1 y p18 (sala de reuniones) en el orden de la línea flecha indicada en las figuras 19 y 20. Esta dinámica de medición es recomendada por Boyce y Raynham [13].

4) Con el fin de evitar variaciones importantes de la iluminancia natural exterior, y en consecuencia la iluminancia natural interior durante el periodo de medición, cada medición debió ser finalizada en un corto periodo de tiempo. No obstante, se aclara que el cálculo del DF de cada punto se estableció solo por las mediciones de iluminancia tomadas de forma simultánea en un instante de tiempo  $t$ .

5) En cada punto del mallado y para cada caso de estudio, fueron registradas dos mediciones, en un intervalo no mayor a 30 segundos, siendo promediados los valores del DF obtenidos a partir de éstas. Las mediciones fueron conducidas durante 4 momentos del día, comprendidos entre las 9 a.m. y las 4 p.m. para la Sala de Reuniones.

Es importante mencionar que para el caso del aula IE 305 no es posible determinar una sola matriz DF característica, ya que el DF debe ser calculado por fuente, debido a que no es conveniente combinar fuentes, sean de fachada (ventanas) o cénitales (tubos solares). Por tanto, se debió considerar que las dos ventanas en la fachada sur son dos fuentes independientes de luz natural, debido a que una de éstas (suroriente) tiene un cortasol que ocasiona que las iluminancias incidentes en las ventanas en un mismo instante de tiempo sean diferentes y a que la distribución de la iluminancia interior y los DF también difieran; adicionalmente, estas ventanas están separadas por una columna de casi 1 m de profundidad. Por lo mencionado,

hubo la necesidad de aumentar los periodos de tiempo de medición a 10. Considerando esta condición, las mediciones fueron realizadas de manera alternada entre una ventana y la otra, iniciando con la ventana surorientada, mientras fue tapada la ventana suroccidente, tal como muestra la Figura 23, y así sucesivamente durante los 10 periodos de tiempo, comprendidos entre las 8 a.m. y las 5 p.m.

Figura 23. Escenario de experimentación – Aula IE-305.



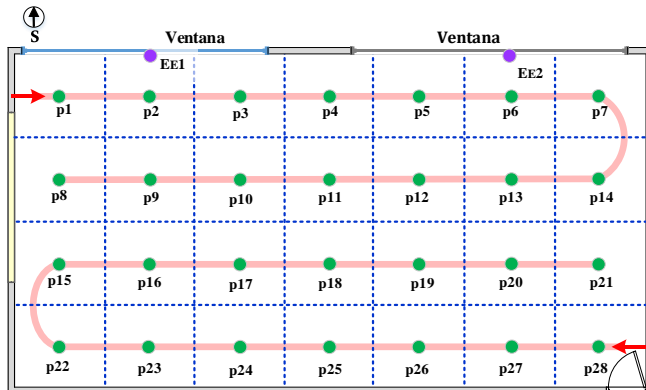
a. Ventana suroccidente cubierta

b. Ventana surorientada cubierta

Fuente: Elaboración propia

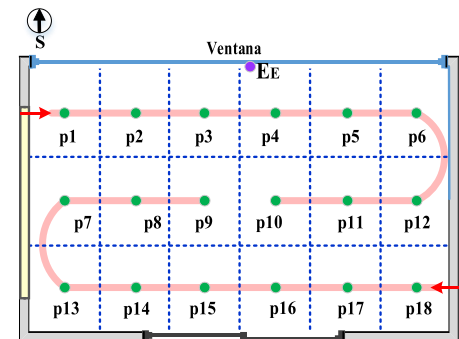
De manera simultánea a las mediciones de iluminancia natural interior realizadas para cada punto, fue registrada la lectura de la iluminancia exterior incidente sobre la superficie externa de la ventana en los puntos  $E_{E1}$  y  $E_{E2}$  para el aula IE 305 (ver Figura 24) y en el punto  $E_E$  para la sala de reuniones (ver Figura 25); es decir, que cada vez que era tomada una lectura de iluminancia natural interior en cada punto del mallado, al mismo tiempo era medida la iluminancia natural exterior.

Figura 24. Estrategia para la toma de mediciones aula IE 305



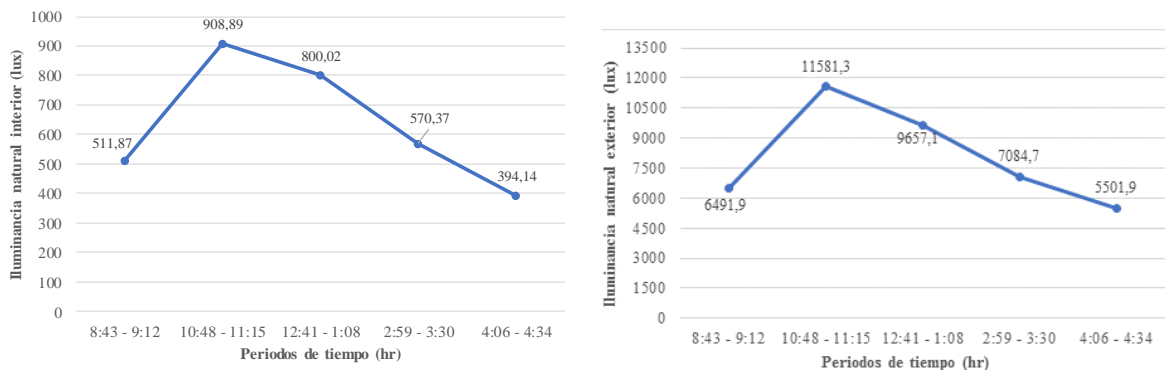
Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Estrategia para la toma de mediciones sala de reuniones



Las figuras 26 a 28 muestran la iluminancia natural interior y exterior promedio para cada instante de tiempo establecido para el proceso de medición en el aula IE 305 y la sala de reuniones. Las figuras muestran de manera general que la iluminancia natural interior tiende a mantener el mismo comportamiento de la iluminancia natural exterior. Particularmente, para el caso del aula IE 305, las iluminancias naturales interior y exterior alcanzaron el máximo valor entre las 10:15 a.m. y las 11:15 a.m. y a partir de esta hora empezaron a decaer, alcanzando los valores más bajos a las 4:06 p.m. y las 5:08 p.m. De manera similar sucede en la Sala de reuniones, los valores de iluminancia más altos se presentan entre la 1:54 p.m. y la 2:13 p.m. y a partir de esa hora decayeron, llegando a los valores más bajos a las 3:41p.m. y 3:59 p.m.

Figura 26. Variación de la iluminancia natural ventana surorienté – Aula IE-305

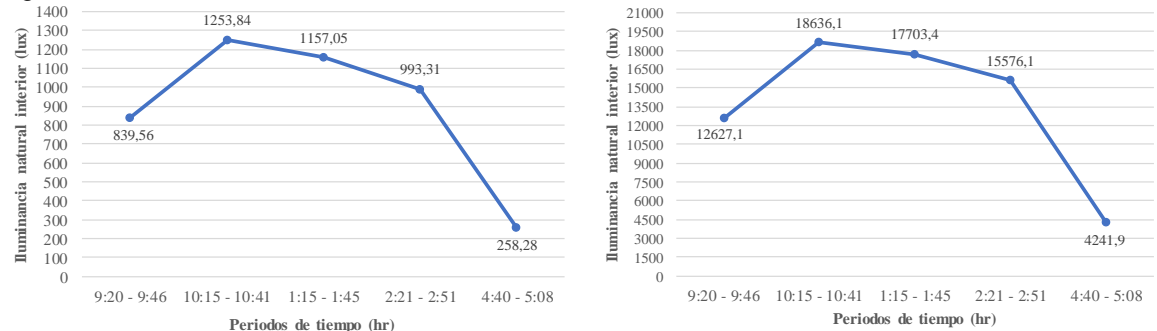


a. Iluminancia natural interior sobre la superficie de trabajo.

b. Iluminancia natural exterior.

Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Variación de la iluminancia natural ventana suroccidente – Aula IE-305.

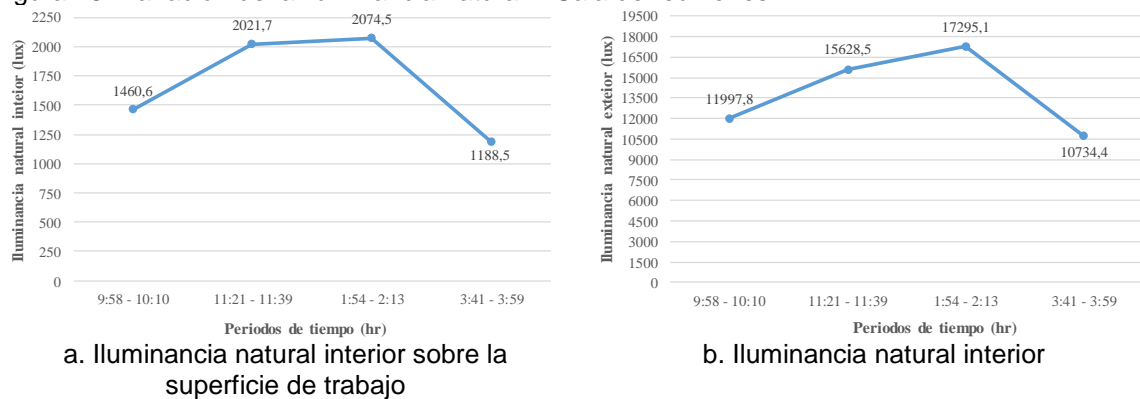


a. Iluminancia natural interior sobre la superficie de trabajo

b. Iluminancia natural exterior

Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Variación de la iluminancia natural – Sala de reuniones.



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, con el fin de realizar la validación de los datos de iluminancia total interior ( $E_{T_{n \times m}}(t)$ ) estimados con el modelo experimental propuesto (ver paso No. 10 de la Figura 6), fue utilizado el mismo procedimiento de medición descrito, con las luminarias encendidas y acceso de iluminación natural, con el fin de permitir la operación del control de iluminación de cada espacio y que se encendiesen las luminarias cuando la luz natural era insuficiente. Esto con el fin de registrar lecturas de iluminancia total interior que pudiesen ser comparadas con los datos estimados usando el modelo propuesto. Cabe mencionar que este proceso de validación se realizó considerando los mallados 9 y 18 puntos de los recintos seleccionados.

### 3.4. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA ILUMINANCIA ARTIFICIAL

La iluminancia artificial sobre la superficie de trabajo fue registrada usando el mallado de medición de 9 y 18 puntos de la sala de reuniones y el aula IE 305, respectivamente, para tres diferentes escenarios de experimentación: (i) Medición de la iluminancia artificial característica del espacio para una configuración de un grupo de control (GC), (ii) Medición de iluminancia artificial para diversas configuraciones de luminarias en varios GCs, y (iii) Medición de la iluminancia artificial de la luminaria en los ejes X y Y.

### **Medición de la iluminancia artificial característica del espacio para un GC (todas las luminarias del recinto)**

Esta medición consistió en registrar la iluminancia artificial propia del espacio de acuerdo con el mallado de medición propuesto y a la configuración de luminarias existentes en el recinto, considerando que todas éstas se encuentran integradas en un solo GC. Por consiguiente, operan al mismo tiempo y aportan el mismo flujo luminoso según la técnica de control (On/Off o dimerización), en respuesta a la disponibilidad de luz natural.

Con el fin de garantizar que únicamente la iluminancia artificial fuera medida al interior del espacio, las ventanas y la puerta fueron tapadas para evitar el ingreso de luz natural o artificial exterior. Bajo esta condición, todas las luminarias fueron forzadas a encenderse por acción de la técnica de control para registrar la iluminancia artificial en cada punto del mallado. Este procedimiento fue realizado en los dos casos de estudio (ver Figura 29).

Figura 29. Escenario de medición iluminación artificial para un GC=todas las luminarias - aula IE 305.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 13 muestra los valores de iluminancia artificial registrados para el aula IE 305 (18 puntos de medición), que se caracteriza por dos posibles estados de flujo

luminoso, 0% (apagado) o 100% (encendido), que es la condición de interés para el análisis.

Tabla 13. Valores de Iluminancia artificial característica del aula IE 305 para un solo grupo de control

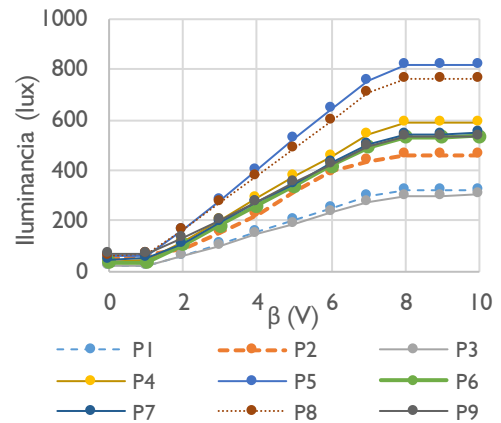
p1, p7, p13	p2, p8, p14	p3, p9, p15	p4, p10, p16	p5, p11, p17	p6, p12, p18
392	409	416	435	428	392
465	504	498	491	495	448
612	648	632	652	666	574

Fuente: Elaboración propia

El caso de la Sala de reuniones es distinto dado que es dimerizable. Los datos de iluminancia fueron recolectados para diversos niveles de dimerización de las luminarias (ver Tabla I4). Estos niveles se encuentran en un rango comprendido entre un 10% y 100% del flujo luminoso de las luminarias. Para llevar las luminarias hasta cada nivel de dimerización se variaron los valores de la tensión de dimerización (señal de control -  $\beta$ ), la cual se encuentra entre 0 V y 10 V; para ello, se accedió a la plataforma *Andover Continuum* del sistema de automatización. Es importante indicar que no se evidenció una relación proporcional entre  $\beta$  y el flujo luminoso.

Tabla 14. Valores de Iluminancia artificial característica de la sala de reuniones para diferentes niveles de dimerización y un solo GC.

$\beta$	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
10	322	461	301	588	821	535	553	763	530
9	322	460	299	586	820	533	544	761	530
8	321	459	299	586	820	532	543	760	530
7	295	437	276	540	758	492	502	704	493
6	252	422	234	458	643	419	428	597	423
5	205	360	190	374	523	338	348	485	350
4	158	224	146	288	402	261	271	376	276
3	110	154	101	203	283	182	191	271	204
2	64	89	58	117	162	105	111	159	131
1	23	66	21	43	60	36	49	65	68
0	24	50	19	40	58	36	43	64	67



Fuente: Elaboración propia

## **Medición de la iluminancia artificial del espacio para diferentes configuraciones de GC**

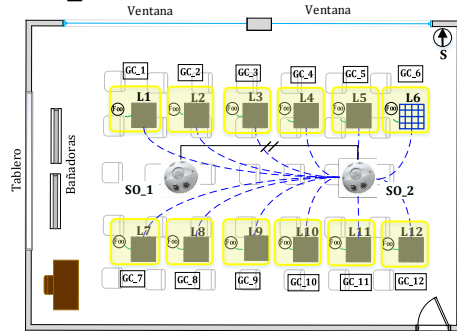
En este caso fue registrada la iluminancia artificial para diferentes configuraciones de GC. Cada configuración pueda estar compuesta por más de un GC y a su vez cada GC puede agrupar más de una luminaria. Por ejemplo, un recinto de cuatro luminarias se puede configurar en cuatro GC, donde cada GC está conformado por una luminaria. También se puede configurar en dos GC, donde cada GC está conformado por dos luminarias. Además de éstas, es posible realizar otras configuraciones.

Al igual que para el escenario de medición descrito, las ventanas y puerta fueron tapadas, condición que forzó a las luminarias a encenderse por la acción de la técnica de control existente en cada espacio. A partir del estado de encendido de las luminarias, en todos los puntos del mallado fue medido el aporte de iluminancia artificial generado por uno de los GC. Para tal fin, las luminarias correspondientes al grupo de control a medir permanecieron descubiertas, mientras se obstruyó el flujo lumínico de las demás luminarias pertenecientes al resto de grupos de control de la configuración a analizar. Con el fin de ilustrar lo mencionado, se exponen a manera de ejemplo dos escenarios de medición por cada caso de estudio:

La Figura 30 presenta una configuración de doce grupos de control en el aula IE 305, donde cada GC está conformado por una luminaria. La Figura 31 muestra la iluminancia generada por el grupo de control analizado (GC6 conformado por la luminaria L6).

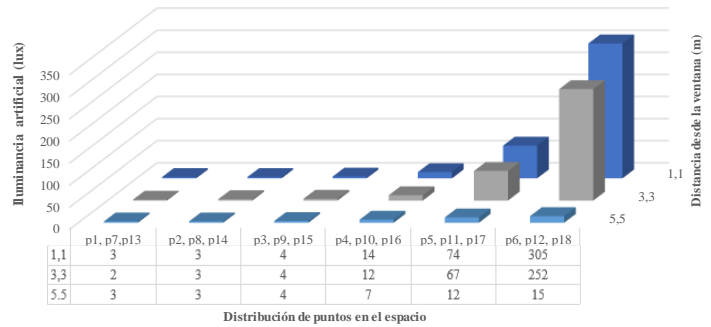
De manera análoga, la Figura 32 presenta una configuración de cuatro grupos de control donde cada GC está conformado por 3 luminarias; específicamente, se analiza el GC\_1 conformado por las luminarias L10, L11 y L12. La Figura 33 presenta el aporte de iluminancia artificial de este grupo de control.

Figura 30. Configuración GC=una luminaria\_aula IE 305



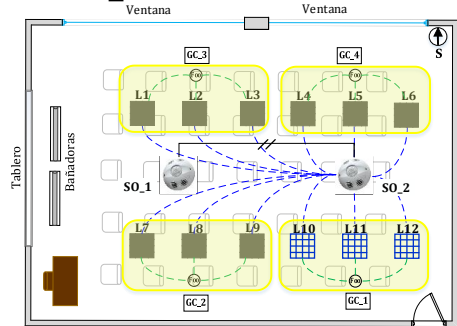
Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Distribución de iluminancia artificial para un GC=una luminaria\_aula IE 305



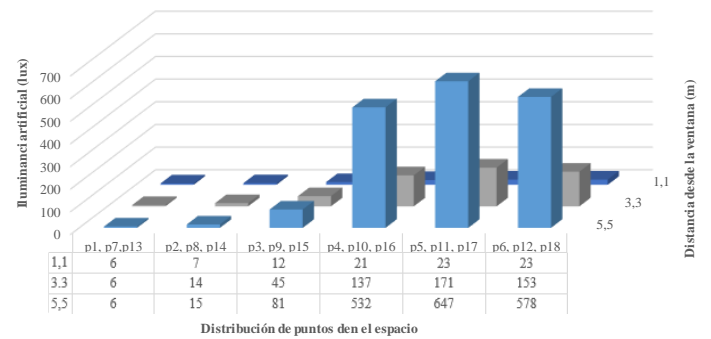
Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Configuración GC=tres luminarias\_aula IE 305



Fuente: Elaboración propia

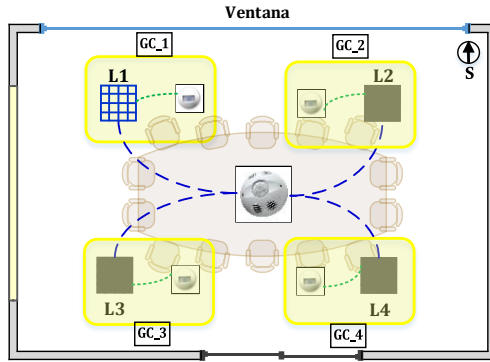
Figura 33. Distribución de iluminancia artificial para un GC=tres luminarias\_aula IE 305



Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la Sala de reuniones, las figuras 34 y 35 muestran una configuración de cuatro grupos de control con una luminaria por cada GC y una configuración de dos grupos de control con dos luminarias por cada GC, respectivamente. La Tabla 15 presenta los valores de iluminancia artificial medida para cada valor de tensión de dimerización  $\beta$  a partir del GC\_1 de la Figura 34. Asimismo, la Tabla 16 expone los valores de iluminancia artificial medidos a partir del GC\_1 de la Figura 35 compuesto por las luminarias L1 y L2.

Figura 34. Configuración GC= una luminaria sala reuniones



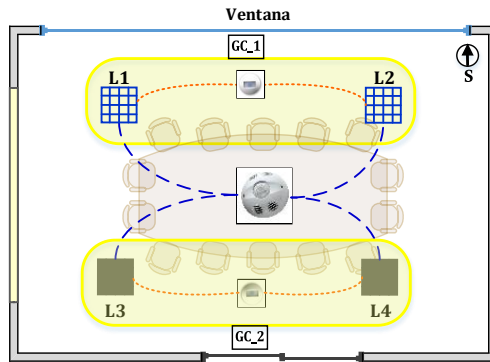
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Valores de iluminancia artificial para un GC=una luminaria\_sala de reuniones

$\beta$	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
10	235	153	16	335	210	16	146	110	12
9	235	153	16	335	210	15	146	110	12
8	235	153	16	335	210	15	146	110	12
7	216	141	15	308	193	15	135	102	11
6	183	120	12	262	164	12	114	88	9
5	148	97	9	212	133	11	92	70	7
4	112	74	7	162	101	7	69	53	6
3	77	50	5	110	70	5	48	36	4
2	44	28	3	64	43	3	26	21	3
1	15	9	2	21	14	2	8	8	1
0	15	8	2	19	12	1	8	6	1

Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Configuración GC=dos luminarias sala reuniones



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Valores de iluminancia artificial para un GC=dos luminarias\_sala de reuniones

$\beta$	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
10	235	153	16	335	210	16	146	110	12
9	235	153	16	335	210	15	146	110	12
8	235	153	16	335	210	15	146	110	12
7	216	141	15	308	193	15	135	102	11
6	183	120	12	262	164	12	114	88	9
5	148	97	9	212	133	11	92	70	7
4	112	74	7	162	101	7	69	53	6
3	77	50	5	110	70	5	48	36	4
2	44	28	3	64	43	3	26	21	3
1	15	9	2	21	14	2	8	8	1
0	15	8	2	19	12	1	8	6	1

Fuente: Elaboración propia

### Medición de la iluminancia artificial de la luminaria en los ejes X y Y

Dado que pueden existir dos o más GC en un recinto, donde cada GC impone un régimen de operación particular, fue necesario determinar una estrategia para estimar la contribución de cada luminaria sobre cada punto del mallado. Para tal fin, se requería conocer primero la contribución de iluminancia de una luminaria sobre la superficie de trabajo en el punto  $p$  para después sumar todas las contribuciones de las luminarias en este punto.

Ahora, debido a que en general distribución luminosa de una luminaria es asimétrica<sup>29</sup>, la máxima contribución de iluminancia de la luminaria  $k$  en el punto  $p_N$ ,  $(a_{p_{max_{est}(i,j,k)}})$ , puede ser expresada como la suma ponderada de las curvas de iluminancia de la luminaria de los ejes  $X$  y  $Y$  sobre el plano de trabajo,  $Elx(r_{pk})$  y  $Ely(r_{pk})$ . Ambas curvas están en función de la distancia horizontal entre la luminaria y el punto  $p_N$ , denominada  $r_{pk}$  (ver Figura 36). Estas curvas son estimadas a través de la caracterización lumínica de la luminaria.

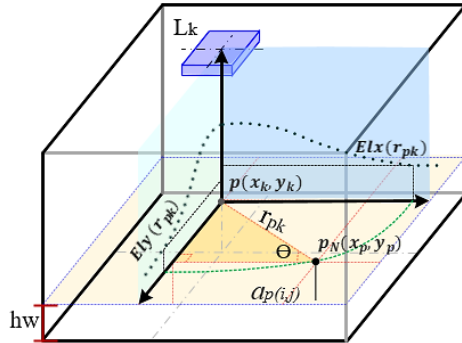
La caracterización consistió en realizar la medición de la iluminancia artificial en los ejes  $X$  y  $Y$ , aportada por una luminaria tipo On/Off (de lámpara T5 y altura de montaje= 2,5 m), ubicada en el aula IE 305 y una luminaria dimerizable (de lámpara T8 y altura de montaje=2,5 m), localizada en la sala de reuniones.

Con el fin de realizar las mediciones de la iluminancia de una sola luminaria, se obstruyeron las ventanas, la puerta y las otras  $NK - 1$  luminarias del espacio (ver figuras 36 y 37). Bajo estas condiciones, las mediciones fueron tomadas a la altura de trabajo ( $hw=0,75$  m). Las lecturas iniciaron en la posición de origen, justo directamente debajo del punto centro de la luminaria  $P(0,0)$ , y a partir de esta posición fue registrada la iluminancia con un paso ( $d$ ) de 50 cm, tanto en el eje  $X$  como en el eje  $Y$ , hasta donde las paredes lo permitieron, según las dimensiones de cada caso de estudio (ver Figura 37).

---

<sup>29</sup> En general, el flujo luminoso de luminarias con tubos fluorescentes no se distribuye de forma simétrica respecto del eje perpendicular entre la luminaria y la superficie de trabajo. Esto se debe a que la fuente luminosa y la luminaria no son simétricas.

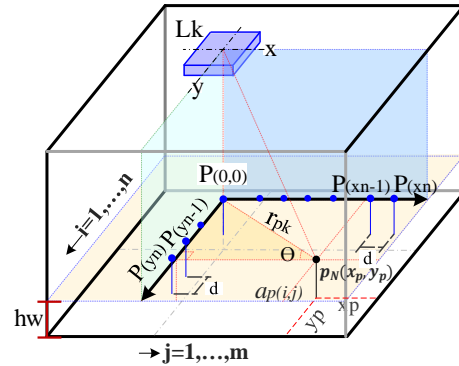
Figura 36. Curvas de iluminancia de la luminaria en función de la distancia  $r_{pk}$



Fuente: Elaboración propia

$N=1, \dots, n \times m^*$

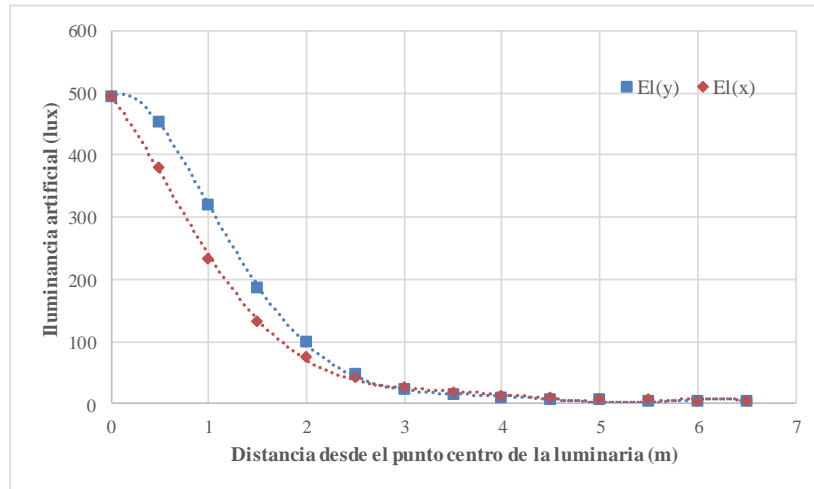
Figura 37. Bosquejo del procedimiento de medición para la caracterización de la luminaria (Lk).



Fuente: Elaboración propia

Las figuras 38 y 39 muestran las curvas de iluminancia de los ejes X y Y para el aula IE305 y la Sala de Reuniones, respectivamente. Las dos líneas de tendencia de la Figura 38 (línea azul y línea roja) son funciones de sexto orden cuyas expresiones matemáticas son mostradas por las ecuaciones (3.5) y (3.6), con valores del coeficiente de determinación,  $R^2$ , son 0,9994 y 0,9998, respectivamente.

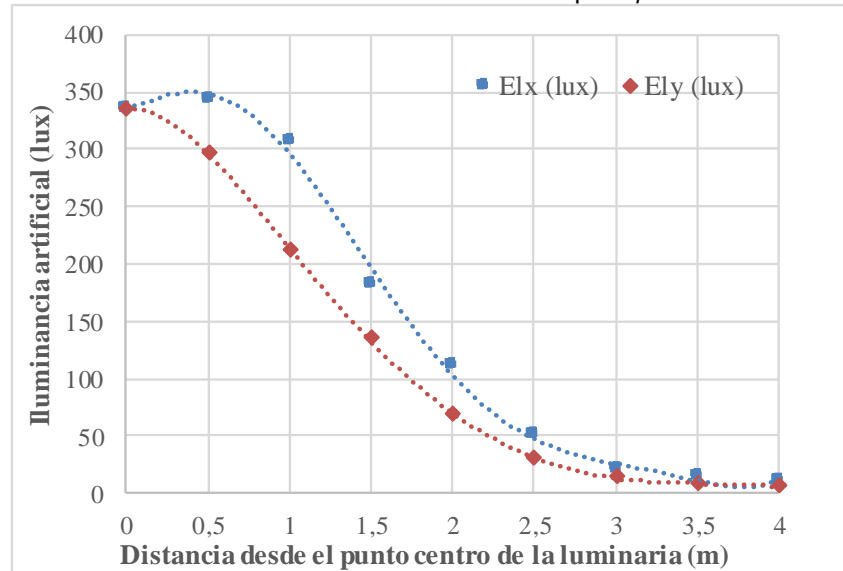
Figura 38. Curvas de iluminancia luminaria aula IE 305.



Fuente: Elaboración propia

$$Elx(r_{pk}) = -0,2406r_{pk}^6 + 5,1055r_{pk}^5 - 40,76r_{pk}^4 + 145,14r_{pk}^3 - 176,98r_{pk}^2 - 185,88r_{pk} + 493 \quad (3.5)$$

$$Ely(r_{pk}) = -0,3394r_{pk}^6 + 7,6306r_{pk}^5 - 66,103r_{pk}^4 + 269,62r_{pk}^3 - 475,04r_{pk}^2 + 90,69r_{pk} + 493 \quad (3.6)$$

Figura 39. Curvas de iluminancia luminaria sala de reuniones para  $\beta = 10$ .

Fuente: Elaboración propia

$$Elx(r_{pk}) = 3,2698r_{pk}^6 - 39,379r_{pk}^5 + 167,7r_{pk}^4 - 270,8r_{pk}^3 + 50,186r_{pk}^2 + 50,767r_{pk} + 335 \quad (3.7)$$

$$Ely(r_{pk}) = -0,7852r_{pk}^6 + 10,76r_{pk}^5 - 61,927r_{pk}^4 + 189,98r_{pk}^3 - 283,26r_{pk}^2 + 23,79r_{pk} + 335 \quad (3.8)$$

De manera similar, las ecuaciones (3.7) y (3.8) muestran las expresiones matemáticas de las líneas de tendencia de la Figura 39 (línea azul y línea roja), que son funciones de sexto orden, cuyos valores de  $R^2$  son 0,9973 y 0,9999, respectivamente; para una tensión de dimerización  $\beta = 10 V$ . Dado que la Sala de reuniones tiene luminarias dimerizables, las curvas  $Elx(r_k)$  y  $Ely(r_k)$  varían según el valor de  $\beta$ , tal como muestra la Tabla 17. No obstante, existe una relación lineal entre el flujo luminoso y la iluminancia producida, tal como se muestra a continuación, por lo que las curvas obtenidas permiten estimar la iluminancia producida por una luminaria en cualquier punto del mallado para toda condición de operación

Tabla 17. Iluminancia artificial para diferentes valores de  $\beta$  para la luminaria de la Sala de reuniones.

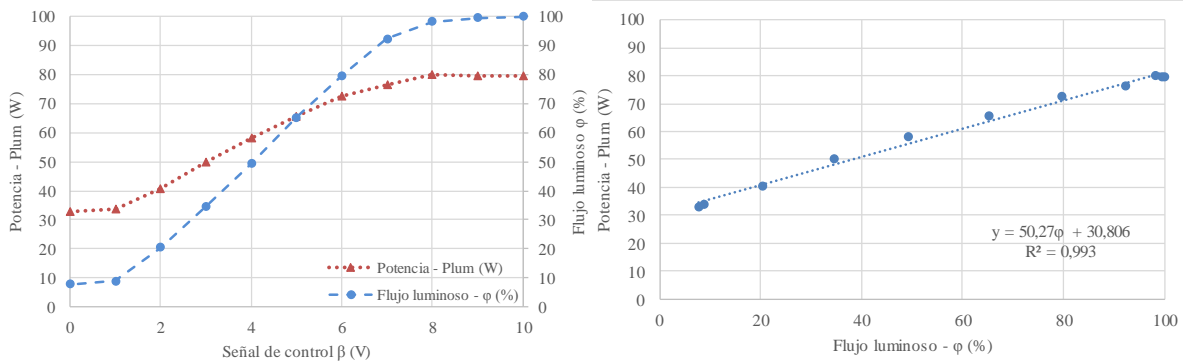
E_lum (lux)	Distancia desde el punto centro de la luminaria a la pared (m)										$\beta$
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4		
Ex	336	344	308	183	111	50	21	14	11		10
Ey	335	297	212	135	74	30	15	8	6		
Ex	334	342	308	183	111	50	21	14	11		9
Ey	335	295	212	133	72	28	12	7	6		
Ex	334	342	305	183	100	50	21	14	11		8
Ey	335	294	212	133	72	27	11	6	6		
Ex	309	313	282	171	91	47	19	12	9		7
Ey	309	272	195	123	66	27	10	6	5		
Ex	262	266	239	141	77	40	16	9	8		6
Ey	262	230	167	104	57	25	8	5	4		
Ex	212	214	192	116	63	30	15	7	7		5
Ey	212	188	136	84	46	18	9	5	5		
Ex	164	166	148	88	50	25	11	7	5		4
Ey	162	145	104	65	36	15	7	4	2		
Ex	117	116	102	64	34	17	6	4	4		3
Ey	114	97	73	45	25	9	5	2	2		
Ex	64	65	60	35	17	8	3	2	2		2
Ey	66	56	40	24	11	6	4	2	1		
Ex	21	22	19	12	7	3	2	1	1		1
Ey	23	18	14	8	4	2	2	2	1		
Ex	21	21	18	12	5	3	2	1	1		0
Ey	21	17	14	7	4	3	2	1	1		

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. CURVAS DE POTENCIA DE LA LUMINARIA DIMERIZABLE

La operación de una luminaria dimerizable  $k$  puede ser caracterizada a partir de tres variables, flujo luminoso relativo ( $\varphi_k$ ), señal de control de dimerización ( $\beta_k$ ) y potencia de operación,  $Plum_k$ , tal como la Figura 40 muestra. El valor de  $\varphi_k$  corresponde a un porcentaje del flujo luminoso máximo que puede emitir la luminaria. El control del SIH establece el valor  $\beta_k$  para cada instante  $t$ , que a su vez, define el valor  $\varphi_k$  que determina el valor de  $Plum_k$ . La Figura 40.a muestra el comportamiento de  $\varphi$  y  $Plum$  para valores de  $\beta$  entre 0 V y 10 V; donde 0 V es el mínimo valor de la señal de control y produce el mínimo flujo luminoso y por ende el menor consumo de potencia; un valor de 10 V es el máximo valor de la señal de control para las luminarias estudiadas en este trabajo de investigación y produce el máximo flujo luminoso y máxima potencia consumida.

Figura 40. Curvas características de una luminaria dimerizable.



a. Curvas de potencia y porcentaje de flujo luminoso.

b. Potencia vs porcentaje de flujo luminoso.

Fuente: Elaboración propia

$\beta$  puede variar entre 0V y 10V, produciendo variaciones de  $\phi$  entre el 6% y el 100% y de  $Plum$  entre 30W y 80W. Ambas variables pueden ser descritas a partir de curvas de tendencia polinómica de tercer grado, como muestran (3.9) y (3.10), cuyos coeficientes de determinación,  $R^2$ , son 0.9955 y 0.9984, respectivamente.

$$P_{lum} = -0.1076\beta^3 + 1.217\beta^2 + 3.274\beta + 31.40 \text{ (W)} \quad (3.9)$$

$$\phi = -0.2406\beta^3 + 3.1101\beta^2 + 2.1677\beta + 6,1081(\%) \quad (3.10)$$

Dado que  $\phi$  y  $P_{lum}$  se establecieron a partir de  $\beta$ , estas variables se pueden relacionar de forma indirecta, siendo posible evidenciar una relación lineal descrita por la expresión (3.11) cuyo  $R^2$  es 0.993.

$$P_{lum} = 30,806 + 50,27 \cdot \phi \text{ (W)} \quad (3.11)$$

## 4. MODELADO DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO Y DE CONSUMO DE ENERGÍA

Este capítulo expone el modelado experimental obtenido para describir el comportamiento lumínico y energético del sistema de iluminación híbrida implementado en dos casos de estudio, aula IE 305 y sala de reuniones del Edificio de Ingeniería Eléctrica, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada espacio que la Tabla 18 describe. Este modelado considerado exploratorio, es el punto de partida para desarrollar un modelado de tipo general (plantado en el capítulo 5), que es la base para determinar el costo financiero total de diversas soluciones de control el SIH de los recintos en estudio.

Tabla 18. Características principales de los casos de estudio.

Caso de estudio	Iluminación eléctrica	Iluminación natural	Alternativa de control de iluminación		
			Grupos de control	Estrategia de control (aprovechamiento de la luz natural y ocupación)	
				Técnica de control	Componentes de control
Aula IE 305 Área=78,54 m <sup>2</sup>	12 luminarias fluorescentes de 4 tubos T5 de 14 W con dos balastos electrónicos	Dos ventanas en la fachada sur	GCs: 1 (12 luminarias)	Conmutación On/Off (Flujo luminoso: 0% o 100%)	$so_{fi}$ : 2
Sala de reuniones Área=21,6 m <sup>2</sup>	4 luminarias fluorescentes de 4 tubos T8 de 17 W con dos balastos electrónicos dimerizables	Un ventanal en la fachada sur	GCs: 1 (4 luminarias)	Dimerización (Flujo luminoso: De 10 % a 100%)	$so$ : 1 $f_d$ : 1 $U_c$ : 1

**GCs:** Grupos de control  $so_{fi}$ : Sensor de ocupación con fotocelda incluida  $so$ : Sensor de ocupación  $f_d$ =fotocelda dimerizable  $U_c$ : Unidad de control

Fuente: Elaboración propia

La presentación del modelado experimental parte con la exposición de su fundamentación teórica y matemática (Sección 4.1); seguidamente se explica la caracterización espacial de los casos de estudio (Sección 4.2). Posteriormente, se describe el modelado del comportamiento lumínico y de consumo energético (Sección 4.3). Finalmente, se muestra la validación de los modelos propuestos (Sección 4.4).

## 4.1. FUNDAMENTACIÓN DEL MODELADO

La iluminancia total  $e_T$  (lux) sobre un punto interior de la superficie de trabajo de un recinto es la suma de todas las contribuciones de iluminancia natural  $e_D$  (lux), cuya fuente es el sol, y la iluminancia artificial  $e_A$  (lux) aportada por las luminarias, que pueden estar o no operando según una estrategia de control de iluminación [2]. Por tanto, la iluminancia total de un punto interior puede ser definida como:

$$e_T(t, x, y) = e_A(t, x, y) + e_D(t, x, y) \quad (4.1)$$

Donde la iluminancia artificial  $e_A(t, x, y)$  es una función de la posición geométrica de cada punto (x,y) de evaluación de la iluminancia sobre la superficie de trabajo. Esta variable depende indirectamente del tiempo, dado que se ajusta de acuerdo a la disponibilidad de luz natural que si depende del tiempo. Dicho ajuste es llevado a cabo por una alternativa de control de iluminación eléctrica.

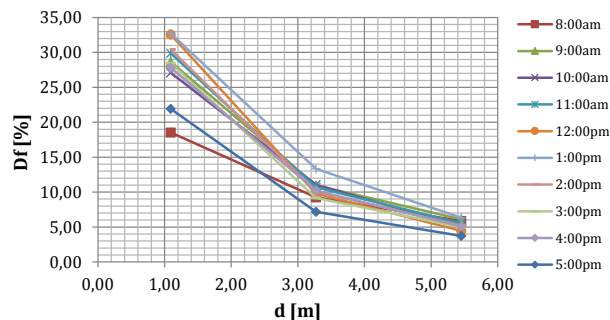
La iluminancia natural interior  $e_D(t, x, y)$  es una función de la posición geométrica en el recinto de cada punto (x,y) con respecto a la fuente de luz natural y varía en el tiempo [1]. Ésta es calculada por la ecuación (4.2) para cada punto (x,y) sobre la superficie de trabajo del recinto.

$$e_{D(i,j)}(t) = E_E(t) \cdot df_{prom}(\%)(i,j) \quad (4.2)$$

Donde  $E_E(t)$  es la iluminancia natural exterior y  $df_{prom}(\%)_{(i,j)}$  es el *Daylight Factor* promedio para cada punto (x,y) del recinto. La estimación del  $df_{prom}(\%)_{(i,j)}$  se obtuvo considerando la iluminancia exterior vertical y cada fuente de luz natural (ventanas).

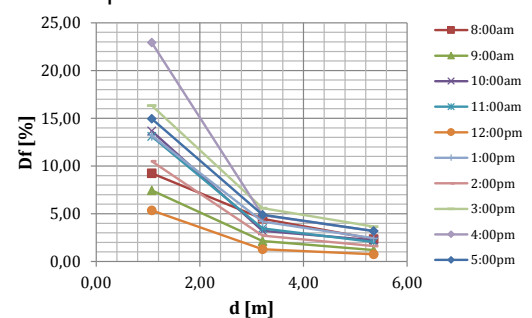
En lugares tropicales como Bucaramanga, el DF se debe obtener con respecto a la luz natural incidente en la fachada (vertical) y no incidente en el techo (horizontal) [12], debido a la menor variabilidad que presentan los valores de DF, tal como muestran las figuras 41 y 42. Esta condición permite considerar al DF promedio como un indicador aceptable del desempeño de la iluminación natural interior. Por otro lado, el DF se debe calcular por fuente y no en conjunto, con el fin de evitar la combinación en un mismo DF de los efectos de diversas fuentes laterales (ventanas de diferentes fachadas y/o ventanas de características diferentes sobre una misma fachada) y cenitales (tubos solares o claraboyas) [89], ya que la entrada de luz natural por una abertura puede ser más abundante y de mayor penetración que por otra fuente o viceversa.

Figura 41. Df Vs distancia - aula IE 305, respecto a la radiación en la fachada.



Fuente: [69]

Figura 42. Df Vs distancia - aula IE 305, respecto a la radiación en terraza



Fuente: [69]

## 4.2. CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE LOS CASOS DE ESTUDIO PARA SU MODELADO

La caracterización espacial de un recinto es definida por la superficie de trabajo, que corresponde al área del suelo del recinto, a una altura de 0,75 m sobre el suelo, donde son desarrolladas tareas que requieren iluminación (e.g. lectura y escritura),

lo que la convierte en el objeto de análisis para el desarrollo del modelado del comportamiento lumínico. En ese sentido, el objetivo es estimar la iluminancia resultante sobre la superficie de trabajo considerando una representación de esta superficie que pueda ser utilizada para modelar y tomar mediciones. Por tal razón, la superficie fue discretizada (muestreada) espacialmente dentro de un mallado de celdas con resolución predefinida (ver Tabla 19), y el DF, las iluminancia natural, artificial y total son determinados en el punto centro  $(p(x,y))$  de cada pequeña celda de la superficie.

Tabla 19. Discretización espacial de la superficie de trabajo.

Caso de estudio	Mallado → Superficie de trabajo	Número de celdas	Resolución de la celda	Tamaño matriz de iluminancia y DF
<p>Sala de reuniones                      longitud <math>l = 6m</math>                      profundidad <math>w = 3,6m</math>  <math>n = 3</math>  <math>m = 3</math></p>		$n \times m = 9$	$\frac{l}{m} = 2m$ $\frac{w}{n} = 1,2m$	$E_{3 \times 3}$ $DF_{prom_{3 \times 3}}$
<p>Aula IE – 305                      longitud <math>l = 11,9m</math>                      profundidad <math>w = 6,6m</math>  <math>n = 3</math>  <math>m = 6</math></p>		$n \times m = 18$	$\frac{l}{m} = 2m$ $\frac{w}{n} = 1,2m$	$E_{3 \times 6}$ $DF_{prom_{3 \times 6}}$

\*\*  $k_x = 1, \dots, m - 1$  y  $k_y = 1, \dots, n - 1$

Fuente: Elaboración propia

El modelo generado a partir del mallado es representado en una matriz de iluminancia  $E_{n \times m}$  y una matriz de *Daylight Factor* promedio  $DF_{prom_{n \times m}}$  de  $n$  filas por  $m$  columnas, donde cada elemento es la iluminancia y el DF del plano de trabajo correspondiente a cada punto  $p(x,y)$  del mallado,  $e_{(i,j)}$  y  $df_{prom_{(i,j)}}$ , respectivamente.

### 4.3. MODELADO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO

El modelado obtenido es una expresión matemática que representa la distribución de los DF, la iluminancia natural, artificial e híbrida (total) interior en el recinto. Los modelos propuestos en este trabajo de investigación son de tipo matricial y están basados en la fundamentación teórica y matemática de la Sección 4.1, la experimentación descrita en el Capítulo 3 y en el desarrollo matemático de un profesor del Grupo de Investigación GISEL<sup>30</sup>.

La metodología para la formulación de los modelos experimentales obtenidos para los dos espacios es similar.

#### Daylight factor (DF)

El DF es la relación porcentual de la iluminancia natural interna referida a la iluminancia natural externa [5], que en esta investigación se ha tomado como la iluminancia incidente en fachada sur para los dos casos de estudio. Con base en esto, el DF fue modelado como una matriz  $DF_{prom_{n \times m}}$  donde cada uno de sus elementos  $df_{prom_{(i,j)}}$  (%) (correspondiente a cada punto x,y del mallado) es definido por la ecuación (4.3) para la Sala de reuniones y ecuaciones (4.4) y (4.5) para el aula IE 305.

$$df_{prom_{SR(i,j)}} = \left( \frac{\sum_{t=1}^{nt} \frac{e_{D_{med\_SR(i,j)}}(t)}{E_{E_{med\_SR}}(t)}}{nt} \right) \cdot 100(\%) \quad (4.3)$$

$$df_{prom_{305\_se(i,j)}} = \left( \frac{\sum_{k=1}^{nt} \frac{e_{D_{med\_305se(i,j)}}(t)}{E_{E_{med\_se}}(t)}}{nt} \right) \cdot 100(\%) \quad (4.4)$$

---

<sup>30</sup> Desarrollo matemática durante los estudios doctorales del profesor German Osma, profesor de planta UIS y codirector de este trabajo de investigación.

$$df_{prom_{305\_so}(i,j)} = \left( \frac{\sum_{t=1}^{nt} \frac{e_{D_{med\_305so}(i,j)}(t)}{E_{E_{med\_so}}(t)}}{nt} \right) \cdot 100(\%) \quad (4.5)$$

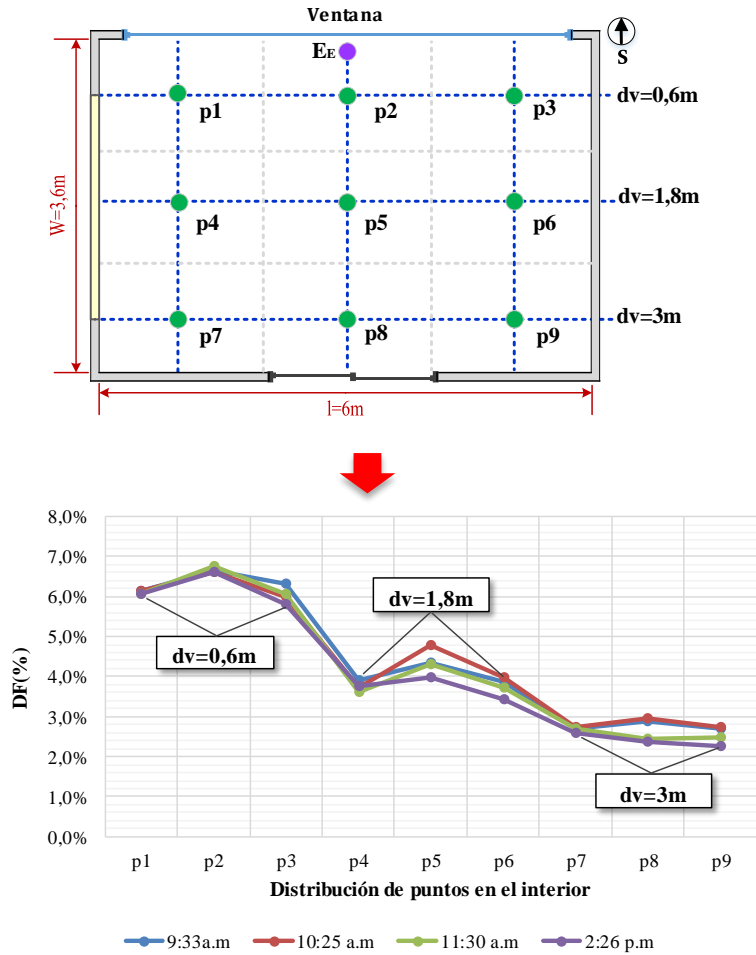
Donde  $e_{D_{(i,j)}}(t)$  es el elemento de la matriz de iluminancia natural interior medida para un instante de tiempo  $t$  en cada punto del mallado  $(i,j)$ ,  $E_{E_{med}}(t)$  es el valor de la iluminancia natural exterior incidente en la ventana medida en el instante de tiempo  $t$ ,  $nt$  corresponde al número de mediciones de iluminancia por punto. Es importante indicar que para la obtención del DF las medidas de iluminancia natural interior para un punto  $(i,j)$  y exterior fueron tomadas de manera simultánea. Estas mediciones deben ser realizadas en ausencia de luz artificial.

El aula IE305 se caracteriza por tener una columna de casi un (1) metro de profundidad entre las dos ventanas de la fachada sur y por la existencia de un cortasol exterior que cubre la ventana sureste; lo que ocasiona una diferencia notable en el nivel y la distribución de la penetración la iluminancia natural al recinto. Por tal motivo, las ventanas se modelaron como dos fuentes independientes a partir de los factores  $df_{prom_{305\_se}(i,j)}$  y  $df_{prom_{305\_so}(i,j)}$  asociadas a las ventanas sureste y suroeste, respectivamente.  $E_{E_{med\_se}}(t)$  y  $E_{E_{med\_so}}(t)$  son la iluminancia natural exterior medida en las ventanas sureste y suroeste, respectivamente.

Según Galvis y Expósito [69], el DF en cada punto tiende a ser constante como muestra la Figura 43; por tal razón se asume un comportamiento cuasi estable durante el día, lo cual permite obtener un promedio del DF por punto del espacio (ver Figura 44).

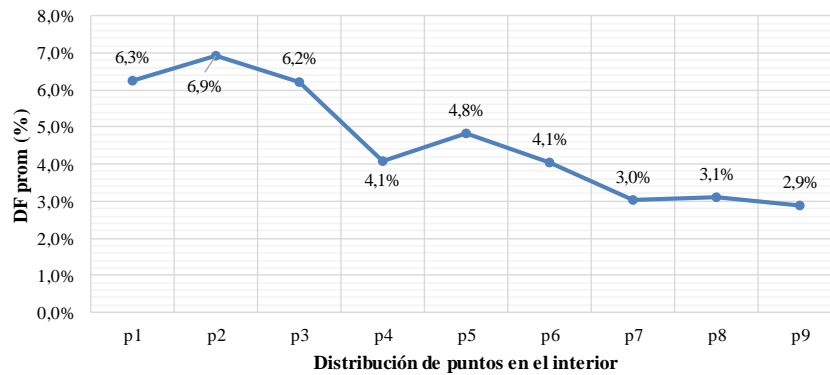
Por otra parte, los resultados obtenidos indican que el DF varía de acuerdo a la posición geométrica  $(p(x,y))$  dentro del recinto, los valores más altos se dan en puntos cercanos a la ventana y a medida que se aleja de ésta el DF decae, lo cual se puede apreciar mejor en los diagramas de barras de las figuras 45, 46 y 47, correspondientes al  $DF_{prom_{n \times m}}$  del aula IE 305 y sala de reuniones.

Figura 43. DF horario– Sala de reuniones, respecto a la radiación en la fachada sur. \*dv: Distancia desde la ventana.



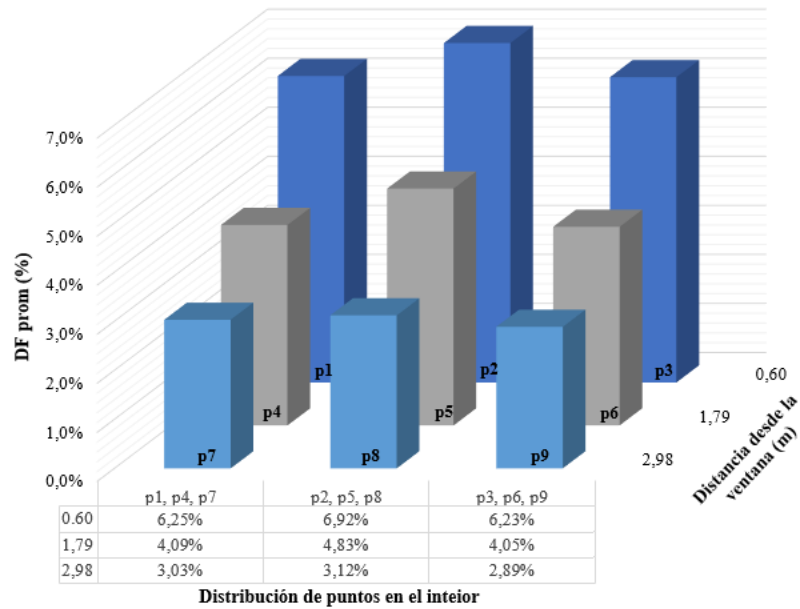
Fuente: Elaboración propia

Figura 44. DF promedio – Sala de reuniones, respecto a la radiación en fachada sur.



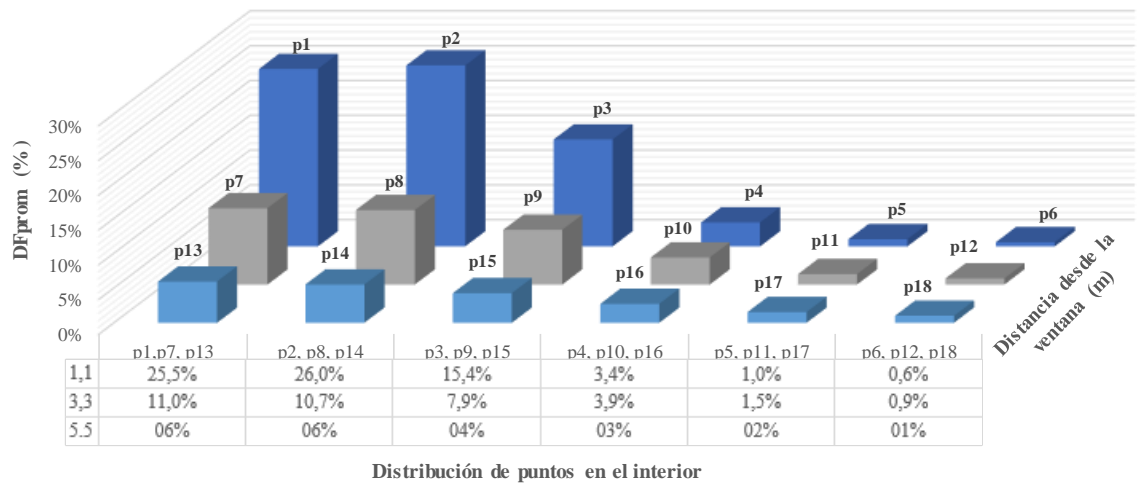
Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Distribución de  $DF_{promSRn \times m}$  - sala de reuniones.

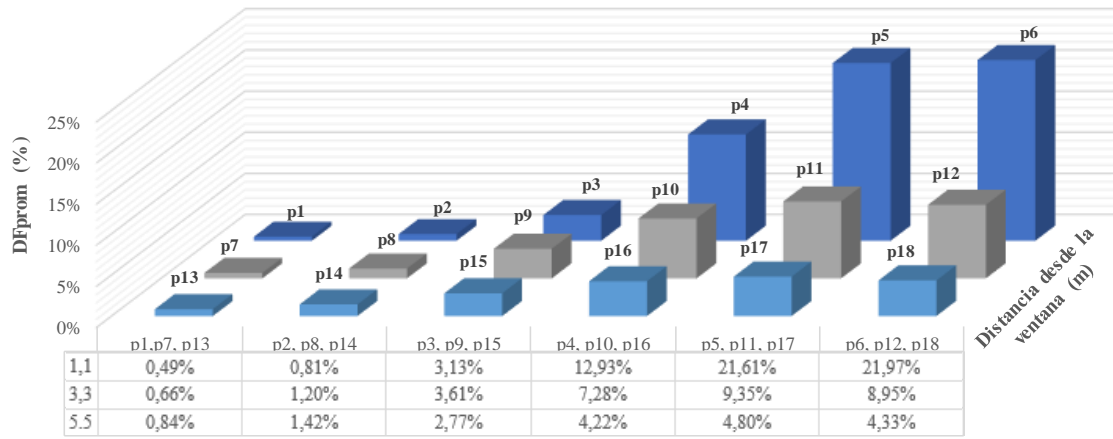


Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Distribución del  $DF_{prom305,se \times m}$  del Aula IE 305 – ventana sureste.



Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Distribución del  $DF_{prom_{305,so_{n \times m}}}$  del Aula IE 305 – ventana suroeste.

Distribución de puntos en el interior

Fuente: Elaboración propia

### Iluminancia natural interior

Los elementos de la matriz de iluminancia natural interior  $E_{D_{est_{n \times m}}}(t)$  (lux) en cada punto del mallado son estimados para cada instante de tiempo por medio de la ecuación (4.6) para sala de reuniones. Mientras que para el aula IE 305, éstos son obtenidos a partir de la ecuación (4.7), como la suma de las contribuciones de iluminancia de la venta sureste y suroeste en cada punto de la superficie de trabajo.

$$e_{D_{est_{SR}(i,j)}}(t) = E_{E_{med_{SR}}}(t) \cdot df_{prom_{SR}(i,j)} \quad (4.6)$$

$$e_{D_{est_{305}(i,j)}}(t) = e_{D_{est_{305se}(i,j)}}(t) + e_{D_{est_{305so}(i,j)}}(t) \quad (4.7)$$

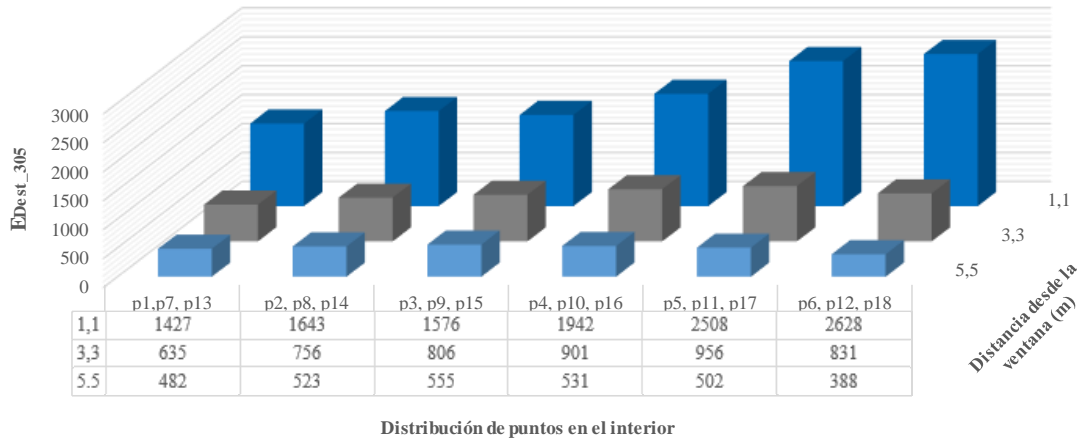
Donde  $e_{D_{est_{305se}(i,j)}}(t)$  y  $e_{D_{est_{305so}(i,j)}}(t)$  son los elementos de la matriz de contribución estimada de iluminancia natural generados por la ventana sureste y ventana suroeste para un mismo instante de tiempo, respectivamente. Estos son definidos por las ecuaciones (4.8) y (4.9).

$$e_{D_{est_{305se}(i,j)}}(t) = E_{E_{med_{se}}}(t) \cdot df_{prom_{305_{se}(i,j)}} \quad (4.8)$$

$$e_{D_{est\_305so}(i,j)}(t) = E_{E_{med\_so}}(t) \cdot df_{prom_{305\_so}(i,j)} \tag{4.9}$$

Es importante indicar que la iluminancia natural interior  $E_{D_{est_{n \times m}}}(t)$  varía con el tiempo y la posición geométrica dentro del recinto. Por ejemplo, utilizando las ecuaciones (4.7) – (4.9) para una hora de sol cualquiera, donde la iluminancia exterior en el aula IE 305 es de 6350 lux en la ventana sureste y 14440 lux en la ventana suroeste, se obtiene la distribución de iluminancia natural interior del espacio  $E_{D_{est_{305n \times m}}}(t)$  que se muestra en la Figura 48.

Figura 48. Distribución de la iluminancia natural interior  $E_{D_{est_{n \times m}}}(t)$  en el aula IE 305 para un valor de iluminancia exterior determinado.



Distribución de puntos en el interior

Fuente: Elaboración propia

### Iluminancia artificial interior máxima

La iluminancia artificial interior máxima se da cuando todas las luminarias del recinto que conforman un solo grupo de control (es el caso de los dos casos de estudio), se encuentran encendidas al 100% de su intensidad. Bajo este escenario fue registrada en cada punto (x,y) del mallado, la iluminancia artificial producida por las doce luminarias On/Off del aula IE 305 y las cuatro luminarias dimerizables de sala de reuniones. Estas medidas son presentadas como matrices de iluminancia artificial  $E_{A_{med_{305n \times m}}}$  (lux) y  $E_{A_{med_{SRn \times m}}}$  (lux) del aula IE 305 y la sala de reuniones, respectivamente:

$$E_{A_{med\_305_{3 \times 6}}} = \begin{bmatrix} 392 & 409 & 416 & 435 & 428 & 392 \\ 465 & 504 & 498 & 491 & 495 & 448 \\ 612 & 648 & 632 & 652 & 666 & 574 \end{bmatrix} \quad E_{A_{med\_SR_{3 \times 3}}} = \begin{bmatrix} 322 & 461 & 301 \\ 588 & 821 & 535 \\ 553 & 763 & 530 \end{bmatrix}$$

Los valores de la matriz  $E_{A_{med\_SR_{3 \times 3}}}$  fueron medidos cuando las luminarias dimerizables estaban al 100% de su intensidad, es decir bajo una tensión de control de dimerización  $DV=10Vdc$ .

### Iluminancia total interior

Los elementos de la matriz de iluminancia total interior  $E_{T_{n \times m}}(t)$  (lux) estimados para un tiempo  $t$  en cada uno de los puntos del mallado del aula IE 305 y la sala de reuniones están dados por la ecuación (4.10) y ecuación (4.11), respectivamente. Donde  $e_{A_{ac}(i,j)}(t)$  son los elementos de la matriz de iluminancia artificial producida por la luz eléctrica, que aportan las luminarias de acuerdo a la alternativa de control de iluminación eléctrica de cada espacio  $E_{A_{ac_{n \times m}}}(t)$ .

$$e_{T_{305}(i,j)}(t) = e_{D_{est\_305}(i,j)}(t) + e_{A_{ac\_305}(i,j)}(t) \quad (4.10)$$

$$e_{T_{SR}(i,j)}(t) = e_{D_{est\_SR}(i,j)}(t) + e_{A_{ac\_SR}(i,j)}(t) \quad (4.11)$$

### Iluminancia artificial de acuerdo a la alternativa de control de cada espacio

La matriz de iluminancia artificial de acuerdo a la alternativa de control  $E_{A_{ac_{n \times m}}}(t)$  representa la iluminancia resultante incidente sobre la superficie de trabajo debida al ajuste de la salida de luz de las luminarias realizado por la alternativa de control de cada espacio, la cual define la dinámica de operación de las luminarias. Este ajuste es realizado en función de las consignas de operación de las luminarias, las cuales se basan en factores tales como ocupación, disponibilidad de luz natural, estado de operación de las luminarias en el instante de tiempo  $(t - 1)$  y  $(t)$ , nivel mínimo de iluminancia y la iluminancia artificial sobre la superficie de trabajo, producto de la dimerización de las luminarias cuando éstas son dimerizables.

• **Aula IE 305**

Los valores de  $E_{A\_ac305n \times m}(t)$  (lux) para el aula IE 305 están definidos por las siguientes consignas de operación:

$$E_{A\_ac305n \times m}(t) = 0$$

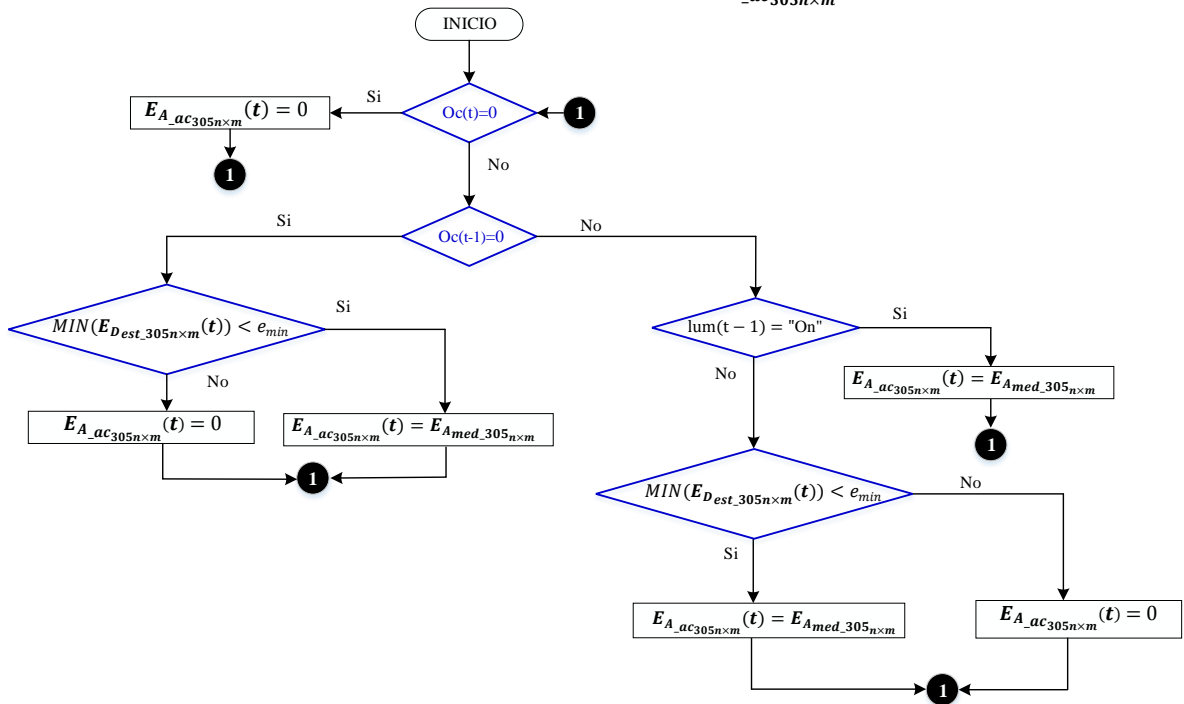
$$\begin{cases} O_C(t) = 0; \\ O_C(t) = 1 \wedge O_C(t-1) = 0 \wedge MIN(E_{D_{est\_305n \times m}}(t)) > e_{min}; \\ O_C(t) = 1 \wedge O_C(t-1) = 1 \wedge lum(t-1) = "Off" \wedge MIN(E_{D_{est\_305n \times m}}(t)) > e_{min} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$E_{A\_ac305n \times m}(t) = E_{A_{med\_305n \times m}}$$

$$\begin{cases} O_C(t) = 1 \wedge O_C(t-1) = 0 \wedge MIN(E_{D_{est\_305n \times m}}(t)) < e_{min}; \\ O_C(t) = 1 \wedge O_C(t-1) = 1 \wedge lum(t-1) = "On"; \\ O_C(t) = 1 \wedge O_C(t-1) = 1 \wedge lum(t-1) = "Off" \wedge MIN(E_{D_{est\_305n \times m}}(t)) < e_{min} \end{cases} \quad (4.13)$$

Estas condiciones son representadas mediante el diagrama de flujo de la Figura 49.

Figura 49. Diagrama de flujo para determinar los valores de  $E_{A\_ac305n \times m}(t)$  (lux) del aula IE 305.



Fuente: Elaboración propia

Donde  $O_c(t)$  y  $O_c(t - 1)$  son el estado actual y el estado anterior de la ocupación, respectivamente. Estos estados pueden tomar valores de 1 (ocupación) o 0 (no ocupación).  $MIN(E_{D_{est\_305n \times m}}(t))$  es el elemento de menor valor de la matriz de iluminancia natural estimada obtenida a partir de la ecuación (4.7).  $e_{min}^{31}$  es el valor mínimo de iluminancia que debe ser garantizado sobre la superficie de trabajo, que según el RETILAP [87] puede ser establecido entre un rango de 300 - 750 lux, para este caso se ha definido en 400 lux.  $lum(t - 1)$  es el estado de operación On/Off de las luminarias en  $t - 1$ .

- **Sala de reuniones**

La iluminancia  $E_{A\_acSRn \times m}(t)$  (lux) de la Sala de reuniones depende de (i) la matriz de iluminancia artificial requerida  $E_{A_{reqn \times m}}(t)$  (lux) cuando la luz natural no es suficiente para cumplir con un  $e_{min} = 435$  lux [87] y (ii) la relación entre la iluminancia artificial sobre la superficie de trabajo, producto de la dimerización de las luminarias  $E_{ADST}$  y la tensión de control de dimerización  $DV$ .

Los valores de los elementos de la matriz  $E_{A_{reqn \times m}}(t)$  para un instante de tiempo  $t$  son obtenidos a partir las siguientes condiciones:

$$e_{A_{req(i,j)}}(t) = e_{min} - MIN(e_{D_{est\_SR(2,1)}}(t); e_{D_{est\_SR(2,3)}}(t)) \quad (4.14)$$

$$\{O_c(t) = 1 \wedge MIN(e_{D_{est\_SR(2,1)}}(t); e_{D_{est\_SR(2,3)}}(t)) < e_{min}$$

$$e_{A_{req(i,j)}}(t) = 0 \begin{cases} O_c(t) = 0; \\ O_c(t) = 1 \wedge MIN(e_{D_{est\_SR(2,1)}}(t); e_{D_{est\_SR(2,3)}}(t)) > e_{min} \end{cases} \quad (4.15)$$

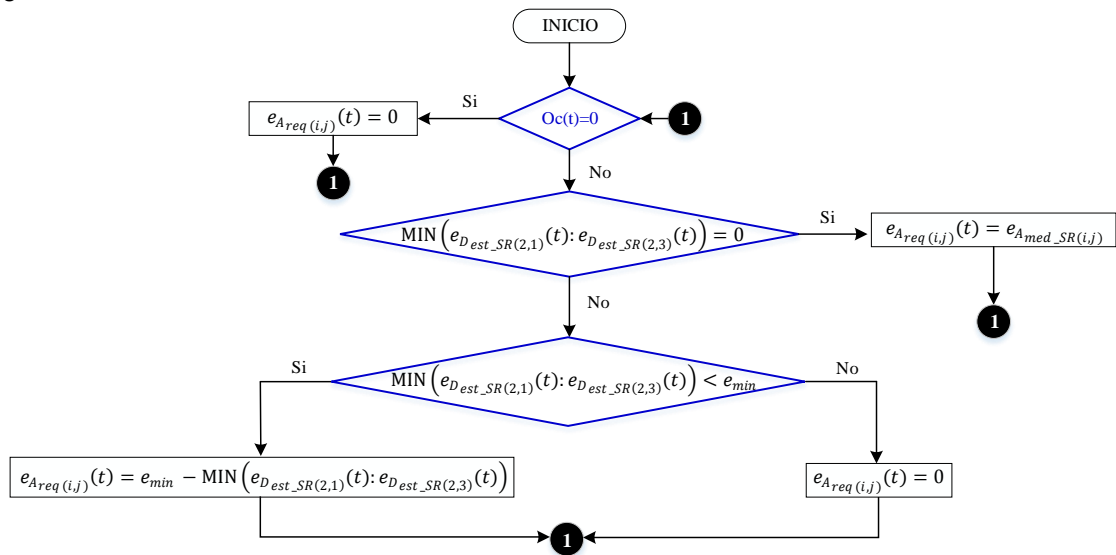
---

<sup>31</sup> De acuerdo al RETILAP [87], el valor de  $e_{min}$  puede ser establecido entre un rango de 300 -750 lux, tanto para aulas como para oficinas con divisiones piso-techo, como por ejemplo la sala de reuniones.

$$e_{Areq(i,j)}(t) = e_{Amed\_SR(i,j)} \left\{ Oc(t) = 1 \wedge \text{MIN} \left( e_{D\_est\_SR(2,1)}(t) : e_{D\_est\_SR(2,3)}(t) \right) = 0 \right. \quad (4.16)$$

Estas condiciones son representadas mediante el diagrama de flujo de la Figura 50. Donde  $\text{MIN} \left( e_{D\_est\_SR(2,1)}(t) : e_{D\_est\_SR(2,3)}(t) \right)$  es el mínimo valor de la segunda fila de la matriz de iluminancia natural estimada de la sala de reuniones,  $E_{D\_est\_SR_{n \times m}}(t)$  – las tres posiciones  $(i,j)$  que componen esta fila corresponde con los puntos del mallado de medición  $p4$ ,  $p5$  y  $p6$  ubicados sobre la superficie de trabajo (mesa de reuniones), en los cuales se debe cumplir siempre el valor mínimo de iluminancia  $e_{min} = 435 \text{ lux}$ . La posición del elemento resultante de  $\text{MIN} \left( e_{D\_est\_SR(2,1)}(t) : e_{D\_est\_SR(2,3)}(t) \right)$  coincide con el punto del mallado denominado como punto crítico  $pc$  de menor iluminancia natural.

Figura 50. Diagrama de flujo para determinar los valores de  $E_{Areq_{n \times m}}(t)$  (lux) de la sala de reuniones



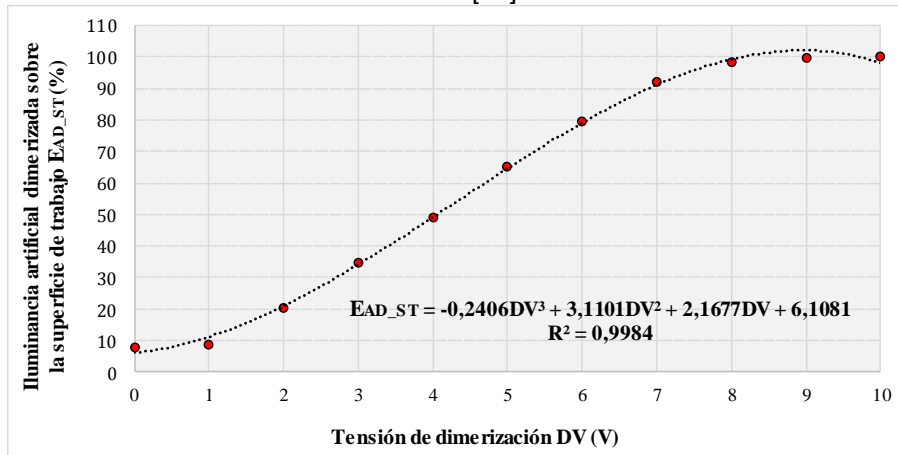
Fuente: Elaboración propia

La relación entre la iluminancia artificial sobre la superficie de trabajo, producto de la dimerización de las luminarias,  $E_{AD_{ST}}$ , dada en porcentaje y la tensión de control

de dimerización,  $DV$ , cuyo valor varía entre 0 Vdc y 10 Vdc, es definida por la ecuación (4.17), la cual fue obtenida a partir de una regresión polinómica de los datos de iluminancia artificial medida según los puntos del mallado, expresados como un porcentaje de la iluminancia artificial máxima registrada en estos mismos puntos, variando de 0 a 10 Vdc la tensión de control de las luminarias. La Figura 51 muestra la curva que describe la ecuación (4.17) [38].

$$E_{AD_{ST}} = -0,2406DV^3 + 3,1101DV^2 + 2,1677DV + 6,1081 \text{ (\%)} \quad (4.17)$$

Figura 51. Iluminancia artificial dimerizada sobre la superficie de trabajo en porcentaje vs tensión de control de dimerización de la sala de reuniones [38].



Fuente: Elaboración propia

Donde  $E_{AD_{ST}}(t)$  está dada por la ecuación (4.18) y es definida para cada instante de tiempo  $t$  como la razón porcentual entre el valor de la iluminancia artificial requerida  $e_{Areq(i,j)}(t)$  y el valor del elemento de la matriz de iluminancia artificial  $E_{Amed\_SR_{n \times m}}$ , cuya posición coincide con la posición del punto crítico  $pc$  de menor iluminancia natural sobre la mesa de reuniones,  $\text{MIN}(e_{D_{est\_SR(2,1)}}(t); e_{D_{est\_SR(2,3)}}(t))$ .

$$E_{AD_{ST}}(t) = \frac{e_{Areq(i,j)}(t)}{e_{Amed\_SR(i,j) \rightarrow \text{MIN}(e_{D_{est\_SR(2,1)}}(t); e_{D_{est\_SR(2,3)}}(t))}} \cdot 100\% \quad (4.18)$$

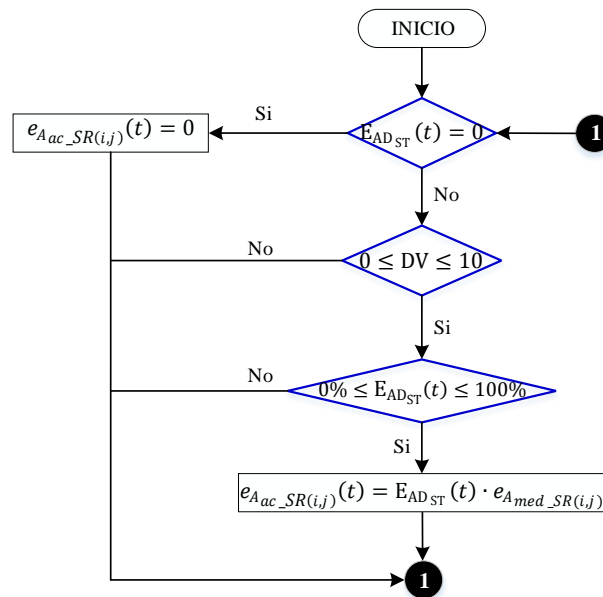
Evaluando en la ecuación (4.17) el valor de  $E_{AD_{ST}}$  para un instante de tiempo  $t$ , es posible calcular la tensión de dimerización  $DV$  que produce ese porcentaje de iluminación artificial requerida, que es el mismo para todas las luminarias, ya que todas conforman un solo grupo de control donde éstas operan al mismo tiempo e intensidad lumínica. Solo entonces, se puede determinar los elementos del modelo matricial  $E_{A_{ac_{SRn \times m}}}(t)$  (lux) para la sala de reuniones a partir de  $DV$  y las siguientes condiciones:

$$e_{A_{ac_{SR}(i,j)}}(t) = 0 \begin{cases} 0 \leq DV \leq 1 \\ 0\% \leq E_{AD_{ST}}(t) \leq 6\% \end{cases} \quad (4.19)$$

$$e_{A_{ac_{SR}(i,j)}}(t) = E_{AD_{ST}}(t) \cdot e_{A_{med_{SR}(i,j)}} \begin{cases} 1 < DV \leq 10 \wedge 6\% < E_{AD_{ST}}(t) \leq 100\% \end{cases} \quad (4.20)$$

Estas condiciones son representadas mediante el diagrama de flujo de la Figura 52.

Figura 52. Diagrama de flujo para determinar los valores de  $E_{A_{ac_{SRn \times m}}}(t)$  (lux) de la Sala de reuniones.



Fuente: Elaboración propia

Las luminarias son dimerizadas entre un 10% a 100% de su intensidad luminosa bajo una tensión de control de dimerización (DV) de 0-10 Vdc, razón por la cual la iluminancia artificial sobre la superficie de trabajo  $E_{AD_{ST}}$  en porcentaje, se comporta según la curva de la Figura 51, que describe la ecuación (4.17). Cuando DV=0 Vdc, la intensidad luminosa es la mínima que pueden aportar las luminarias, 10%, la cual produce un porcentaje de iluminancia artificial sobre la superficie de trabajo  $E_{AD_{ST}} = 6,1081\%$ , siendo éste el mínimo valor que puede presentarse a partir de la dimerización de las luminarias. Asimismo, cuando  $E_{AD_{ST}}$  se encuentra en el intervalo  $0\% \leq E_{AD_{ST}} \leq 6,1081\%$ , la tensión de dimerización DV sigue siendo igual a cero y se observa que  $E_{AD_{ST}}$  siempre tomará el valor de 6,1081%, debido a que la luminaria no puede aportar un valor menor al 10% de su intensidad para producir porcentajes de iluminancias menores que 6,1081%. Por otra parte, se muestra según la curva de la Figura 51 que para un tensión de dimerización entre  $0 \text{ Vdc} < DV \leq 10 \text{ Vdc}$ ,  $E_{AD_{ST}}$  toma valores entre  $6,1081\% < E_{AD_{ST}} \leq 100\%$ .

Con el objetivo de validar los modelos matriciales propuestos, se realizó una comparación entre las iluminancias totales interiores  $E_{T_{n \times m}}(t)$  (lux) medidas y estimadas (ver figuras 53 a 57) para ambos casos de estudio, a partir de los siguientes indicadores: raíz cuadrada del error medio cuadrático normalizado (NRMSE – *Normalized root mean square error*), coeficiente de variación (CV – *Coefficient of variation*) y promedio del error absoluto (MAE – *Mean absolute error*), cuyas expresiones de cálculo están dadas por las ecuaciones (4.21), (4.22) y (4.23), donde  $e_{T_{med(i,j)}}(t)$  y  $e_{T_{est(i,j)}}(t)$  corresponde al valor de iluminancia total interior medida y estimada,  $MAX(E_{T_{med_{n \times m}}}(t))$  y  $MIN(E_{T_{med_{n \times m}}}(t))$  son los valores máximo y mínimo de la iluminancia total interior medida,  $\overline{E_{T_{med}}}$  es el valor promedio de la iluminancia total interior medida, y  $n$  es el número de datos de iluminancia total interior en cada espacio de acuerdo a el número de puntos del mallado de medición ( $n = 18$  para el aula IE 305 y  $n = 9$  para la Sala de reuniones). Adicionalmente, en la

Figura 55 y Figura 58 se muestra el error relativo ER para cada caso, el cual es determinado por medio de la ecuación (4.24).

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( e_{T\_med(i,j)}(t) - e_{T\_est(i,j)}(t) \right)^2}{n}}}{MAX \left( E_{Tmed_{n \times m}}(t) \right) - MIN \left( E_{Tmed_{n \times m}}(t) \right)} \cdot 100 \tag{4.21}$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( e_{T\_med(i,j)}(t) - e_{T\_est(i,j)}(t) \right)^2}{n}}}{E_{Tmed}} \cdot 100 \tag{4.22}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| e_{T\_med(i,j)}(t) - e_{T\_est(i,j)}(t) \right| \tag{4.23}$$

$$ER = \frac{e_{T\_med(i,j)}(t) - e_{T\_est(i,j)}(t)}{e_{T\_med(i,j)}(t)} \cdot 100 \tag{4.24}$$

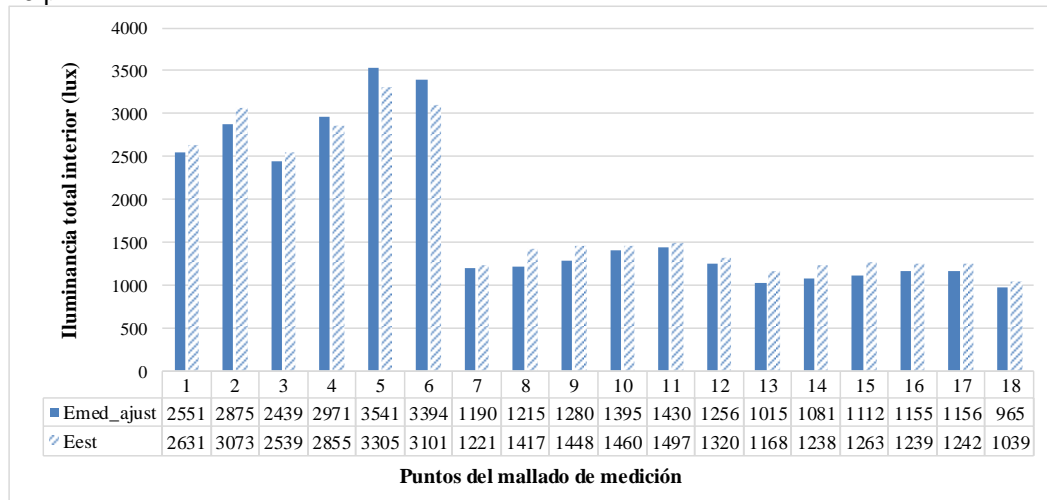
• **Aula IE 305**

Tabla 20. Medidas de error de la estimación de la iluminancia total interior en el aula IE 305

	<b>NRMSE</b>	<b>CV</b>	<b>MAE</b>
2:49 p.m.	5,67%	8,2%	129,12 lux
3:50 p.m.	7,38%	5,6%	52,42 lux

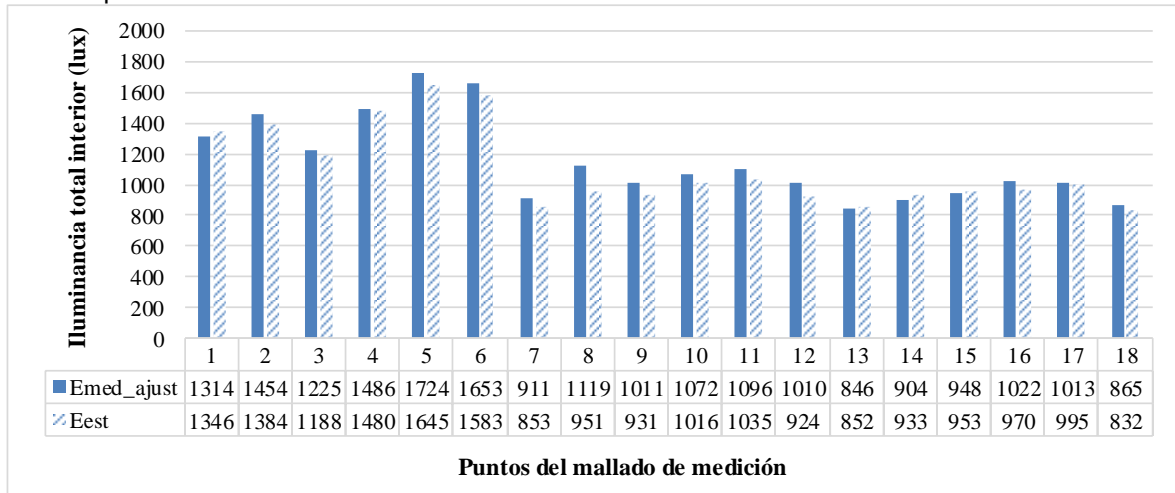
Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Comparación entre la Iluminancia total interior estimada y la medida del aula IE 305 a las 2:49 p.m.



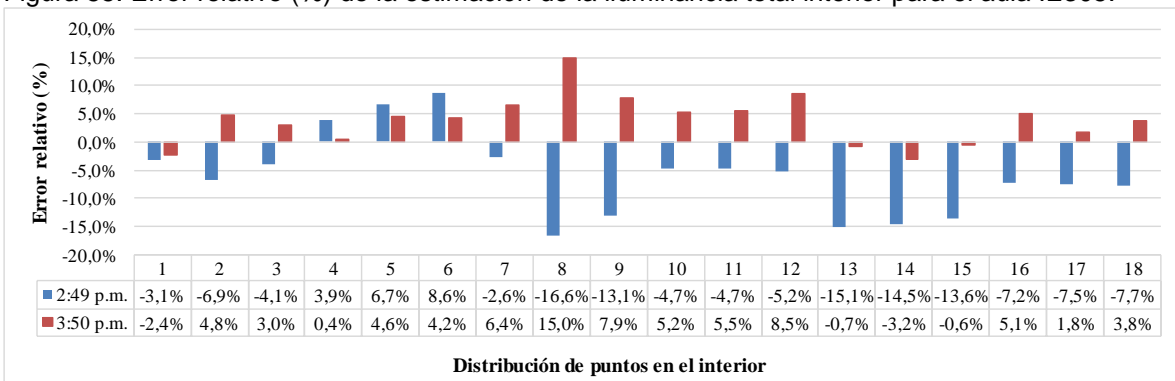
Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Comparación entre la Iluminancia total interior estimada y la medida del aula IE 305 a las 3:50 p.m.



Fuente: Elaboración propia

Figura 55. Error relativo (%) de la estimación de la iluminancia total interior para el aula IE305.



Fuente: Elaboración propia

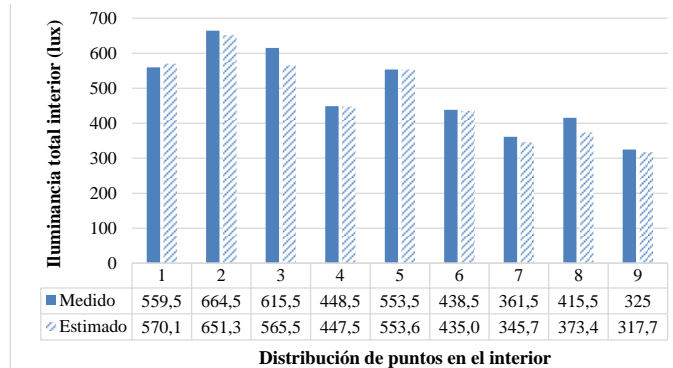
- **Sala de reuniones**

Tabla 21. Medidas de error de la estimación de la iluminancia total interior en la sala de reuniones

	NRMSE	CV	MAE
3:22 p.m.	6,9%	4,8%	15,96 lux
4:19 p.m.	10,5%	5,3%	23,23 lux

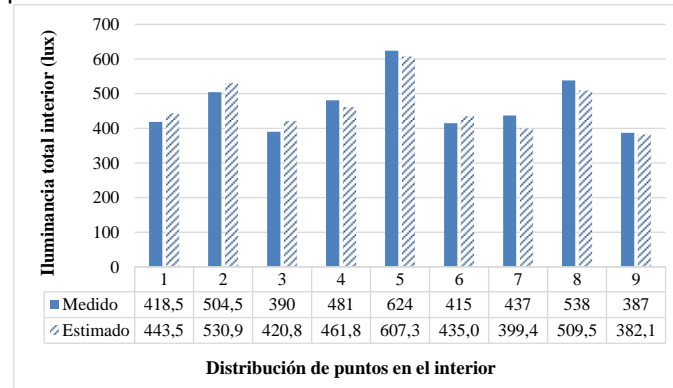
Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Comparación entre la Iluminancia total interior estimada y la medida de la sala de reuniones a las 3:22 p.m.



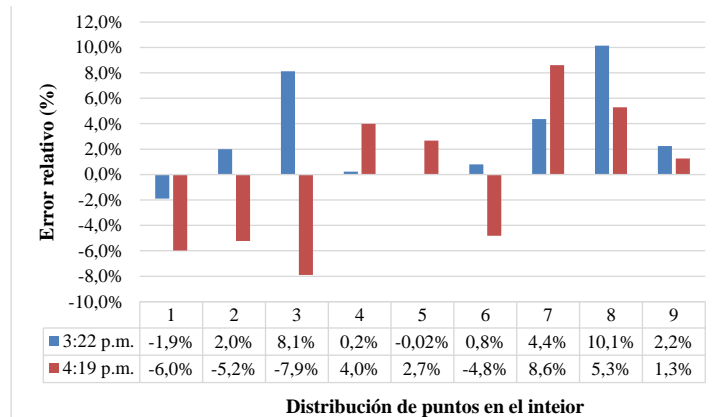
Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Comparación entre la Iluminancia total interior estimada y la medida de la sala de reuniones a las 4:19 p.m.



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Error relativo (%) de la estimación de la iluminancia total interior para la sala de reuniones



Fuente: Elaboración propia

Con base en la comparación presentada entre la iluminancia total interior medida y la estimada para cada espacio y las medidas de error (NRMSE, CV, MAE y error relativo), la validación de los modelos puede ser considerada como satisfactoria.

#### 4.4. MODELADO DEL CONSUMO DE ENERGÍA

Esta sección aborda la estimación del consumo energético horario de los sistemas de iluminación híbrida de los casos de estudio seleccionados, aula IE 305 y Sala de reuniones. El consumo de potencia y el tiempo de servicio de las luminarias se determinan con base en la necesidad de la iluminación artificial, para lo cual se emplea el modelado experimental de iluminancia ya presentado.

##### Potencia

- **Aula IE 305**

La potencia total consumida de cada uno de los elementos de alimentación eléctrica del sistema de iluminación híbrida (SIH) del aula IE 305 es calculada a partir de las siguientes ecuaciones:

– *Potencia total de las luminarias  $P_{t\_lu\_305}(W)$ :*

$$P_{t\_lu\_305} = n_{lu} \cdot P_{nom\_lu} \quad (4.25)$$

Donde  $n_{lu}$  es el número de luminarias del sistema y  $P_{nom\_lu}(W)$  es la potencia nominal de la luminaria dada por la ecuación (4.26)

$$P_{nom\_lu} = (n_{la} \cdot P_{la}) + (n_{ba} \cdot P_{ba}) \quad (4.26)$$

Donde  $P_{la}(W)$  es la potencia de cada lámpara,  $P_{ba}(W)$  es la potencia de cada balasto,  $n_{la}$  y  $n_{ba}$  es el número de lámparas y de balastos, respectivamente.

- Potencia total de los power pack que alimentan los sensores de ocupación con fotocelda incluida  $P_{t_{Pso\_fi_{305}}}$  (W):

$$P_{t_{Pso\_fi_{305}}} = n_{Pso\_fi} \cdot P_{Pso\_fi_{305}} \quad (4.27)$$

$P_{Pso\_fi_{305}}$  es la potencia de un *power pack* y  $n_{Pso\_fi}$  es el número de *power packs* del sistema.

- **Sala de reuniones**

La potencia total consumida por el SIH de la Sala de reuniones para cada uno de los elementos que lo componen es determinada por las siguientes ecuaciones:

- Potencia total de las luminarias  $P_{t_{lu\_SR}}$  (W):

Con el objetivo de estimar la potencia total consumida por las luminarias fluorescente dimerizables del sistema se ha planteado el modelo de la ecuación (4.28).

$$P_{t_{lu\_SR}} = n_{lu} \cdot P_{lu}(t) \quad (4.28)$$

Donde  $n_{lu}$  corresponde al número de luminarias del espacio,  $P_{lu}(t)$  es la potencia consumida por cada luminaria para un instante de tiempo  $t$ , la cual varía con el tiempo debido a la dimerización. Los valores de  $P_{lu}(t)$  están dados por las siguientes condiciones

$$P_{lu}(t) = 0 \{lum(t) = \text{"Off"}\} \quad (4.29)$$

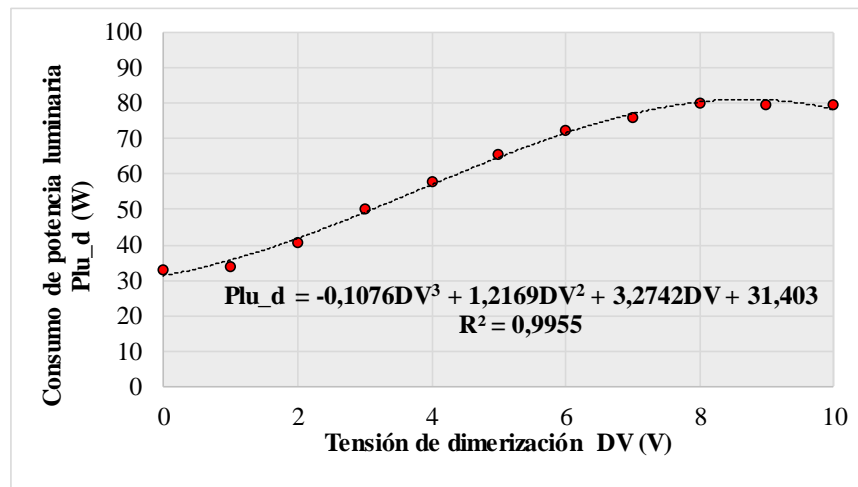
$$P_{lu}(t) = P_{lu,d} \{lum(t) = \text{"On"}\} \quad (4.30)$$

$lum(t)$  es el estado de operación de la luminaria en el instante de tiempo  $t$ ,  $P_{lu\_d}$  (W) es la potencia consumida dependiente de la dimerización de la luminaria y es definida por la expresión (4.31). Esta expresión describe la potencia  $P_{lu\_d}$  como una función cubica del voltaje de dimerización  $DV$  de los balastos de las luminarias. Dicha función fue estimada a partir de la regresión polinómica de las mediciones de potencia de la luminaria dimerizable, obtenidas a través de un analizador de red DRANETZ<sup>32</sup> para diversos valores de tensión de dimerización  $0 \text{ Vdc} \leq DV \leq 10 \text{ Vdc}$ . La curva que representa dicha función es mostrada por la Figura 59 [38].

$$P_{lu\_d} = -0,108DV^3 + 1,217DV^2 + 3,274DV + 31,403 \quad (4.31)$$

Al evaluar la tensión de dimerización  $DV$  (hallada en la sección 4.3.5) en la ecuación (4.31) para un instante de tiempo  $t$ , es posible estimar la potencia correspondiente a la tensión de control de operación de la luminaria en estado On.

Figura 59. Curva de la potencia consumida por una luminaria dimerizable.



Fuente: Elaboración propia

<sup>32</sup> Equipo prestado por la E3T (Laboratorio de Máquinas Eléctricas)

- Potencia total de los power packs que alimentan los sensores de ocupación  $P_{t_{PSO\_SR}}(W)$ :

$$P_{t_{PSO\_SR}} = P_{PSO} \cdot n_{PSO} \quad (4.32)$$

$P_{PSO}$  es la potencia de un *power pack* y  $n_{PSO}$  es el número de *power packs* del sistema.

- Potencia total de los power packs que alimentan las fotoceldas dimerizables  $P_{t_{fd}}(W)$ :

$$P_{t_{P\_fd}} = P_{P\_fd} \cdot n_{P\_fd} \quad (4.33)$$

$P_{P\_fd}$  es la potencia de un *power pack* y  $n_{P\_fd}$  es el número de *power packs* del sistema.

- Potencia total de la unidad de control  $P_{t_{Uc}}(W)$ :

$$P_{t_{Uc}} = P_{Uc} \cdot n_{Uc} \quad (4.34)$$

$P_{Uc}$  es la potencia de la Unidad de control, que para este caso se trata de una controladora *Andover Continuum* y  $n_{Uc}$  es el número de unidades de control.

### Cálculo de la energía total consumida por el SIH

- **Aula IE 305**

El consumo diario de energía del SIH del aula IE 305  $E_{cT\_305}$  (W/hr) se realiza por medio de la ecuación (4.35)

$$E_{cT\_305} = P_{t_{lu\_305}} \cdot h_T + P_{t_{PSO\_fi305}} \cdot 24hr \quad (4.35)$$

$h_T$  es el total de horas de operación de las luminarias, el cual es estimado a partir de las siguientes ecuaciones:

$$h_i = 1 \quad \left\{ \forall e_{A\_ac305(i,j)} \in E_{A\_ac305n \times m}(t) \neq 0 \right. \quad (4.36)$$

$$h_i = 0 \quad \left\{ \forall e_{A\_ac305(i,j)} \in E_{A\_ac305n \times m}(t) = 0 \right. \quad (4.37)$$

$$h_T = \sum_{i=1}^n h_i \quad (4.38)$$

$h_i$  se refiere a una hora durante la cual las luminarias están encendidas y  $e_{A\_ac305(i,j)}$  representa cada uno de los elementos de la matriz de iluminancia artificial para el aula IE 305,  $E_{A\_ac305n \times m}(t)$

El sensor de ocupación con fotocelda incluida *so\_fi* opera las 24 horas.

- **Sala de reuniones**

El consumo diario de energía del SIH de la Sala de reuniones  $E_{cT_{SR}}$  (W/hr) está dado por la ecuación (4.39)

$$E_{cT_{SR}} = \sum_{i=1}^{NT} P_{t_{lu}_{SRi}} \cdot \Delta t + P_{t_{Pso}_{SR}} \cdot 24hr + P_{t_{Pfd}} \cdot 24hr + P_{t_{Uc}} \cdot 24hr \quad (4.39)$$

La energía consumida por las luminarias dimerizables varía en cada momento, debido a su operación de dimerización; razón por la cual se suma la energía consumida para cada periodo de tiempo ( $\Delta t$  hr), siendo NT el número total de periodos de tiempo. Esto con el fin de estimar la energía total consumida por las luminarias del sistema.

El sensor de ocupación  $s_o$ , la fotocelda dimerizable  $f_d$  y la unidad de control  $U_c$  operan las 24 horas.

#### **4.5. RESUMEN DE HALLAZGOS DEL MODELADO**

El modelado matricial propuesto se considera satisfactorio de acuerdo con los resultados de la validación, lo cual indica que puede ser usado como fundamentación para la formulación de un modelo de tipo general más robusto, aplicable a diferentes espacios y soluciones de SIH, bajo algunas restricciones.

Desde un punto de vista exploratorio, el desarrollo de este modelo permitió identificar los parámetros y variables que intervienen en la descripción del comportamiento lumínico y de consumo de energía de los casos de estudio, tales como la disponibilidad de luz natural a partir del DF, el efecto de las estrategias y técnicas de control sobre el uso de la iluminación eléctrica para lograr la integración con la iluminación natural en pro de reducir el consumo de energía eléctrica y en consecuencia un potencial ahorro económico.

## 5. MODELADO DE LOS SIH ALTERNATIVOS

---

Este capítulo expone el planteamiento matemático para determinar el número de configuraciones posibles,  $N_{cp}$ , de las  $NK$  luminarias de un recinto, que permiten, junto con el número de estrategias de control consideradas,  $N_{ec}$ , establecer el número de alternativas de control posibles,  $N_{SIH}$  (Sección 5.1). Por ejemplo, un recinto con  $NK = 4$  se caracterizará por  $N_{cp} = 15$  y si se considera  $N_{ec} = 4$  entonces se tendrá un  $N_{SIH} = 756$ ; si  $NK = 6$  entonces  $N_{cp} = 203$  que generará un  $N_{SIH} = 42\,399$  para un  $N_{ec} = 4$ .

Posteriormente, se procede a modelar la iluminancia interior y el consumo de potencia para cada alternativa de control con base en los hallazgos descritos en los capítulos 3 y 4 (Sección 5.2). Finalmente, se establecen consideraciones para la cuantificación de componentes (Sección 5.3), la estimación del costo financiero total según la alternativa de control (Sección 5.4) y la estructura de cálculo para la obtención de la solución de menor costo financiero (Sección 5.5).

La información complementaria relacionada con el modelado de los SIH se presenta en seis anexos (A a F). El Anexo A describe la obtención de dos tipos de factores considerados para estimar la iluminancia natural exterior sobre las ventanas,  $E_{E_w}(t)$ . El primer tipo es un factor de ponderación de la irradiación solar vertical,  $f_{pIS_w}$  que permite calcular la irradiación solar incidente sobre las ventanas,  $G_w(t)$  con base en la irradiación solar vertical,  $GV_{sur}(t)$ . El segundo tipo es el factor de conversión entre la irradiancia solar y la iluminancia producida por esta misma irradiancia,  $f_c$ . El

Anexo B expone la obtención de los perfiles de ocupación e irradiación solar característicos para los dos recintos analizados, usados para el cálculo del consumo energético anual por una alternativa de control potencial de un SIH,  $EAC_{ac}$ . Los anexos C y D presentan en detalle la formulación del problema de menor consumo potencia del SIH para un instante de tiempo dado, considerando dos configuraciones o agrupaciones de las luminarias. El Anexo E describe el uso de MATLAB y GAMS en este trabajo de investigación. MATLAB se emplea en la obtención de las configuraciones posibles de las luminarias, las alternativas de control posibles, la cuantificación del consumo energético y el costo financiero total de cada alternativa de control. El consumo energético diario de una alternativa de control cualquiera se determina a partir de la potencia consumida horaria; tal potencia se obtiene a partir de su formulación y solución como un problema de optimización no lineal entero mixto (MINLP) empleando GAMS. El Anexo F presenta un ejemplo de la cuantificación de componentes del SIH para una alternativa de control analizada.

## 5.1. CONFIGURACIONES DE LUMINARIAS Y ALTERNATIVAS DE CONTROL

Las maneras distintas en que las luminarias de un recinto pueden ser agrupadas en grupos de control se denomina número de particiones o configuraciones,  $N_{cp}$ . Una configuración de luminarias puede tener entre 1 y  $NK$  grupos de control, donde  $NK$  es el número de luminarias del recinto.

Un grupo de control (GC) es la agrupación de una o más luminarias. El número de grupos de control del recinto,  $N_{gc}$ , puede variar entre 1 y  $NK$ . La sumatoria de las luminarias de todos los grupos de control para una configuración dada debe ser  $NK$ , lo que puede ser expresado como  $\sum_{i=1}^{N_{gc}} n_{GC_i} = NK$ , donde  $n_{GC_i}$  es el número de luminarias de un grupo de control dado ( $GC_i$ ), y  $GC_i$  debe estar entre 1 y  $NK$ .

Se indica que solo hay un grupo de control cuando todas las luminarias son agrupadas en un solo circuito eléctrico y de control por lo que operan de igual manera

para cualquier instante de tiempo  $t$ ; para este caso  $n_{GC_1} = NK$ , dado que solo hay un grupo de control. Asimismo, se puede decir que hay  $NK$  grupos de control cuando cada luminaria conforma un grupo de control que opera de forma independiente a las demás; para este caso  $n_{GC_1} = n_{GC_2} = \dots = n_{GC_{NK}} = 1$ , dado que hay tantos  $GC_i$  como  $NK$ .

El número de posibles configuraciones de luminarias para un número específico de grupos de control,  $N_{gc}$ , no vacíos puede ser determinado por medio de los números de Stirling de segunda especie, cuya notación es  $S(NK, N_{gc})$  y puede ser calculada por (5.1) [90]. Hay tantos  $S(NK, N_{gc})$  como  $NK$  luminarias.

$$S(NK, N_{gc}) = \left\{ \begin{matrix} NK \\ N_{gc} \end{matrix} \right\} = \frac{1}{N_{gc}!} \sum_{l=1}^{N_{gc}} (-1)^{N_{gc}-l} \binom{N_{gc}}{l} l^{NK} \quad (5.1)$$

Aunque  $S(NK, N_{gc})$  indican el número de posibles configuraciones, no da a conocer las opciones de agrupación de las luminarias dentro de cada grupo de control, es decir con cuántas luminarias se podría conformar cada grupo de control, lo cual es expresado por medio de los vectores  $v_i$  de la Tabla 22. Por ejemplo, para un recinto de  $NK = 4$  luminarias y  $N_{gc} = 2$ , se tiene  $S(4,2) = 7$  posibles configuraciones de organizar las luminarias dentro de los dos grupos de control. Estas configuraciones se pueden realizar a partir de dos diferentes formas de agrupar las luminarias,  $v_1(4,2) = \{1,3\}$  y  $v_2(4,2) = \{2,2\}$ , donde 4 de las 7 configuraciones tienen la forma  $v_1$  y las restantes, la forma de  $v_2$ . La notación  $\{1,3\}$  expresa que dos grupos de control ( $GC_1, GC_2$ ) pueden ser conformados con 1 luminaria y con 3 luminarias, respectivamente; mientras que la notación  $\{2,2\}$  indica que cada grupo de control tiene 2 luminarias.

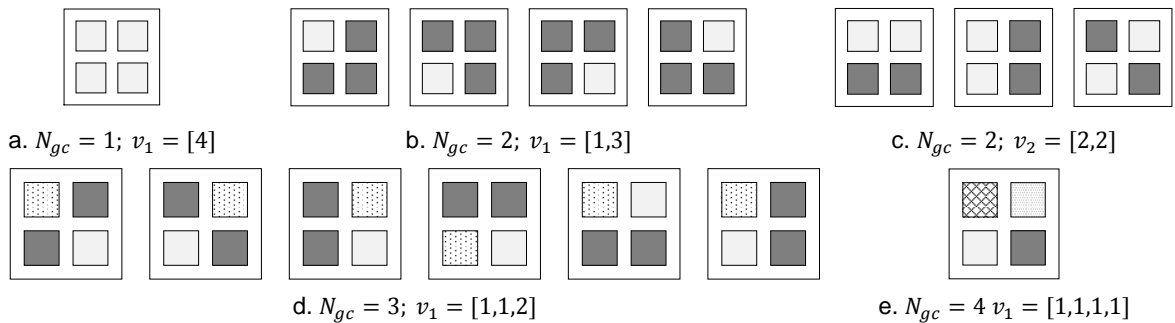
Tabla 22. Vectores  $v_i$  para  $NK$  luminarias.

$NK$	$N_{gc}$	$v_i(NK, N_{gc})$	$NK$	$N_{gc}$	$v_i(NK, N_{gc})$
1	1	[1]	1	1	[5]
2	1	[2]	5	2	[1,4], [2,3]
	2	[1,1]		3	[1,1,3], [1,2,2]
1	[3]	4		[1,1,1,2]	
3	2	[1,2]	5	[1,1,1,1,1]	
	3	[1,1,1]	1	[6]	
4	1	[4]	2	[1,5], [2,4], [3,3]	
	2	[1,3], [2,2]	3	[1,1,4], [1,2,3], [2,2,2]	
	3	[1,1,2]	4	[1,1,1,3], [1,1,2,2]	
	4	[1,1,1,1]	5	[1,1,1,1,2]	
			6	[1,1,1,1,1,1]	

Fuente: Elaboración propia

La Figura 60 muestra las configuraciones correspondientes para todos los casos existentes con  $NK = 4$ , donde el número total de configuraciones,  $N_{cp}$ , es 15. El valor de  $N_{cp}$  puede ser calculado por la expresión (5.2). Es importante indicar que la variación del orden de los grupos de control y del orden interno de sus respectivas luminarias no ocasiona la aparición de una nueva configuración de luminarias (ver Figura 61).

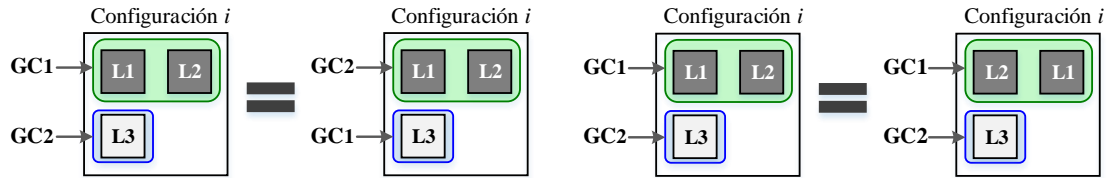
Figura 60. Posibles configuraciones para  $NK = 4$ .



Fuente: Elaboración propia

$$N_{cp} = \sum_{N_{gc}=1}^{NK} S(NK, N_{gc}) \tag{5.2}$$

Figura 61. Ejemplo de configuraciones iguales de luminarias.



Fuente: Elaboración propia

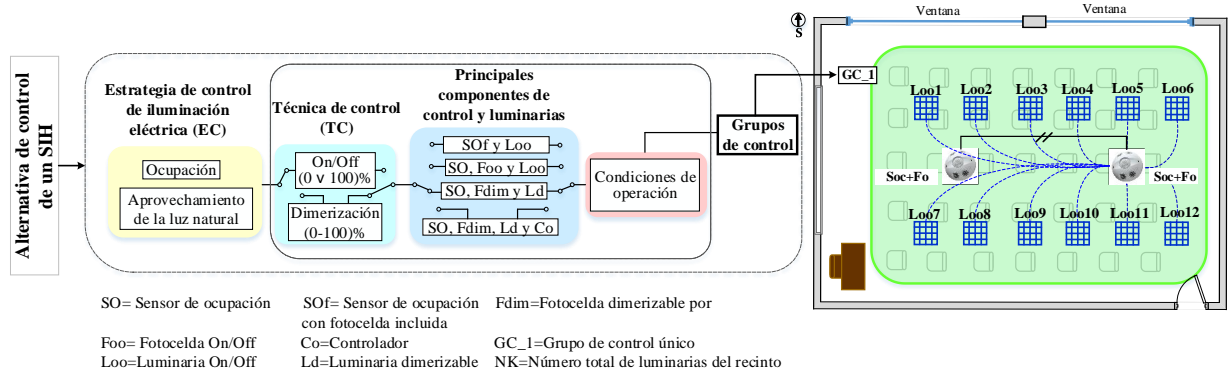
Posterior al análisis sobre las configuraciones posibles de un conjunto de luminarias de un recinto, se aborda la cuantificación de las alternativas de control posibles para el mismo recinto. Una alternativa de control consiste en la definición de una estrategia de control de iluminación eléctrica (de aquí en adelante solo estrategia de control) y los grupos de control a los que será aplicada dicha estrategia. Existen varias estrategias de control, tales como zonificación, programación por horarios, ocupación, aprovechamiento de la luz natural, entre otras. Sin embargo, para el control de los SIH es requisito la combinación de la estrategia de ocupación y el aprovechamiento de la luz natural.

Una estrategia de control comprende: i) la técnica de control, es la forma cómo es ajustado el flujo luminoso de las luminarias que conforman los grupos de control; se consideraron dos técnicas, dimerización y conmutación (On/Off); ii) los componentes de control y luminarias que permiten la implementación de la estrategia de control; iii) las condiciones de operación de los grupos de control que indican cuándo deben ser ejecutadas las técnicas de control y por ende el porcentaje de salida de luz o flujo luminoso de las luminarias que conforman cada grupo de control. Estas condiciones son establecidas con base en el estado de ocupación del recinto, el nivel mínimo de iluminación recomendado según el uso del espacio, el porcentaje de flujo luminoso de operación y el estado de operación de las luminarias en los instantes de tiempo precedente ( $t - 1$ ) y actual ( $t$ ). El tipo de condición de operación a utilizar depende del tipo de técnica de control.

La Figura 62 muestra un ejemplo de configuración de una alternativa de control del SIH del aula IE-305. Esta configuración es la usada en el espacio. Se basa en la estrategia de ocupación y aprovechamiento de la luz natural, a partir de la técnica

de encendido y apagado de las doce luminarias que conforman el único grupo de control. La estrategia de control en este caso está compuesta por dos sensores de ocupación con fotocelda incluida y 12 luminarias On/Off, en combinación con las condiciones de operación del grupo de control GC\_1.

Figura 62. Ejemplo de configuración de alternativa de control del SIH del aula IE-305.



Fuente: Elaboración propia

Para este trabajo se analizaron todas las alternativas de control posibles de un SIH ( $N_{SIH}$ ) con el fin de realizar un análisis comparativo más completo en pro de buscar la alternativa de menor consumo energético.  $N_{SIH}$  depende del número máximo de configuraciones para  $NK$  luminarias,  $N_{cp}$  y el número de estrategias de control de cada grupo de control, y puede ser calculada según la expresión (5.3), donde  $S(NK, N_{gc})$  ya ha sido definida y  $N_{ec}$  es el número de estrategias de control que puede tener un grupo de control.

$$N_{SIH} = \sum_{N_{gc}=1}^{NK} (S(NK, N_{gc}) \cdot N_{ec}^{N_{gc}}) \quad (5.3)$$

En la práctica, una estrategia de control se encuentra definida por sus componentes de control y tipo de luminarias. En este trabajo se analizan 4 estrategias de control ( $N_{ec} = 4$ ): (i) sensor de ocupación con fotocelda incluida y luminarias On/Off, (ii) sensor de ocupación, fotocelda On/Off y luminarias On/Off, (iii) sensor de ocupación,

fotocelda dimerizable y luminarias dimerizables y (iv) sensor de ocupación, fotocelda dimerizable, luminarias dimerizables y controlador.

Para el caso de un recinto con  $NK = 4$  (e.g. Sala de reuniones) y considerando que  $N_{ec}$  es 4, se tiene que  $N_{cp}$  es 15 y  $N_{SIH}$  es igual a 756, tal como muestra la Tabla 23. Si las  $NK$  luminarias se agrupan en un solo grupo de control, el número de configuraciones posibles es 1 que producen un total de 4 alternativas de control; mientras que si las  $NK$  luminarias se agrupan en 3 grupos de control, existirán 6 configuraciones que producen un total de 384 alternativas de control diferentes.

Tabla 23. Cálculo del número de configuraciones y alternativas de control para un caso recinto con 4 luminarias.

$N_{gc}$	1	2	3	4	
$S(NK, N_{gc})$	$S(4,1) = 1$	$S(4,2) = 7$	$S(4,3) = 6$	$S(4,4) = 1$	$N_{cp} = 15$
$S(NK, N_{gc}) N_{ec}^{N_{gc}}$	$S(4,1) \cdot 4^1 = 4$	$S(4,2) \cdot 4^2 = 112$	$S(4,3) \cdot 4^3 = 384$	$S(4,4) \cdot 4^4 = 256$	$N_{SIH} = 756$

Fuente: Elaboración propia

A medida que el número de luminarias aumenta, se incrementa de forma significativa el número de configuraciones  $N_{cp}$  y el número de alternativas de control posibles  $N_{SIH}$ , por lo que se requiere de herramientas computacionales para su análisis. La Tabla 24 muestra el cálculo de los valores  $S(NK, N_{gc})$  (sombreados en color verde-triángulo de *Stirling*),  $N_{cp}$  y  $N_{SIH}$  para diversos valores de  $NK$ .

Tabla 24. Valores de  $S(NK, N_{gc})$ ,  $N_{cp}$  y  $N_{SIH}$  para  $NK$  luminarias. Tomado de [90], [91].

	$N_{gc}$								$N_{cp}$	$N_{SIH}$
	1	2	3	4	5	6	7	8		
$NK$	1	1	-	-	-	-	-	-	1	4
	2	1	1	-	-	-	-	-	2	20
	3	1	3	1	-	-	-	-	5	116
	4	1	7	6	1	-	-	-	15	756
	5	1	15	25	10	1	-	-	52	5 428
	6	1	31	90	65	15	1	-	203	42 399
	7	1	63	301	350	140	21	1	877	355 636
	8	1	127	966	1701	1050	266	28	4 140	3 188 340

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de ilustrar la relación entre configuraciones de luminarias y alternativas de control, la Tabla 25 presenta algunos casos para un recinto con 4 luminarias (L1, L2, L3 y L4). Específicamente, se muestran 8 agrupaciones de luminarias (sección izquierda de la tabla) donde los números 1 y 2 representan los grupos de control. Se tiene que un grupo de control (GC1) produce una sola agrupación (número de configuración de luminaria: CL#1); dos grupos de control (GC1 y GC2) pueden producir 7 formas distintas de agrupación de las luminarias (CL#2 a CL#8) considerando dos opciones de repartición de luminarias entre los grupos de control. En la opción 1, GC1 y GC2 tienen 3 y 1 luminarias, respectivamente (filas sombreadas en color azul), lo que es igual a que GC1 tenga 1 luminaria y GC2 tenga 3 luminarias; por ejemplo, la configuración CL#4 indica que las luminarias L1, L3 y L4 pertenecen al GC1 y L2 pertenece al G2. En la opción 2, GC1 y GC2 tienen 2 luminarias cada uno (filas sombreadas en color verde).

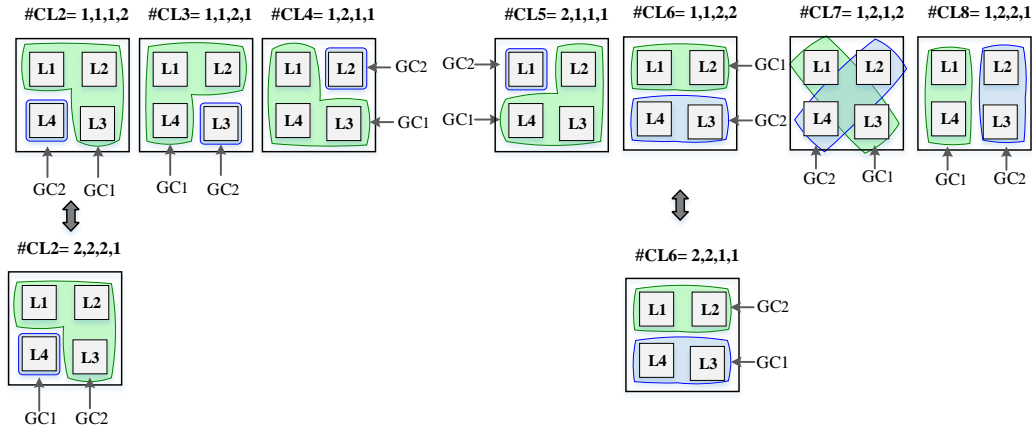
Tabla 25. Ejemplos de configuraciones y alternativas de control para un recinto con 4 luminarias.

Configuraciones (1 a 8)					Alternativas de control (1 a 20)											
#CL	L1	L2	L3	L4	#CL	#AC	L1	L2	L3	L4	#CL	#AC	L1	L2	L3	L4
1	1	1	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	2	11	B1	B1	B1	C2
2	1	1	1	2	1	2	B1	B1	B1	B1	2	12	B1	B1	B1	D2
3	1	1	2	1	1	3	C1	C1	C1	C1	2	13	C1	C1	C1	A2
4	1	2	1	1	1	4	D1	D1	D1	D1	2	14	C1	C1	C1	B2
5	2	1	1	1	2	5	A1	A1	A1	A2	2	15	C1	C1	C1	C2
6	1	1	2	2	2	6	A1	A1	A1	B2	2	16	C1	C1	C1	D2
7	1	2	1	2	2	7	A1	A1	A1	C2	2	17	D1	D1	D1	A2
8	1	2	2	1	2	8	A1	A1	A1	D2	2	18	D1	D1	D1	B2
					2	9	B1	B1	B1	A2	2	19	D1	D1	D1	C2
					2	10	B1	B1	B1	B2	2	20	D1	D1	D1	D2

A: Estrategia de control A    B: Estrategia de control B    C: Estrategia de control C    D: Estrategia de control D  
 Fuente: Elaboración propia

Se aclara que no existe la configuración 2-2-2-1 pues es equivalente a la configuración existente 1-1-1-2 (CL#2); de manera similar no existen las configuraciones 2-2-1-2, 2-1-2-2, 1-2-2-2, 2-2-1-1, 2-1-2-1 y 2-1-1-2 (ver Figura 63), que ya están incluidas en las configuraciones CL#3 a CL#8.

Figura 63. Ejemplo gráfico de configuraciones de luminarias para  $N_{gc} = 2$  y  $NK=4$  que son iguales.



Fuente: Elaboración propia

Ahora, las 20 alternativas de control (AC#1 a AC#20) mostradas en la Tabla 25 corresponden a las configuraciones de luminarias CL #1 (AC #1 a AC#4) y CL#2 (AC #5 a AC#20). Las letras A, B, C y D representan las 4 estrategias de control analizadas en este trabajo; el número que acompaña a cada estrategia corresponde al grupo de control donde ésta se aplica.

Es importante indicar que aun cuando las luminarias de dos configuraciones distintas operan bajo la misma estrategia de control no significa que sean casos idénticos. Este es el caso de las alternativas #AC1 (A1-A1-A1-A1) y #AC5 (A1-A1-A1-A2), que en principio son iguales dado que todas las luminarias operan con la estrategia A; sin embargo, la operación de estas dos alternativas difiere. Todas las luminarias de la alternativa #AC1 operan de acuerdo al sensor de ocupación con fotocelda incluida (único) existente en el recinto, por lo que la medición de iluminación natural se realiza en un único punto, posibilitando solo dos escenarios de operación: (i) encendido (GC1) y (ii) apagado (GC1); mientras que para el caso de la alternativa #AC5 existen 2 sensores, y por ende dos mediciones de iluminación natural, una para el GC1 (L1, L2 y L3) y otra para el GC2 (L4), que llevan a la operación independiente de los dos grupos de control, posibilitando los siguientes cuatro escenarios de operación: (i) encendido (GC1) – encendido (GC2), (ii) encendido (GC1) – apagado (GC2), (iii) apagado (GC1) – encendido (GC2) y (iv) apagado (GC1) – apagado (GC2). Esta

misma dinámica se presenta con las alternativas #AC10, #AC15 y #AC20, los dos grupos de control operan de manera independiente de acuerdo a la alternativa de control usado en cada uno.

## 5.2. MODELADO DE LA ILUMINANCIA INTERIOR Y CONSUMO DE POTENCIA PARA CADA ALTERNATIVA DE CONTROL

La iluminancia total de un espacio interior ( $E_T$ ) puede ser expresada como la contribución conjunta de todas las fuentes de luz natural ( $E_D$ ) y la iluminación artificial en función de la alternativa de control del SIH ( $E_A$ ). Las matrices  $E_T$ ,  $E_D$  y  $E_A$  son funciones del tiempo y de la posición relativa dentro del espacio (recinto), tal como muestra (5.4). Estas iluminancias están referidas a la superficie de trabajo cuya altura es cercana a 0,75 m sobre el nivel del suelo.

$$E_T(t, x, y) = E_D(t, x, y) + E_A(t, x, y) \quad (5.4)$$

$E_D$  varía con el tiempo debido al comportamiento de la irradiación solar durante el día; mientras la dependencia temporal de  $E_A$  es dada por el régimen de ocupación, las características técnicas de las luminarias y el régimen de operación del SIH impuesto por el control de iluminación eléctrica, de acuerdo con la disponibilidad de luz natural en el instante  $t$ .

También se debe indicar que la iluminancia en un punto  $p$  está en función de su posición específica  $(x,y)$ , donde  $x$  describe la posición relativa a lo ancho y  $y$  describe la posición relativa a lo largo. El nivel de penetración de luz natural exterior fija los valores de  $E_D$  sobre la superficie de trabajo; tal penetración depende de la distancia entre el punto  $p$  y las aberturas de luz natural. Por su parte, los valores  $E_A$  son fijados por los aportes de las luminarias sobre la superficie de trabajo, donde la iluminancia artificial sobre un punto  $p$  ( $e_{art}(t,p)$ ) para un instante  $t$  obedece a la ubicación de cada luminaria y la estrategia de control de cada grupo de control.

La dependencia espacial de las iluminancias natural, artificial y total y del *Daylight Factor* promedio  $DF_{prom}$ , el cual se expone más adelante, es estudiada a partir de la discretización espacial de la superficie de trabajo del recinto dentro de un mallado de celdas con resolución predefinida. La configuración del mallado es  $n \times m$ , que a su vez, es la misma configuración de las matrices  $E_{D_{n \times m}}$ ,  $E_{A_{n \times m}}$ ,  $E_{T_{n \times m}}$  y  $DF_{prom_{n \times m}}$ . Donde sus elementos  $e_{(i,j)}$  y  $df_{(i,j)}$  corresponde a las iluminancias y el DF promedio de cada punto centro  $(p(x,y))$  de cada pequeña celda del mallado.

De aquí en adelante se emplean los casos de estudio (aula IE-305 y sala de reuniones) analizados en los capítulos 3 y 4 para ayudar a explicar el modelado propuesto en este capítulo. La Tabla 26 muestra un ejemplo de la discretización espacial de la superficie de trabajo de los casos de estudio utilizada para representar las matrices de iluminancias y el DF promedio. La configuración de estas matrices es usada en buena parte del capítulo para aplicar el modelado propuesto en los casos de estudio.

Tabla 26. Discretización espacial de la superficie de trabajo.

Caso de estudio	Mallado → Superficie de trabajo	Número de celdas	Resolución de la celda	Tamaño matriz de iluminancias y DF
Sala de reuniones Longitud $l = 6m$ Profundidad $w = 3,6m$ $n = 3$ $m = 6$		$n \times m = 18$	$\frac{l}{m} = 1m$ $\frac{w}{n} = 1,2m$	$E_{3 \times 6}$ $DF_{prom_{3 \times 6}}$
Aula IE – 305 Longitud $l = 11,9m$ Profundidad $w = 6,6m$ $n = 4$ $m = 7$		$n \times m = 28$	$\frac{l}{m} = 1,7m$ $\frac{w}{n} = 1,65m$	$E_{4 \times 7}$ $DF_{prom_{4 \times 7}}$

Fuente: Elaboración propia

\*\*  $k_x = 1, \dots, 2m - 1$  y  $k_y = 1, \dots, 2n - 1$

Es importante indicar que el aumento de los puntos  $(p(x,y))$  del mallado, en este caso 18 puntos (sala de reuniones) y 28 puntos (aula IE-305), en comparación con el número de puntos del mallado utilizado en el Capítulo 4 (9 puntos para la sala de reuniones y 18 puntos para el aula IE-305), se debe a que cuando se proyecta más de un grupo de control es conveniente realizar un mallado más fino, con el fin de lograr un mayor nivel de exactitud de los modelos propuestos bajo esta condición. La estrategia usada para determinar el aumento de los puntos es explicada en la Sección 3.2 (Capítulo 3).

### Estimación de la iluminancia natural

A partir del proceso de experimentación desarrollado, se identificó que las mediciones realizadas indican que el aporte de luz natural depende de forma única de cada abertura (fuente), por lo que una manera más exacta de estimar la luz natural total en un punto  $p(x,y)$  del mallado, está dada por la suma de los aportes de iluminación natural con respecto a cada fuente, tal como muestra (5.5).

$$\begin{aligned}
 E_{D_{n \times m}}(t) &= \sum_{w=1}^{NA} E_{D_{w_{n \times m}}}(t) = \sum_{w=1}^{NA} E_{E_w}(t) \cdot \mathbf{DF}_{prom_{w_{n \times m}}} \\
 &= f_c \cdot \sum_{w=1}^{NA} G_w(t) \cdot \mathbf{DF}_{prom_{w_{n \times m}}}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Cada matriz  $E_{D_{w_{n \times m}}}(t)$  es calculada como  $E_{E_w}(t) \cdot \mathbf{DF}_{prom_{w_{n \times m}}}$ , donde  $E_{E_w}(t)$  es la iluminancia natural exterior sobre la superficie  $w$  (fachada) para cualquier instante de tiempo  $t$  y  $\mathbf{DF}_{prom_{w_{n \times m}}}$  es la matriz característica de los  $df_{(i,j)}$  promedio en cada punto  $p(x,y)$  debido a cada una de las aberturas de la superficie  $w$ ; por tanto, un espacio puede tener tantas matrices  $\mathbf{DF}_{prom}$  como aberturas (fuentes de iluminancia natural) tenga la superficie  $w$ . Sin embargo, cabe mencionar que dos o más aberturas de una misma superficie  $w$  pueden ser consideradas como una sola fuente para el cálculo del  $\mathbf{DF}_{prom}$ , asumiendo que éstas no presenten obstrucciones

que modifiquen su entrada de luz natural, que el tipo de acristalamiento sea el mismo y que el nivel de irradiancia solar incidente en todas sea muy cercano o aproximadamente el mismo. El estudio de esto se sugiere como tema de investigación en trabajos futuros.  $E_{Ew}(t)$  es calculada como  $f_c \cdot G_w(t)$ , donde  $G_w(t)$  ( $W/m^2$ ) es la irradiancia solar incidente en la superficie  $w$ ;  $f_c$  ( $lux/W/m^2$ ) es el factor de conversión entre la irradiancia solar y la iluminancia producida por esta misma irradiancia; y NA es el número total de aberturas del recinto.

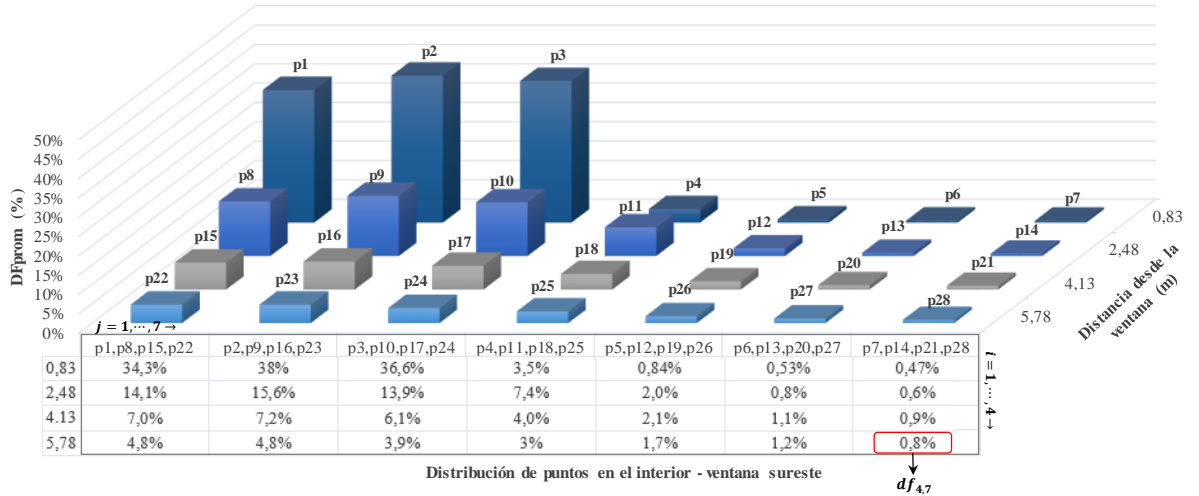
$DF_{prom_{w_{n \times m}}}$  es una matriz determinada a partir de mediciones experimentales de la iluminancia natural interior y la iluminancia natural exterior para cada uno de los puntos  $p(x, y)$  del mallado de la superficie de trabajo. El proceso de medición que llevó a obtener estas mediciones, así como su uso para el cálculo de la matriz  $DF_{prom_{w_{n \times m}}}$ , es expuesto en los capítulos 3 y 4.

Con el fin de estimar la matriz  $E_{D_{n \times m}}(t)$  para cualquier instante de tiempo del aula IE – 305 y sala de reuniones, son utilizados los valores de las tablas de las figuras 64 a 66 que corresponden a los  $df_{(i,j)}$  de los puntos del mallado de los dos casos de estudio. De las figuras se puede apreciar que hay dos matrices de *Daylight Factor* promedio  $DF_{prom_{wse_{n \times m}}}$  y  $DF_{prom_{wso_{n \times m}}}$  para el aula IE – 305 debido a que este espacio presenta dos aberturas (ventana sureste y ventana suroeste),  $NA=2$ , en la fachada sur con diferentes características físicas, que llevan a que la penetración de iluminación natural por cada ventana deba ser estudiada por separado. Por lo tanto, al aplicar la ecuación (5.5) se obtiene:

$$E_{D_{305_{n \times m}}}(t) = f_c \cdot (G_{wse}(t) \cdot DF_{prom_{wse_{n \times m}}} + G_{wso}(t) \cdot DF_{prom_{wso_{n \times m}}})$$

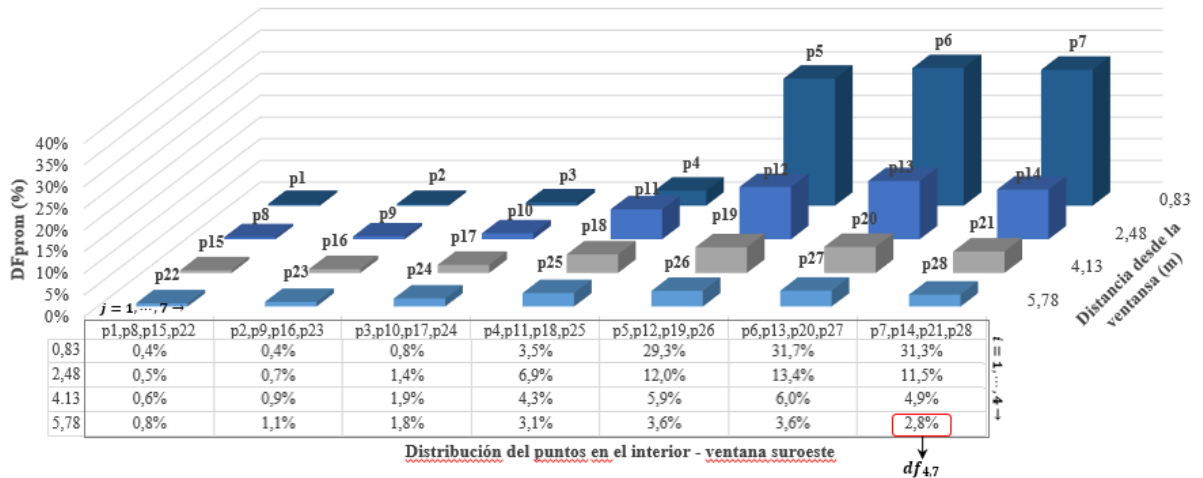
Donde  $G_{wse}(t)$  y  $G_{wso}(t)$  corresponden a la irradiancia solar incidente en la ventana sureste y ventana suroeste, respectivamente.

Figura 64. Distribución del  $DF_{prom\_wse_{n \times m}}$  del Aula IE 305 – ventana sureste y mallado de 28 puntos



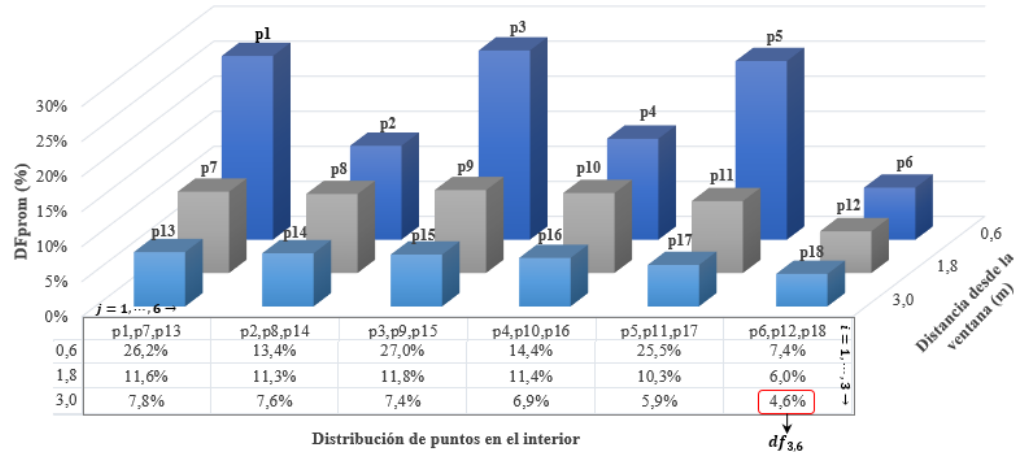
Fuente: Elaboración propia

Figura 65. Distribución del  $DF_{prom\_wso_{n \times m}}$  del Aula IE 305 – ventana suroeste y mallado de 28 puntos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 66. Distribución de  $DF_{prom\_SR_{n \times m}}$  - sala de reuniones.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se consideran dos tipos de factores para estimar de manera más correcta la iluminancia interior de un recinto. El primer tipo es un factor de atenuación por ocupación,  $f_{oc} \approx 0,9$  (90%), que tiene en cuenta la obstrucción de las personas sobre la iluminancia estimada sobre la superficie de trabajo, que previamente (expresión (5.5)) se determinó a partir de mediciones con el recinto vacío<sup>33</sup>. Este factor permite tener en cuenta que la presencia de personas ocasiona una leve disminución de la iluminancia estimada en condición de vacío (sin ocupación). El segundo tipo es un factor de ponderación de la irradiación solar vertical,  $f_{pIS_w}$ , que permite estimar la irradiación solar incidente sobre las ventanas,  $G_w(t)$ , a partir de la irradiación solar vertical,  $GV_{Sur}(t)$ , que recibe la edificación en una zona de referencia o sin obstrucción<sup>34</sup>, donde a su vez  $GV_{Sur}(t)$  puede ser estimada a partir de la irradiación solar global,  $G_h(t)$ , que es típicamente conocida<sup>35</sup>, tal como sigue  $G_w(t) = f_{pIS_w} \cdot GV_{Sur}(t) = f_{pIS_w} \cdot f(G_h(t))$ . El Anexo A presenta el cálculo de  $f_c$ ,  $f_{pIS_w}$  y

<sup>33</sup> En la literatura es poco usual considerar la afectación de las personas sobre la estimación de la iluminancia.

<sup>34</sup> La pared sur exterior del piso 5 del Edificio de Ingeniería Eléctrica es la zona de referencia o sin obstrucción en la cual incide la irradiación solar vertical con mayor intensidad.

<sup>35</sup>  $G_h(t)$  puede ser monitorizada por una estación meteorológica o un piranómetro dedicado; asimismo, podría ser determinada a partir de software de simulación (generadores de datos sintéticos).

$f(G_h(t))$ . La expresión (5.6) presenta cómo estimar la matriz de iluminancia interior considerando los factores presentados.

$$E_{D_{n \times m}}(t) = f_c \cdot f_{oc} \cdot \sum_{w=1}^{NA} f_{pIS_w} \cdot GV_{Sur}(t) \cdot DF_{prom_{w_{n \times m}}} \quad (5.6)$$

### Estimación de la iluminancia artificial en función de la alternativa de control del SIH y la iluminancia total interior

En condición de ocupación, la iluminancia total interior o iluminancia híbrida en un punto  $p(x, y)$  para un instante de tiempo  $t$ ,  $e_T(p, t)$ , debe ser igual o superior a un valor de iluminancia mínimo  $e_{min}$ , tal como expresa (5.7). El RETILAP define  $e_{min}$  según el tipo de recinto [87]. En caso de no existir ocupación, la iluminancia artificial en función de la alternativa de control en un punto  $p(x, y)$ ,  $e_A(p, t)$  es igual a 0, y por ende  $e_T(p, t)$  es igual a la iluminancia natural  $e_D(p, t)$ .

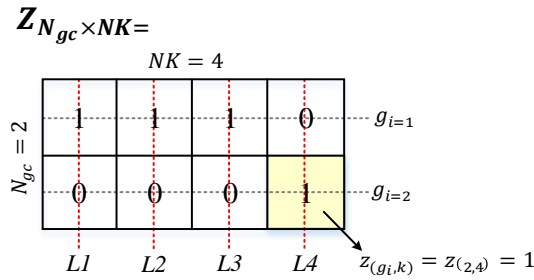
$$e_T(p, t) = e_A(p, t) + e_D(p, t) \geq e_{min} \quad (5.7)$$

La expresión (5.8) indica cómo calcular el valor de  $e_A(p, t)$ , donde  $N_{gc}$  es el número total de grupos de control del recinto;  $a_{p(k,p)}$  es la iluminancia máxima que aporta la luminaria  $k$  sobre un punto  $p(x, y)$ ;  $OO_{gi}$  es el estado de operación de las luminarias del grupo de control  $gi$ , que puede ser igual a 1 (encendido) o 0 (apagado);  $\varphi_{gi}$  es el nivel de flujo luminoso de las luminarias del grupo de control  $gi$ , que puede ser igual a 0 (0%) o 1 (100%) para luminarias On/Off, o variar entre un valor mínimo (por ejemplo de 0.06 (6%) a 1.00 (100%) para luminarias dimerizables;  $Z_{(gi,k)}$  es un elemento de la matriz de pertenencia  $Z_{N_{gc} \times NK}$ , cuya función es indicar la pertenencia de la luminaria  $k$  al grupo de control  $gi$ , y puede tomar un valor de 0 (no pertenencia) o 1 (pertenencia).

La Figura 67 muestra un ejemplo de la matriz  $Z_{N_{gc} \times NK}$ , donde el elemento  $z_{(2,4)} = 1$  indica que la luminaria L4 pertenece al grupo de control número 2 ( $g_2$ ) y los elementos  $z_{(1,1)} = 1$  a  $z_{(1,3)} = 1$  correspondientes a las luminarias L1, L2 y L3, respectivamente, pertenecen al grupo de control número 1 ( $g_1$ ).

$$e_A(p, t) = \sum_{g_i=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} a_{p(k,p)} \cdot OO_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t) \cdot z_{(g_i,k)} \tag{5.8}$$

Figura 67. Ejemplo matriz de pertenencia de las luminarias a un grupo de control específico del recinto  $Z_{N_{gc} \times NK}$ .



Fuente: Elaboración propia

Debido a la asimetría del flujo luminoso de una luminaria, la contribución de iluminancia de la luminaria  $k$  en el punto  $p_N$  del mallado,  $(a_{p(k,p)})$  puede ser expresada como la suma ponderada de las curvas de iluminancia de la luminaria en los ejes X y Y sobre el plano de trabajo,  $Elx(r_{pk})$  y  $Ely(r_{pk})$ , tal como muestra la ecuación (5.9). Ambas curvas están en función de la distancia horizontal ( $r_{pk}$ ) entre la proyección vertical del punto centro de la luminaria  $k$  sobre el plano de trabajo y el punto  $p_N$  (donde  $N = 1, \dots, n \times m$ ) del mallado (ver Figura 68).

La distancia  $r_{pk}$  se calcula como  $\sqrt{\Delta x_{pk}^2 + \Delta y_{pk}^2}$ , donde  $\Delta x_{pk} = x_p - x_k$  y  $\Delta y_{pk} = y_p - y_k$ , siendo  $(x_p, y_p)$  y  $(x_k, y_k)$  las coordenadas del punto  $p_N$  y la luminaria  $k$ , respectivamente. Las participaciones de  $Elx(r_{pk})$  y  $Ely(r_{pk})$  dependen del ángulo  $\theta$  formado por  $r_{pk}$  y se expresan como  $f_x = (90 - \theta)/90$  y  $f_y = \theta/90$ , tomando ambas

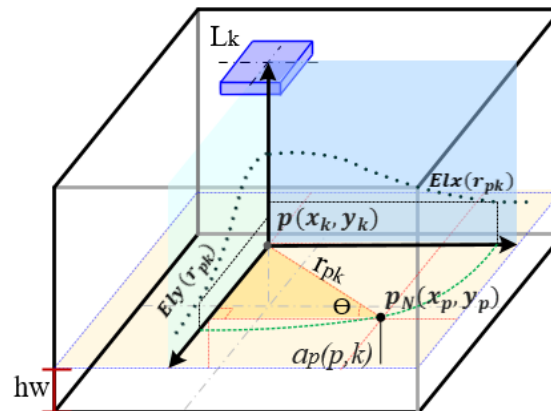
funciones de ponderación un valor que oscilan entre 0 y 1. El ángulo  $\theta$  se calcula como  $\tan^{-1}(|\Delta x_{pk}|/|\Delta y_{pk}|)$ , Finalmente, se calcula  $e_A(p, t)$  como muestra (5.10) para un total de  $NK$  luminarias.

$$a_{p(k,p)} = f_x \cdot Elx(r_{pk}) + f_y \cdot Ely(r_{pk}) \quad (5.9)$$

$$e_A(p, t) = \sum_{gi=1}^{Ngc} \sum_{k=1}^{NK} (f_x \cdot Elx(r_{pk}) + f_y \cdot Ely(r_{pk})) \cdot OO_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \quad (5.10)$$

La Figura 68 ilustra las curvas de la luminaria  $Elx(r_{pk})$  y  $Ely(r_{pk})$  como resultado de evaluar en las curvas de caracterización de iluminancia de la luminaria en los ejes X y Y sobre el plano de trabajo  $Elx(x)$  y  $Ely(y)$ , la distancia horizontal  $r_{pk}$ . Las curvas  $Elx(x)$  y  $Ely(y)$  se obtienen a partir de la caracterización de iluminancia de la luminaria que es expuesta en el Capítulo 3.

Figura 68. Ilustración de la contribución de iluminancia de la luminaria  $k$  en el punto  $p_N$  del mallado, ( $a_{p(k,p)}$ )



$N = 1, \dots, n \times m$ ; hw (altura de trabajo)=0,75 m\*\*

Fuente: Elaboración propia

En este punto del capítulo es importante indicar que los modelos de tipo matricial se convierten en vectores mediante la expresión (5.11), con el fin de facilitar los cálculos debido a la existencia de diferentes notaciones (subíndices).

$$(i - 1) \cdot m + j = p \quad (5.11)$$

Donde  $i$  y  $j$  representan el subíndice de la fila y de la columna de la matriz, respectivamente, y  $m$  es el número de columnas de la matriz.  $p$  es el subíndice de cada elemento del vector. Por ejemplo, la aplicación de (5.10) para los modelos  $\mathbf{E}_{D_{n \times m}}(t)$ ,  $\mathbf{E}_{A_{n \times m}}$ ,  $\mathbf{DF}_{prom\_w_{n \times m}}$  y  $\mathbf{E}_{T_{n \times m}}$ , da como resultado  $E_{D_{1 \times NP}} = [e_{D_{p=1}}, \dots, e_{D_{p=NP}}]$ ,  $E_{A_{1 \times NP}} = [e_{A_{p=1}}, \dots, e_{A_{p=NP}}]$ ,  $DF_{prom\_w_{1 \times NP}} = [df_{prom\_w_{p=1}}, \dots, df_{prom\_w_{p=NP}}]$ ,  $E_{T_{1 \times NP}} = [e_{T_{p=1}}, \dots, e_{T_{p=NP}}]$ .  $NP$  es el número de puntos del mallado del recinto.

### Estimación de la energía consumida

$CE_{SIH}$  se define como la energía consumida por un sistema SIH, tal como muestra (5.12), donde  $P_{SIH}(t)$  es la potencia demandada por las luminarias del SIH en el instante  $t$  en watts (W),  $P_{aux\_SIH}$  es la carga instalada permanente debida a los componentes auxiliares de control<sup>36</sup> del sistema SIH en watts (W),  $Nt$  número total de intervalos de tiempo diarios ( $\Delta t$  [horas]) a evaluar para el cálculo del consumo de energía.

$$\begin{aligned} CE_{SIH}(t) &= \int_{t_1}^{t_2} P_{cons}(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} (P_{SIH}(t) + P_{aux\_SIH}) \cdot dt \quad (kWh) \\ &= \sum_{ti=1}^{Nt} P_{cons_{ti}}(t) \cdot \Delta t = \sum_{ti=1}^{Nt} (P_{SIH_{ti}}(t) + P_{aux\_SIH}) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (5.12)$$

Los valores  $P_{aux\_SIH}$  suelen ser muy bajos en comparación a las potencias de las luminarias, por lo que podrían ser despreciados; sin embargo, sus consumos de

<sup>36</sup> Los componentes auxiliares de control pueden ser *power packs* (para alimentación de fotoceldas y sensores de ocupación), contactores y controladores. Se aclara que los contactores no se consideran consumidores de energía eléctrica.

energía pueden ser relevantes debido a que operan permanentemente (24 horas para los 365 días al año).

- **Energía diaria consumida por tipo de día**

La expresión (5.13) muestra que la energía anual consumida por el SIH, la que se desagrega en dos componentes debido a los comportamientos específicos de  $P_{SIH}(t)$  y  $P_{aux_{SIH}}(t)$ .

$$\int_{t_1}^{t_2} (P_{SIH}(t) + P_{aux_{SIH}}) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{SIH}(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{aux_{SIH}} \cdot dt \quad (5.13)$$

La energía anual debida a la potencia consumida por las luminarias,  $P_{SIH}(t)$ , puede ser estimada a partir del consumo diario  $(\int_{24h} P_{SIH_{td}}(t) \cdot dt)^{37}$  para  $Ntd$  tipo de días, tal como muestra (5.14). En total, se consideraron 9 días tipo determinados a partir del comportamiento diario de la irradiación solar y dinámica diaria de ocupación del recinto y que se expone en el numeral 5.4.1.

---

<sup>37</sup> Aunque el planteamiento matemático indica que la evaluación del consumo energético debido a las luminarias es de 24 horas, se aclara que solo se evaluará cuando haya ocupación en el espacio, pues cuando no hay ocupación, se sabe que el consumo es igual a 0; inclusive aun cuando haya ocupación, el consumo también podría ser igual a 0 debido a la disponibilidad de iluminación natural.

$$\begin{aligned}
\int_{t_1}^{t_2} P_{SIH}(t) \cdot dt &\approx \sum_{td=1}^{Ndt} nd_{td} \int_{24h} P_{SIH_{td}}(t) \cdot dt \\
&= nd_1 \int_{24h} P_{SIH_1}(t) \cdot dt + nd_2 \int_{24h} P_{SIH_2}(t) \cdot dt \\
&+ nd_3 \int_{24h} P_{SIH_3}(t) \cdot dt + nd_4 \int_{24h} P_{SIH_4}(t) \cdot dt \\
&+ nd_5 \int_{24h} P_{SIH_5}(t) \cdot dt + nd_6 \int_{24h} P_{SIH_6}(t) \cdot dt \\
&+ nd_7 \int_{24h} P_{SIH_7}(t) \cdot dt + nd_8 \int_{24h} P_{SIH_8}(t) \cdot dt \\
&+ nd_9 \int_{24h} P_{SIH_9}(t) \cdot dt
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Dado que cada día de servicio del SIH se clasifica en un tipo de día,  $td$  de  $Ndt$  (número total de tipos de día), se tiene que durante un año ( $t_2 - t_1$ ) hay  $nd_{td}$  número de días tipo, donde la suma de todos los  $nd_{td}$  es igual a la totalidad de los días de servicio<sup>38</sup> del SIH en un año,  $Nds$ , tal como muestra (5.15).

$$Nds = \sum_{td=1}^{Ntd} nd_{td} \tag{5.15}$$

El consumo anual de energía debido a las luminarias se puede calcular a partir de (5.16), donde  $P_{SIH}(td, ti)$  es la potencia consumida por las luminarias del SIH de un día tipo  $td$  en el intervalo de tiempo  $ti$ . La expresión (5.17) permite estimar la energía diaria consumida por las luminarias para un tipo día,  $td$  y la expresión (5.18) indica cómo determinar la probabilidad de ocurrencia de cada tipo día,  $PO_{td}$ . En resumen, la expresión (5.16) puede ser reescrita como (5.19).

---

<sup>38</sup> En general, este valor es menor a 365 días, ya que mayormente no hay uso de los recintos durante fines de semana y periodos de vacaciones.

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} P_{SIH}(t) \cdot dt &\approx Nds \cdot \sum_{td=1}^{Ntd} \frac{nd_{td}}{Nds} \int_{24h} P_{SIH_{td}}(t) \cdot dt \\ &= Nds \cdot \sum_{td=1}^{Ntd} \frac{nd_{td}}{Nds} \sum_{ti=1}^{Nt} P_{SIH}(td, ti) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$EC_{td} = \sum_{ti=1}^{Nt} P_{SIH}(td, ti) \cdot \Delta t \quad (5.17)$$

$$PO_{td} = \frac{nd_{td}}{Nds} \quad (5.18)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{SIH}(t) \cdot dt \approx Nds \cdot \sum_{td=1}^{Ntd} PO_{td} \cdot EDC_{td} \quad (5.19)$$

Por otro lado, el consumo anual de energía de los componentes auxiliares del SIH se determina a partir de (5.20). Por tanto, el consumo anual de energía,  $EAC_{ac}$ , del SIH se puede estimar a partir de (5.21). El Anexo B explica en mayor detalle la expresión (5.21).

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{aux_{SIH}} \cdot dt = 24 \cdot 365 \cdot P_{aux} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} EAC_{ac} &= \int_{t_1}^{t_2} (P_{SIH}(t) + P_{aux_{SIH}}) \cdot dt \\ &\approx Nds \sum_{td}^{Ntd} PO_{td} \cdot EDC_{td} + 24 \cdot 365 \cdot P_{aux} \quad (kWh/año) \end{aligned} \quad (5.21)$$

- **Potencia consumida por las luminarias del SIH**

$P_{SIH}(t)$  es calculada por (5.22) donde  $Plum$  es la potencia de la luminaria  $k$  en watts (W). Para el caso de una luminaria On/Off,  $Plum$  es igual a la potencia nominal que es la misma para todas las luminarias; mientras para el caso de una luminaria dimmerizada,  $Plum$  puede ser expresada como una función lineal del porcentaje de flujo luminoso de operación que emite la luminaria,  $(\varphi_k)$ , asumiendo que existe una relación proporcional entre  $\varphi_k$  y la iluminancia artificial medida sobre la superficie

de trabajo,  $e_A$ . El valor de  $\varphi_k$  es fijado por el control del sistema de iluminación eléctrico, a través de la tensión de control de dimerización  $\beta_k$  para cada instante de tiempo  $t$ . La función lineal  $Plum$  tiene la forma de (5.23) para una luminaria dimerizable.

$$\begin{aligned} P_{SIH}(t) &= \sum_{k=1}^{NK} Plum(\varphi_k(t)) \cdot OO_k(t) = \sum_{gi=1}^{Ngc} \sum_{k=1}^{NK} Plum(\varphi_k(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \\ &= \sum_{gi=1}^{Ngc} nl_{gi} \cdot OO_{gi}(t) \cdot Plum(\varphi_{gi}(t)) \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$= \sum_{gi=1}^{Ngc} nl_{gi} \cdot OO_{gi}(t) \cdot a_p + \sum_{gi=1}^{Ngc} nl_{gi} \cdot OO_{gi}(t) \cdot b_p \cdot \varphi_{gi}(t)$$

$$Plum(\varphi_k(t)) = a_p + b_p \cdot \varphi_k(t) \quad (5.23)$$

Retomando el ejemplo de la Figura 67 es posible exponer la aplicación de la ecuación (5.22).

$$\begin{aligned} P_{SIH}(t) &= \sum_{gi=1}^{Ngc=2} \sum_{k=1}^{NK=4} (a_p + b_p \cdot \varphi_k(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \\ &= \sum_{gi=1}^{Ngc=2} \sum_{k=1}^{NK=4} a_p \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} + \sum_{gi=1}^{Ngc=2} \sum_{k=1}^{NK=4} b_p \cdot \varphi_k(t) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \\ &= a_p \cdot OO_{g1}(t) + a_p \cdot OO_{g1}(t) + a_p \cdot OO_{g1}(t) + a_p \cdot OO_{g2}(t) + b_p \cdot \varphi_1(t) \cdot OO_{g1}(t) + \\ &\quad b_p \cdot \varphi_2(t) \cdot OO_{g1}(t) + b_p \cdot \varphi_3(t) \cdot OO_{g1}(t) + b_p \cdot \varphi_4(t) \cdot OO_{g2}(t) \end{aligned}$$

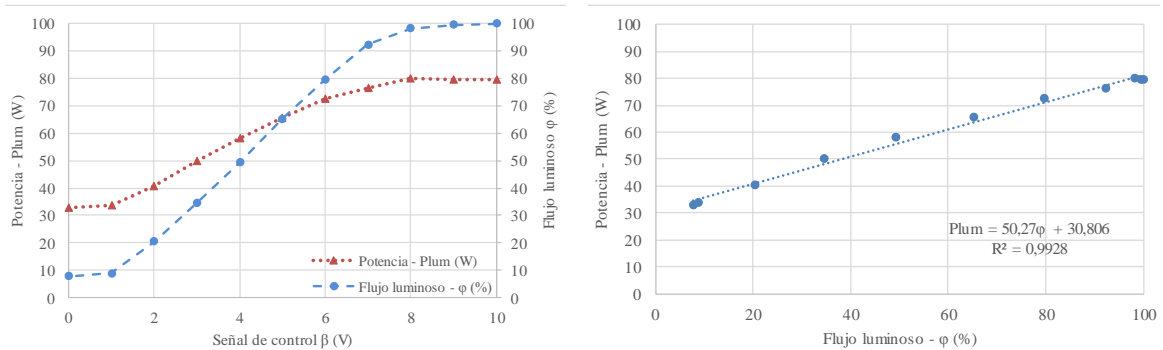
Considerando que las luminarias de un mismo grupo de control operan bajo las mismas consignas y al mismo tiempo, entonces todas éstas aportan la misma cantidad de porcentaje de flujo luminoso  $\varphi_k(t)$  para un instante de tiempo  $t$ . Por ende,  $\varphi_k(t)$  puede ser tomado como  $\varphi_{gi}(t)$  y reemplazado en la expresión de arriba como

se muestra a continuación, donde  $nl_{gi}$  es el número de luminarias que conforman el grupo de control  $gi$ .

$$\begin{aligned}
 P_{SIH}(t) &= a_P \cdot (3 \cdot OO_{g1}(t) + 1 \cdot OO_{g2}(t)) + b_P \\
 &\quad \cdot (OO_{g1}(t) \cdot (\varphi_{g1}(t) + \varphi_{g1}(t) + \varphi_{g1}(t)) + OO_{g2}(t) \cdot \varphi_{g2}(t)) \\
 &= a_P \cdot (3 \cdot OO_{g1}(t) + 1 \cdot OO_{g2}(t)) + b_P \cdot (OO_{g1}(t) \cdot 3 \cdot \varphi_{g1}(t) + OO_{g2}(t) \cdot 1 \cdot \varphi_{g2}(t)) \\
 &= a_P \cdot (nl_{g1} \cdot OO_{g1}(t) + nl_{g2} \cdot OO_{g2}(t)) + b_P \\
 &\quad \cdot (OO_{g1}(t) \cdot nl_{g1} \cdot \varphi_{g1}(t) + OO_{g2}(t) \cdot nl_{g2} \cdot \varphi_{g2}(t)) \\
 P_{SIH}(t) &= \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} (a_P + b_P \cdot \varphi_{gi}(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \\
 &= \sum_{gi=1}^{N_{gc}} nl_{gi} \cdot OO_{gi}(t) \cdot a_P + \sum_{gi=1}^{N_{gc}} nl_{gi} \cdot OO_{gi}(t) \cdot b_P \cdot \varphi_{gi}(t)
 \end{aligned}$$

La Figura 69 presenta las curvas de caracterización que permiten determinar la función de potencia  $Plum$  para el caso de la luminaria dimerizable de la sala de reuniones. Donde la Figura 69.a muestra una relación polinómica entre  $Plum$  con  $\varphi$  con  $\beta$ ; mientras que la Figura 69.b presenta una relación lineal entre la  $Plum$  y  $\varphi$ , donde  $a_P = 30,806$  (W) y  $b_P = 50,27\varphi$  (W).

Figura 69. Curvas de caracterización de la luminaria dimerizable



a. Curvas de potencia y porcentaje de flujo de luminoso b. Curva de potencia como función del porcentaje de flujo luminoso

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, se debe determinar el valor de  $P_{SIH}(t)$  en todo instante de tiempo con el fin de estimar el consumo de energía eléctrica del SIH, tal como indica la ecuación (5.12). Para ello, se deben determinar previamente los valores de  $OO_{gi}(t)$  y  $\varphi_{gi}(t)$ .

- **Formulación del problema de optimización**

Dado que los componentes utilizados (sensores de ocupación y fotoceldas) están orientados por diseño a reducir el consumo de energía, se plantea que la determinación de las condiciones de operación del SIH se pueden establecer a partir de la formulación y solución de un problema de optimización (minimización) no lineal entero mixto<sup>39</sup>, donde  $P_{SIH}(t)$  es la función objetivo expresada por (5.24).

$$\min P_{SIH}(t) = \min \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} (a_p + b_p \cdot \varphi_{gi}(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \quad (5.24)$$

La operación de cada grupo de control se define por las variables  $OO_{gi}$  y  $\varphi_{gi}$ , por lo que el número total de variables a determinar es igual a  $2 \cdot N_{gc}$  para cada instante o intervalo de tiempo  $t$  analizado. Los parámetros del modelo para cualquier instante de tiempo  $t$  son:  $a_p$ ,  $b_p$ ,  $NK$ ,  $N_{gc}$ .

La expresión (5.24) se basa en los parámetros  $a_p$  y  $b_p$  característicos de la técnica de dimerización; sin embargo, es aplicable a grupos de control con técnica On/Off, puesto que ésta puede ser considerada como un caso especial de la técnica de dimerización, en lo que a potencia consumida se refiere, donde  $\varphi_{gi} = 100\%$ .

Para el caso particular del aula IE305, los parámetros  $a_{p_{dim305}}$  y  $b_{p_{dim305}}$  se definieron como una proporción de los parámetros  $a_{p_{dimSR}}$  y  $b_{p_{dimSR}}$  de las luminarias dela

---

<sup>39</sup> En inglés MINLP: *Mixed integer nonlinear programming*.

sala de reuniones, tal como muestran las expresiones (5.25) y (5.26), donde  $P_{lum\_nom\_305}$  y  $P_{lum\_nom\_SR}$  son las potencias nominales de las luminarias del aula IE305 y de la Sala de reuniones, respectivamente.

$$a_{P_{dim305}} = \frac{P_{lum\_nom\_305} \cdot a_{P_{dimSR}}}{P_{lum\_nom\_SR}} \quad (5.25)$$

$$b_{P_{dim305}} = \frac{P_{lum\_nom\_305} \cdot b_{P_{dimSR}}}{P_{lum\_nom\_SR}} \quad (5.26)$$

Ahora bien, las restricciones del problema de minimización son de dos tipos: de operación y de iluminancia total. El número total de restricciones del problema de minimización es  $N_{TR}$  y se determina como muestra (5.27), donde  $N_{REO}$  es el número de restricciones del estado de operación,  $N_{RFLO}$  es el número de restricciones del porcentaje de flujo luminoso de operación y  $N_{RE}$  es el número de restricciones de iluminancia. La Tabla 27 muestra la formulación y cantidad de restricciones por estrategia para los dos primeros tipos de restricción (de operación y de flujo luminoso).

$$N_{TR} = N_{REO} + N_{RFLO} + N_{RE} \quad (5.27)$$

Tabla 27. Formulación y cantidad de restricción del estado de operación y flujo luminoso.

Estrategia de control	Restricciones del estado de operación		Restricciones del porcentaje de flujo luminoso de operación	
	Formulación	Cantidad	Formulación	Cantidad
A	$OO_{giA}(t) \in \{0,1\}$ $\forall giA \in \{1:N_{gc\_A}\}$	$N_{gc\_A}$	$\varphi_{giA}(t) = OO_{giA}(t)$ $\forall giA \in \{1:N_{gc\_A}\}$	$N_{gc\_A}$
	$OO_{giA}(t) \geq OO_{giA}(t-1)$	$N_{gc\_A}$		
B	$OO_{giB}(t) \in \{0,1\}$ $\forall giB \in \{1:N_{gc\_B}\}$	$N_{gc\_B}$	$\varphi_{giB}(t) = OO_{giB}(t)$ $\forall giB \in \{1:N_{gc\_B}\}$	$N_{gc\_B}$
C	$OO_{giC}(t) \in \{0,1\}$ $\forall giC \in \{1:N_{gc\_C}\}$	$N_{gc\_C}$	$0 \leq \varphi_{giC}(t) \leq 1$	$N_{gc\_C}$
			$\varphi_{giC}(t) \geq 0,06 \cdot OO_{giC}(t)$	$N_{gc\_C}$
	$OO_{giC}(t) \geq OO_{giC}(t-1)$	$N_{gc\_C}$	$\varphi_{giC}(t) \leq OO_{giC}(t)$ $\forall giC \in \{1:N_{gc\_C}\}$	$N_{gc\_C}$
D	$OO_{giD}(t) \in \{0,1\}$ $\forall giD \in \{1:N_{gc\_D}\}$	$N_{gc\_D}$	$0 \leq \varphi_{giD}(t) \leq 1$	$N_{gc\_D}$
			$\varphi_{giD}(t) \geq 0,06 \cdot OO_{giD}(t)$	$N_{gc\_D}$
			$\varphi_{giD}(t) \leq OO_{giD}(t)$	$N_{gc\_D}$

Estrategia de control	Restricciones del estado de operación		Restricciones del porcentaje de flujo luminoso de operación	
	Formulación	Cantidad	Formulación	Cantidad
			$\forall giD \in \{1:N_{gc\_D}\}$	
	$N_{REO} = 2N_{gc\_A} + N_{gc\_B} + 2N_{gc\_C} + N_{gc\_D}$		$N_{RFL} = N_{gc\_A} + N_{gc\_B} + 3N_{gc\_C} + 3N_{gc\_D}$	

Fuente: Elaboración propia

Toda variable  $00(t)$  es binaria dado que solo puede tomar dos valores, 0 o 1. Si  $\varphi(t)$  pertenece a las estrategias A y B, entonces es binaria e igual a  $00(t)$ . En caso de que  $\varphi(t)$  pertenezca a las estrategias C y D, entonces es una variable continua entre un valor mínimo (p.e. 6% o 0.06) y un valor máximo (100% o 1.00).

Dado que el problema se basa en variables binarias ( $00_{gi}(t)$ ) y continuas ( $\varphi_{gi}(t)$ ) y que la función objetivo tiene inmersa una no linealidad ( $00_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t)$ ), este problema de optimización es de tipo no lineal entero mixto (MINLP en inglés).

Es importante aclarar que una misma alternativa de control puede estar conformada simultáneamente por  $N_{gc\_A}$ ,  $N_{gc\_B}$ ,  $N_{gc\_C}$  y  $N_{gc\_D}$  grupos de control de las alternativas de control A, B, C y D, respectivamente, por lo que el número total de grupos de control es igual a la suma de éstos, como muestra (5.28). En caso de existir dos o más grupos de control de la misma estrategia de control, cada grupo debe operar de forma independiente, por lo que no hay relación entre los valores de  $00(t)$  y  $\varphi(t)$  de grupos de control diferentes que tengan la misma estrategia.

$$N_{gc} = N_{gc\_A} + N_{gc\_B} + N_{gc\_C} + N_{gc\_D} \quad (5.28)$$

El número total de restricciones de iluminancia ( $N_{RE}$ ) es igual al número de puntos  $p$  que se analicen. Cuando el recinto es usado en su totalidad,  $p$  pertenece al conjunto de puntos que describe la superficie de trabajo del recinto ( $p \in \{1:NP\}$ ), por tanto  $N_{RE}$  es igual a  $NP$  (Número de puntos que representan la superficie de trabajo). En caso de que haya un área de trabajo menor al área del recinto, entonces

$p$  solo pertenece al conjunto de puntos que describen esa área útil de trabajo, por tanto  $N_{RE}$  es igual a  $NP_{\text{útiles}}$ , donde  $NP_{\text{útiles}} < NP$ .

La expresión (5.29) presenta la restricción de iluminancia del punto  $p$ , donde  $e_D(p, t)$  debe haber sido cuantificada previamente.

$$e_T(p, t) = e_A(p, t) + e_D(p, t) \geq e_{\min} \quad (5.29)$$

En caso de que no haya ocupación en el instante de tiempo  $t$ , no hay problema de minimización a resolver y las variables  $OO_{giA}(t)$ ,  $OO_{giB}(t)$ ,  $OO_{giC}(t)$ ,  $OO_{giD}(t)$ ,  $\varphi_{giA}(t)$ ,  $\varphi_{giB}(t)$ ,  $\varphi_{giC}(t)$  y  $\varphi_{giD}(t)$  son igual a 0.

El Anexo C presenta la aplicación del problema de optimización para determinar  $P_{SIH}(t)$  en la sala de reuniones para cualquier instante tiempo  $t$  considerando el SIH existente; mientras el Anexo D presenta un ejemplo de aplicación del problema de optimización para el mismo recinto que considera tres grupos de control y con estrategias de control diferentes.

- **Consideración en la formulación del problema de optimización para su programación en GAMS**

Es importante indicar que podría darse  $Nt \cdot Ntd$  problemas de minimización que deberían ser resueltos para una misma alternativa de control<sup>40</sup>, donde  $Nt$  es el número de intervalos de tiempo diarios para un  $\Delta t$  igual a una hora y  $Ntd$  es el número de días tipo<sup>41</sup> considerados. El problema de minimización es diferente para cada hora debido a la variación de la iluminación natural disponible.

---

<sup>40</sup> Ello se expone en la sección Energía diaria consumida por tipo de día por el SIH del numeral 5.2.3.

<sup>41</sup> Día tipo ( $td$ ): Es el término empleado para referirse a cada uno de los nueve posibles días que resultan de la combinación de los tres tipos de perfiles de ocupación del recinto (bajo, medio y alto) y los tres tipos de perfiles de irradiación solar global incidente (bajo, medio y alto). Estos perfiles son definidos en el Anexo B.

Para determinar el consumo energético de todas las alternativas de control analizadas por recinto, el número de problemas de minimización debe ser resuelto  $Nt \cdot Ntd \cdot N_{SIH}$  veces cuando haya ocupación para todos los intervalos de tiempo  $Nt$ . El número de problemas será menor a  $Nt \cdot Ntd \cdot N_{SIH}$  cuando no haya ocupación en todos los intervalos de tiempo  $Nt$ , dado que no existe problema de minimización cuando no hay ocupación del recinto, en cuyo escenario todas las variables de operación serán igual a 0.

Por ejemplo, si se considera que el intervalo de tiempo de análisis es una hora y que la operación potencial del recinto ocurre de 6 a.m. a 10 p.m., entonces  $Nt = 17$ , y si además  $Ntd = 9$  y  $N_{SIH} = 756$  (recinto de 4 luminarias), se podría requerir la solución de 122 472 problemas de optimización, siempre y cuando en todos los intervalos haya ocupación. En caso de que la ocupación sea parcial (comportamiento esperado de cualquier recinto), como por ejemplo 6 horas por día, entonces habría solo 40 824 problemas de optimización a resolver.

Debido al número elevado de problemas de minimización a ser resuelto y que la estructura de los problemas es la misma, salvo las variaciones en los niveles de iluminación para cada intervalo de tiempo, se utilizó MATLAB para gestionar la creación de los problemas de optimización, los cuales fueron resueltos por medio del software GAMS. Se utilizó el *solver* BARON dado que el problema de minimización de  $P_{SIH}(t)$  es de naturaleza MINLP. La interacción entre MATLAB y GAMS es explicada en el Anexo E, el cual describe el uso de estos softwares para este trabajo de investigación.

La Tabla 28 presenta las restricciones de operación y de porcentaje de flujo luminoso para las estrategias de control ajustadas para su uso en GAMS; específicamente, se incluyen los términos  $p_{rA_{gi}}$ ,  $p_{rB_{gi}}$ ,  $p_{rC_{gi}}$ , y  $p_{rD_{gi}}$  que denotan la pertinencia de un grupo de control a una estrategia específica, por lo que estos términos con-

forman los vectores  $P_{rA_{gi}}$ ,  $P_{rB_{gi}}$ ,  $P_{rC_{gi}}$ , y  $P_{rD_{gi}}$ , compuesto por unos y ceros y de dimensión  $1 \times N_{gc}$ . Ese planteamiento permite relacionar un grupo de control con una estrategia de control específica y sus respectivas restricciones.

Las restricciones de iluminancia son descritas por (5.30), donde  $p_{rilum_p}$  corresponde al elemento del vector  $P_{rilum_p}$ , compuesto por unos y ceros de dimensión  $1 \times NP$ , el cual indica los puntos que describen la superficie de trabajo que pertenecen al área útil de trabajo, donde se lleva a cabo la tarea de iluminación según el uso del recinto (aula de clase u oficina).  $a_{p(k,p)}$  es elemento de la matriz  $A_{pT}$  de  $NK$  filas por  $NP$  columnas que almacena los aportes de iluminancia de cada luminaria del recinto a cada punto  $p$  sobre la superficie de trabajo (a una altura de 0,75 m) y  $e_{D_p}(t)$  es un elemento del vector de iluminancia natural interior para todos los puntos del recinto para un instante de tiempo  $t$ ,  $E_{D(1 \times NP)}(t)$ , donde  $Np$  es el número de puntos que describen la superficie de trabajo.

Tabla 28. Formulación de las restricciones del estado de operación y porcentaje de flujo luminoso para su uso en GAMS.

Estrategia de control	Restricciones del estado de operación		Restricciones del porcentaje de flujo luminoso de operación	
	Formulación	Cantidad	Formulación	Cantidad
A, B, C y D	$OO_{gi}(t) \in \{0,1\}$	$N_{gc}$		
A	$OO_{gi}(t) \cdot p_{rA_{gi}} \geq OO_{gi}(t-1) \cdot p_{rA_{gi}}$	$N_{gc\_A}$	$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rA_{gi}} = OO_{gi}(t) \cdot p_{rA_{gi}}$	$N_{gc\_A}$
B	-		$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rB_{gi}} = OO_{gi}(t) \cdot p_{rB_{gi}}$	$N_{gc\_B}$
C	$OO_{gi}(t) \cdot p_{rC_{gi}} \geq OO_{gi}(t-1) \cdot p_{rC_{gi}}$	$N_{gc\_C}$	$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rC_{gi}} \geq 0,06 \cdot OO_{gi}(t) \cdot p_{rC_{gi}}$ $\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rC_{gi}} \leq OO_{gi}(t) \cdot p_{rC_{gi}}$	$N_{gc\_C}$
D	-		$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rD_{gi}} \geq 0,06 \cdot OO_{gi}(t) \cdot p_{rD_{gi}}$ $\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rD_{gi}} \leq OO_{gi}(t) \cdot p_{rD_{gi}}$	$N_{gc\_D}$
		$N_{REO} = N_{gc} + N_{gc\_A} + N_{gc\_C}$	$N_{RFL} = N_{gc\_A} + N_{gc\_B} + 2N_{gc\_C} + 2N_{gc\_D}$	

Fuente: Elaboración propia

$$p_{rilum_p} \cdot \left( e_T(p, t) = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} OO_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t) \cdot a_{p(k,p)} \cdot z_{(gi,k)} + e_{D_p}(t) \right) \geq emin \cdot p_{rilum_p} \quad (5.30)$$

### 5.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SIH

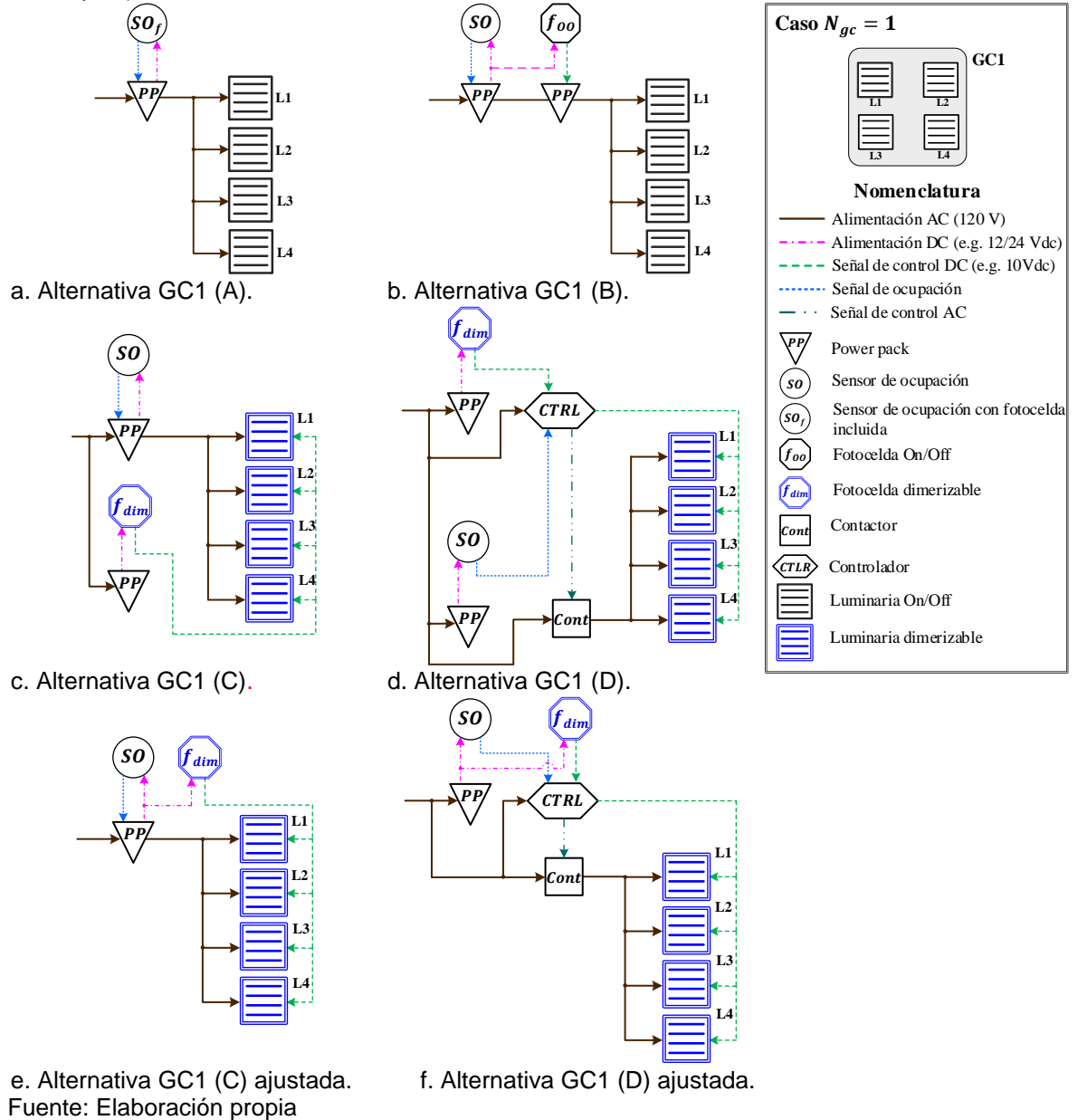
La inversión inicial para la implementación de una alternativa de control de un SIH corresponde al costo de adquisición e instalación de los componentes requeridos para cualquiera de los siguientes dos casos: i) Un sistema eléctrico de iluminación existente según RETILAP o un SIH existente que se desee modernizar o mejorar o ii) Un SIH nuevo a ser implementado. Donde cada uno de estos casos demandará la adquisición de una cantidad diferente de componentes. Para determinar dicha cantidad, inicialmente se establece el número de los componentes requeridos para una alternativa específica sin importar si hay o no componentes existentes. Posteriormente, para el caso de un sistema existente, se procede a identificar cuáles y cuántos componentes se podrían reutilizar o no y a partir de esta identificación se determina la cantidad de componentes nuevos o adicionales necesarios para la implementación de la alternativa de control. Para el caso de un sistema nuevo, las cantidades requeridas serán las mismas cantidades de componentes nuevos.

En ese sentido, se deben estimar entonces, las siguientes cantidades requeridas de componentes: el número de sensores de ocupación ( $N_{SO_{rq}}$ ), power-packs para sensores de ocupación ( $Np_{SO_{rq}}$ ), fotoceldas On/Off ( $N_{foo_{rq}}$ ), power-packs para fotoceldas On/Off ( $Np_{foo_{rq}}$ ), fotoceldas dimerizables ( $N_{fd_{rq}}$ ), power-packs para fotoceldas dimerizables ( $Np_{fd_{rq}}$ ), controladores ( $N_{CTRL_{rq}}$ ), contactores ( $N_{Ctor_{rq}}$ ), luminarias On/Of ( $N_{Loo_{rq}}$ ) y luminarias dimerizables ( $N_{Ld_{rq}}$ ). Por otro lado, las cantidades de los componentes existentes se determinan a partir de un inventario del recinto y son:  $N_{SO_{ex}}$ ,  $Np_{SO_{ex}}$ ,  $N_{foo_{ex}}$ ,  $N_{fd_{ex}}$ ,  $Np_{foo_{ex}}$ ,  $Np_{fd_{ex}}$ ,  $N_{CTRL_{ex}}$ ,  $N_{Ctor_{ex}}$ ,  $N_{Loo_{ex}}$  y  $N_{Ld_{ex}}$ . En caso de que sea un proyecto nuevo, estas cantidades son igual a cero (0) y las cantidades requeridas serán las mismas cantidades adicionales.

La cuantificación de los componentes requeridos para la operación de una alternativa de control se realiza a partir de los esquemas de componentes. La Figura 70 muestra el caso de un recinto con 4 luminarias que conforman un solo grupo de control. Las figuras 70.a a 70.d muestran los esquemas de las alternativas de control

posibles para este caso, donde cada alternativa se basa en una de las cuatro estrategias de control (A, B, C y D).

Figura 70. Esquemas de componentes para una configuración de un grupo de control (GC1: L1, L2, L3 y L4).



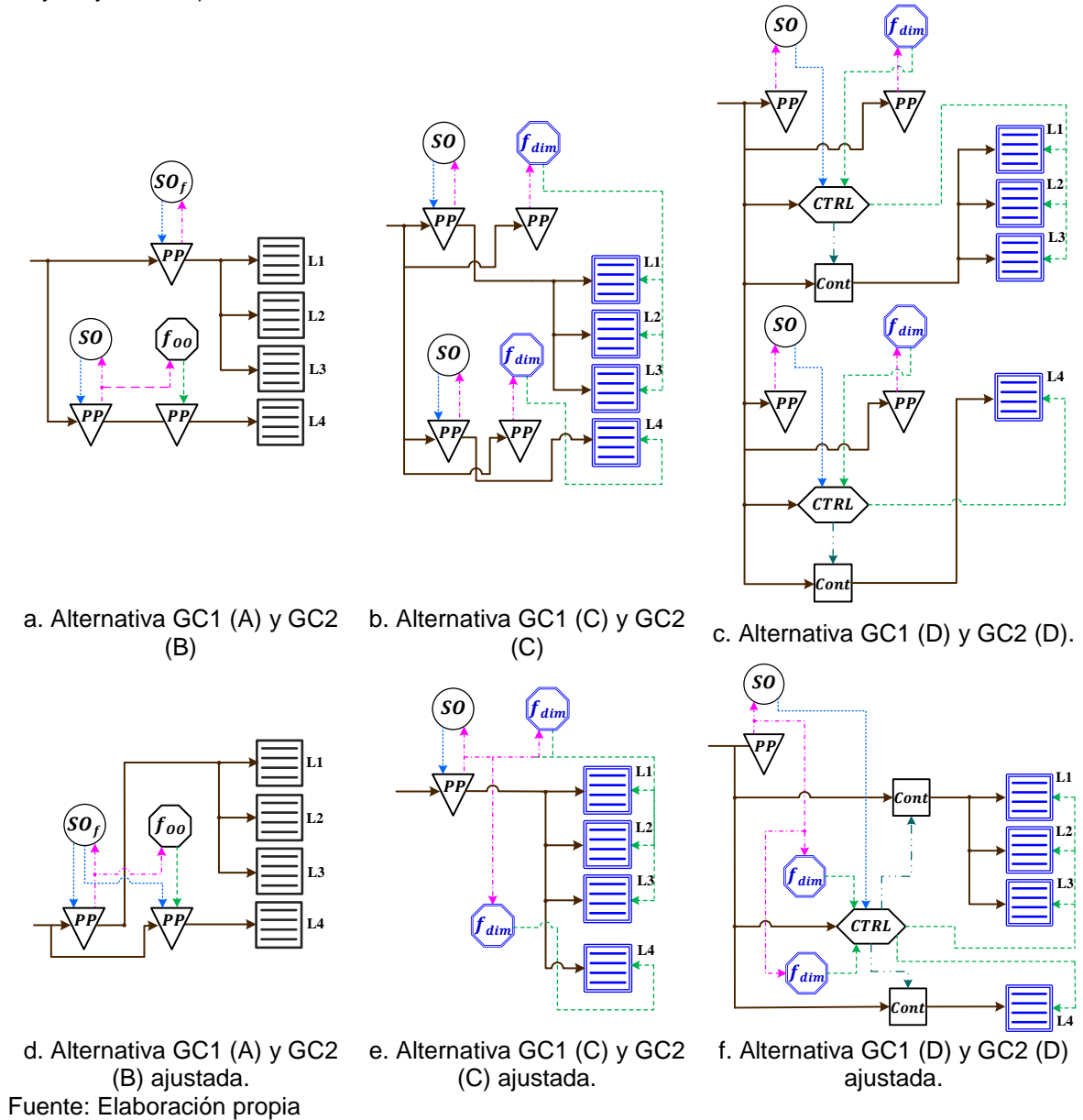
Ahora bien, la utilización de sensores (de ocupación y fotoceldas) conlleva el uso de power-packs (fuentes de alimentación DC para los sensores y unidades de control de alimentación del circuito de potencia – relés). Por ende, a medida que es mayor el número de grupos de control, aumentan el número de sensores y power-packs y su costo asociado. Esto puede ser mitigado si se utiliza un mismo power-pack para alimentar varios sensores de forma simultánea.

Las figuras 70.e y 70.f muestran esquemas de componentes modificados que ilustran el uso compartido de power-packs con respecto a los esquemas de las figuras 70.c y 70.d. para los cuales se reduce en el uso de power-pack por esquema. Esto permite reducir la cantidad de componentes requeridos y, en consecuencia, la inversión inicial, el consumo energético y los costos de mantenimiento del SIH.

Otro ejemplo de este análisis es mostrado por la Figura 71, que muestra los esquemas de componentes para un recinto de 4 luminarias, agrupadas en dos grupos de control, GC1 (L1, L2 y L3) y GC2 (L4).

Específicamente, se aprecia que el esquema de la Figura 71.d, respecto al esquema de la Figura 71.a, reduce en 1 power-pack y 1 sensor de ocupación; el esquema de la Figura 71.e, respecto al esquema de la Figura 71.e, reduce en 3 power-packs y 1 sensor de ocupación; y el esquema de la Figura 71.f, respecto al esquema de la Figura 71.c, reduce en 3 power-packs, 1 sensor de ocupación y 1 controlador.

Figura 71. Esquemas de componentes para una configuración de dos grupos de control (GC1: L1, L2 y L3 y GC2:L4).



La Tabla 29 resume las implicaciones del ajuste de los esquemas de componentes considerando los dos ejemplos analizados. Se indican las cantidades requeridas para cada alternativa, las cantidades para los esquemas modificados y la reducción (ahorro).

Tabla 29. Cantidad de componentes requeridos considerando un ahorro.

Alternativas de control	Estrategia de control A		Estrategia de control B				Estrategia de control C				Estrategia de control D					
	P <sub>SO</sub>	SO <sub>F</sub>	P <sub>SO</sub>	SO	P <sub>foo</sub>	Foo	P <sub>SO</sub>	SO	P <sub>fd</sub>	Fd	P <sub>SO</sub>	SO	P <sub>fd</sub>	Fd	CTRL	Cont
$N_{gc} = 1$ Fig. 70.a	Inicial	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mejorada	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$GC1 \rightarrow A$	Ahorro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$N_{gc} = 1$ Fig. 70.b	Inicial	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mejorada	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$GC1 \rightarrow B$	Ahorro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$N_{gc} = 1$ Fig. 70.c	Inicial	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-
	Mejorada	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-
$GC1 \rightarrow C$	Ahorro	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
$N_{gc} = 1$ Fig. 70.d	Inicial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1
	Mejorada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	1
$GC1 \rightarrow D$	Ahorro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
$N_{gc} = 2$ Fig. 71.a	Inicial	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mejorada	1	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$GC1 \rightarrow A$	Ahorro	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$N_{gc} = 2$ Fig. 71.b	Inicial	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-	-
	Mejorada	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	-	-	-	-	-
$GC1 \rightarrow C$	Ahorro	-	-	-	-	-	-	1	1	2	-	-	-	-	-	-
$N_{gc} = 2$ Fig. 71.c	Inicial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2
	Mejorada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	1
$GC1 \rightarrow D$	Ahorro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2	-	1

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de establecer las cantidades mínimas requeridas para cada alternativa de control, se establecieron lineamientos para cada componente, tal como muestra la Tabla 30.

Si el dimensionamiento del SIH se realiza para un recinto cuyo sistema de iluminación artificial aún no ha sido instalado, se tiene que las cantidades establecidas a partir de la Tabla 30 serán las cantidades a ser adquiridas. Ahora, si el estudio de dimensionamiento del SIH se realiza en un recinto con sistema iluminación artificial existente, se debe determinar qué componentes existentes pueden ser reusados ya que esto reducirá el costo financiero de la alternativa de control.

Tabla 30. Cuantificación de los componentes requeridos por una alternativa de control determinada.

Variable	Consideración	Expresión
$N_{SO_{rq}}$	<p>La cantidad de sensores de ocupación <math>N_{SO_{rq}}</math> depende del número de grupos de control con estrategia A (<math>Ngc_A</math>).</p> <p>Por otro lado, se debe tener en cuenta las especificaciones técnicas de sensores de ocupación disponibles en el mercado, indican la necesidad de instalar un sensor de ocupación por cada 60 m<sup>2</sup> aproximadamente. Por tanto, <math>N_{SO_{rq}}</math> se calcula como el número entero de la relación <math>(A + 60)/60</math>; por ejemplo, si A (área del recinto) es igual a 130 m<sup>2</sup>, entonces <math>N_{SO_{rq}} = 3</math>.</p>	$N_{SO_{rq}} = \max\left(Ngc_A, \left\lceil \frac{A + 60}{60} \right\rceil\right)^{42}$
$Np_{SO_{rq}}$	<p>Un power-pack cumple dos funciones dentro del SIH; éste actúa como fuente de alimentación para los sensores, y como relé para ayudar a controlar el flujo de potencia hacia otros power-pack y hacia las luminarias a partir de la señal de control de ocupación y nivel de iluminación proveniente de las fotoceldas On/Off o la fotocelda incluida en el mismo sensor de ocupación. Entonces, lo anterior sugiere que se debe tener en cuenta, los dos tipos de funciones que ejerce el power-pack para determinar el número requerido de los mismos, cuando estos son asociados solo a los sensores de ocupación, tal y como se muestra a continuación:</p> <p><u>Como fuente de alimentación únicamente</u></p> <p>Dado que el modelado lumínico estudiado en este proyecto aplica para recintos con áreas de hasta 100 m<sup>2</sup>, se tendría como máximo un total de 2 sensores de ocupación en un recinto, los cuales pueden ser alimentados por un solo power-pack.</p> <p>En general, un power-pack puede alimentar cargas de hasta 2 400 VA (I=20A), lo que equivale a 30 luminarias de 80 W o 40 luminarias de 60 W.</p> <p>Si se tiene en cuenta que la densidad de carga<sup>43</sup> de las aulas y oficinas del Edificio de Ingeniería Eléctrica puede oscilar entre 10 W/m<sup>2</sup><sup>44</sup> y 15 W/m<sup>2</sup><sup>45</sup>, entonces un power-pack podría soportar el suministro de un recinto entre 160 m<sup>2</sup> y 240 m<sup>2</sup>, respectivamente<sup>46</sup>.</p> <p><u>Como relé y fuente de alimentación</u></p> <p>Es importante mencionar que esta condición solo aplica cuando la estrategia de control A y B hacen parte de la alternativa de control. Donde en A el power-pack alimenta el sensor de ocupación con fotocelda incluida y controla el flujo de potencia hacia las luminarias. Mientras que en B éste alimenta el sensor de ocupación y controla el flujo de potencia hacia el power-pack que alimenta la fotocelda On/Off. Bajo esta condición, indiscutiblemente es necesario que haya un power-pack por grupo de control con estrategia A.</p> <p>De acuerdo a lo anterior <math>Np_{SO_{rq}}</math> es obtenido por medio de la expresión de la derecha.</p>	$Np_{SO_{rq}} = \max(1, Ngc_A)$

<sup>42</sup>  $\lceil n \rceil$  denota el mayor número entero contenido en  $n$ . Si  $n = 2,66$ , entonces  $\lceil n \rceil = 3$ .

<sup>43</sup> La densidad de carga hace referencia al valor representativo de la potencia de las luminarias instaladas por unidad de superficie. Si hay 4 luminarias de 80 W y el área del recinto es 20 m<sup>2</sup>, entonces la densidad de carga será 16 W/m<sup>2</sup> (=4\*80 W /20 m<sup>2</sup>).

<sup>44</sup> El aula IE305 tiene un área de 78,5 m<sup>2</sup> y 12 luminarias de 68 W, por ende la densidad de carga es 10,4 W/m<sup>2</sup>.

<sup>45</sup> La Sala de Reuniones tiene un área de 21,6 m<sup>2</sup> y 4 luminarias de 80 W, por ende la densidad de carga es 14,8 W/m<sup>2</sup>.

<sup>46</sup> Sí un power-pack puede atender una carga de 2 400 VA y la densidad de carga es 10 W/m<sup>2</sup>, entonces el área atendida sería igual a 240 m<sup>2</sup> (2 400 VA / 10 W/m<sup>2</sup>) y para una densidad de carga 15 W/m<sup>2</sup> el área será de 160 m<sup>2</sup> (2 400 VA / 15 W/m<sup>2</sup>). Estos cálculos se basan en un factor de potencia igual a 1.

Variable	Consideración	Expresión
$N_{f_{oo_{rq}}}$	La cantidad de fotoceldas On/Off depende de los grupos de control con estrategia B.	$N_{f_{oo_{rq}}} = Ng_{c_B}$
$Np_{f_{oo_{rq}}}$	Los power-packs asociados a sensores de ocupación y fotoceldas On/Off deben actuar como interruptores (relés), por lo que debe existir al menos un power-pack asociado a la ocupación (tal como ya se definió) y tantos power-packs para fotoceldas On/Off ( $Np_{f_{oo_{rq}}}$ ) como fotoceldas On/Off ( $N_{f_{oo_{rq}}}$ ). $N_{f_{oo_{rq}}}$ debe ser igual al número de grupos de control con la estrategia de control B.	$N_{f_{oo_{rq}}} = Np_{f_{oo_{rq}}}$
$N_{f_{d_{rq}}}$	La cantidad de fotoceldas dimerizables depende de los grupos de control con estrategias C y D.	$N_{f_{d_{rq}}} = Ng_{c_C} + Ng_{c_D}$
$Np_{f_{d_{rq}}}$	<p>En general, un sensor de ocupación, fotocelda dimerizable y fotocelda On/Off demandan 40 mA, 30 mA y 10 mA, respectivamente. De acuerdo con esto, un power-pack puede alimentar una carga de hasta 150 mA (a 24Vdc), entre sensores de ocupación y fotoceldas. Sin embargo, con el fin de evitar que los power packs operen de manera permanente al límite de su capacidad y que no haya sensores que puedan ser atendidos mutuamente por dos power-packs, se ha introducido un factor de seguridad correspondiente a 0,8. Esto acota la carga asociada a los power packs a <math>120 \text{ mA} = 150 \text{ mA} \cdot 0,8</math>. Usualmente, la carga debida al número de fotoceldas dimerizables (<math>N_{f_d}</math>) puede ser atendida por los power-packs de los sensores de ocupación y fotoceldas On/Off, ya que en conjunto tiene una capacidad de <math>(Np_{s_{o_{rq}}} + Np_{f_{oo_{rq}}}) \cdot 120 \text{ mA}</math>.</p> <p>Sin embargo, siempre debe haber al menos un power-pack para que alimente solo a las fotoceldas dimerizables. En caso de que la carga debida a las fotoceldas dimerizables, o parte de ella, no pueda ser cubierta por estos power-packs, se debe determinar el número de power-packs complementarios (<math>Np_{f_{d_{rq}}}</math>). Se incluirá power-packs complementarios siempre y cuando <math>Np_{f_{d_{rq}}} &gt; 0</math>, siendo esta variable un número entero. El cálculo de <math>Np_{f_d}</math> se basa en que la disponibilidad (<math>Disp</math>) por un factor de seguridad correspondiente a 0,8, cuyo resultado debe ser mayor a la <math>Carga</math>. Este factor evita</p> $Disp = (Np_{s_{o_{rq}}} + Np_{f_{oo_{rq}}} + Np_{f_{d_{rq}}}) \cdot 120 \text{ (mA)}$ $Carga = N_{s_{o_{rq}}} \cdot 40 + N_{f_{oo_{rq}}} \cdot 10 + N_{f_{d_{rq}}} \cdot 30 \text{ (mA)}$	$N_{f_{d_{rq}}} = 0 \rightarrow Np_{f_{d_{rq}}} = 0$ $N_{f_{d_{rq}}} \geq 1 \rightarrow Np_{f_{d_{rq}}} \geq 1$ $Disp \geq Carga$ $(Np_{s_{o_{rq}}} + Np_{f_{oo_{rq}}} + Np_{f_{d_{rq}}}) \cdot 120 \geq Carga$ $Np_{f_{d_{rq}}} \geq \frac{1}{120} \cdot Carga - (Np_{s_{o_{rq}}} + Np_{f_{oo_{rq}}})$ $Np_{f_{d_{rq}}} = \max \left\{ \left[ \frac{1}{120} \cdot Carga - (Np_{s_{o_{rq}}} + Np_{f_{oo_{rq}}}) \right]^{47} \right\}$
$N_{CTRL_{rq}}$	<p>Un controlador solo es usado cuando hay uno o más grupos de control que operan con la estrategia de control D. Las señales de entrada del controlador provienen del sensor de ocupación (una general) y las fotoceldas dimerizables (una por cada grupo de control con la estrategia D); las señales de salida de este dispositivo van dirigidas a las luminarias dimerizables (una señal por grupo de control con la estrategia D) y a los contactores (una señal por grupo de control con la estrategia D).</p> <p>Diversos dispositivos en el mercado pueden ser usados como controladores (e.g. tarjetas de desarrollo con entradas y salidas diversas). El número mínimo de entradas (<math>N_{inputs}</math>) y salidas (<math>N_{outputs}</math>) del controlador se cuantifican a continuación, donde <math>Ng_{c_D}</math> indica el número de grupo de control con la estrategia D.</p> $N_{inputs} = 1 + Ng_{c_D} \quad N_{outputs} = 2 \cdot Ng_{c_D}$	$Ng_{c_D} \geq 1 \rightarrow N_{CTRL_{rq}} = 1$ $Ng_{c_D} = 0 \rightarrow N_{CTRL_{rq}} = 0$

<sup>47</sup>  $[n]$  denota la aproximación hacia infinito. Si  $n = 2,66$ , entonces  $[2,66] = 3$

Variable	Consideración	Expresión
$N_{Ctorrq}$	En una alternativa de control hay tantos contactores como grupos de control con la estrategia D. Por cada contactor se debe incluir un relé para adaptar la señal de control de salida del controlador (de DC a AC).	$N_{Ctorrq} = Ngc_D$
$N_{Looqrq}$	La cantidad de luminarias On/Off depende de los grupos de control con estrategias de control A y B.	$N_{Looqrq} = \sum_{gi=1}^{Ngc} N_{lum\_oo\_gi}$
$N_{Ldrrq}$	La cantidad de luminarias On/Off depende de los grupos de control con estrategias de control C y D.	$N_{Ldrrq} = \sum_{gi=1}^{Ngc} N_{lum\_dim\_gi}$

Fuente: Elaboración propia

A partir de las tablas 30 y 31 y de MATLAB es posible determinar las cinco cantidades asociadas a cada uno de los componentes: existentes ( $N_{ex}$ ), requeridas ( $N_{rq}$ ), adicionales ( $\Delta N$ ), no reusadas ( $N_{nr}$ ) y reusadas ( $N_{ru}$ ). La cantidad de unidades existentes se obtiene a partir de un inventario del sistema de iluminación artificial existente, la cantidad de unidades requeridas se determinan con base en lo indicado en la Tabla 30, las cantidades de unidades a ser reusadas y no reusadas se establecen con base en  $N_{rq}$  y  $N_{ex}$  se determinan con base en lo indicado en la Tabla 31, mientras que la cantidad de unidades adicionales a ser adquiridas es la diferencia entre  $N_{rq}$  y  $N_{ru}$ . Un ejemplo de la cuantificación de los componentes requeridos y adicionales es presentado en el Anexo F.

Tabla 31. Cálculo de las cantidades de los componentes.

Componente	Cantidad de unidad			Adicionales
	Existentes	Requeridas	Reusadas / No reusadas	
Sensor de ocupación	$N_{SOex}$	$N_{SOrq}$	$N_{SOru} = \begin{cases} N_{SOex}, & N_{SOrq} \geq N_{SOex} \\ N_{SOrq}, & N_{SOrq} < N_{SOex} \end{cases}$ $N_{SOnr} = \begin{cases} 0, & N_{SOrq} \geq N_{SOex} \\ N_{SOex} - N_{SOrq}, & N_{SOrq} < N_{SOex} \end{cases}$	$\Delta N_{SO} = N_{SOrq} - N_{SOru}$
Power-pack para sensores de ocupación	$N_{pSOex}$	$N_{pSOrq}$	$N_{pSOru} = \begin{cases} N_{pSOex}, & N_{pSOrq} \geq N_{pSOex} \\ N_{pSOrq}, & N_{pSOrq} < N_{pSOex} \end{cases}$ $N_{pSONr} = \begin{cases} 0, & N_{pSOrq} \geq N_{pSOex} \\ N_{pSOex} - N_{pSOrq}, & N_{pSOrq} < N_{pSOex} \end{cases}$	$\Delta N_{pSO} = N_{pSOrq} - N_{pSOru}$
Fotocelda On/Off	$N_{fooex}$	$N_{foorq}$	$N_{fooru} = \begin{cases} N_{fooex}, & N_{foorq} \geq N_{fooex} \\ N_{foorq}, & N_{foorq} < N_{fooex} \end{cases}$ $N_{foonr} = \begin{cases} 0, & N_{foorq} \geq N_{fooex} \\ N_{fooex} - N_{foorq}, & N_{foorq} < N_{fooex} \end{cases}$	$\Delta N_{foo} = N_{foorq} - N_{fooru}$

Componente	Cantidad de unidad		
	Existentes	Requeridas	Reusadas / No reusadas
Power-pack para fotocelda On/Off	$N_{pfoo_{ex}}$	$N_{pfoo_{rq}}$	$N_{pfoo_{ru}} = \begin{cases} N_{pfoo_{ex}}, & N_{pfoo_{rq}} \geq N_{pfoo_{ex}} \\ N_{pfoo_{rq}}, & N_{pfoo_{rq}} < N_{pfoo_{ex}} \end{cases}$ $N_{pfoo_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{pfoo_{rq}} \geq N_{pfoo_{ex}} \\ N_{pfoo_{ex}} - N_{pfoo_{rq}}, & N_{pfoo_{rq}} < N_{pfoo_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{pfoo} = N_{pfoo_{rq}} - N_{pfoo_{ru}}$
Fotocelda dimerizable	$N_{fd_{ex}}$	$N_{fd_{rq}}$	$N_{fd_{ru}} = \begin{cases} N_{fd_{ex}}, & N_{fd_{rq}} \geq N_{fd_{ex}} \\ N_{fd_{rq}}, & N_{fd_{rq}} < N_{fd_{ex}} \end{cases}$ $N_{fd_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{fd_{rq}} \geq N_{fd_{ex}} \\ N_{fd_{ex}} - N_{fd_{rq}}, & N_{fd_{rq}} < N_{fd_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{fd} = N_{fd_{rq}} - N_{fd_{ru}}$
Power-pack para fotocelda dimerizable	$N_{pfd_{ex}}$	$N_{pfd_{rq}}$	$N_{pfd_{ru}} = \begin{cases} N_{pfd_{ex}}, & N_{pfd_{rq}} \geq N_{pfd_{ex}} \\ N_{pfd_{rq}}, & N_{pfd_{rq}} < N_{pfd_{ex}} \end{cases}$ $N_{pfd_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{pfd_{rq}} \geq N_{pfd_{ex}} \\ N_{pfd_{ex}} - N_{pfd_{rq}}, & N_{pfd_{rq}} < N_{pfd_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{pfd} = N_{pfd_{rq}} - N_{pfd_{ru}}$
Controlador	$N_{CTRL_{ex}}$	$N_{CTRL_{rq}}$	$N_{CTRL_{ru}} = \begin{cases} N_{CTRL_{ex}}, & N_{CTRL_{rq}} \geq N_{CTRL_{ex}} \\ N_{CTRL_{rq}}, & N_{CTRL_{rq}} < N_{CTRL_{ex}} \end{cases}$ $N_{CTRL_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{CTRL_{rq}} \geq N_{CTRL_{ex}} \\ N_{CTRL_{ex}} - N_{CTRL_{rq}}, & N_{CTRL_{rq}} < N_{CTRL_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq}} - N_{CTRL_{ru}}$
Contactador	$N_{Ctor_{ex}}$	$N_{Ctor_{rq}}$	$N_{Ctor_{ru}} = \begin{cases} N_{Ctor_{ex}}, & N_{Ctor_{rq}} \geq N_{Ctor_{ex}} \\ N_{Ctor_{rq}}, & N_{Ctor_{rq}} < N_{Ctor_{ex}} \end{cases}$ $N_{Ctor_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{Ctor_{rq}} \geq N_{Ctor_{ex}} \\ N_{Ctor_{ex}} - N_{Ctor_{rq}}, & N_{Ctor_{rq}} < N_{Ctor_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{Ctor} = N_{Ctor_{rq}} - N_{Ctor_{ru}}$
Luminarias On/Off	$N_{Loo_{ex}}$	$N_{Loo_{rq}}$	$N_{Loo_{ru}} = \begin{cases} N_{Loo_{ex}}, & N_{Loo_{rq}} \geq N_{Loo_{ex}} \\ N_{Loo_{rq}}, & N_{Loo_{rq}} < N_{Loo_{ex}} \end{cases}$ $N_{Loo_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{Loo_{rq}} \geq N_{Loo_{ex}} \\ N_{Loo_{ex}} - N_{Loo_{rq}}, & N_{Loo_{rq}} < N_{Loo_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq}} - N_{Loo_{ru}}$
Luminarias dimerizales	$N_{Ld_{ex}}$	$N_{Ld_{rq}}$	$N_{Ld_{ru}} = \begin{cases} N_{Ld_{ex}}, & N_{Ld_{rq}} \geq N_{Ld_{ex}} \\ N_{Ld_{rq}}, & N_{Ld_{rq}} < N_{Ld_{ex}} \end{cases}$ $N_{Ld_{nr}} = \begin{cases} 0, & N_{Ld_{rq}} \geq N_{Ld_{ex}} \\ N_{Ld_{ex}} - N_{Ld_{rq}}, & N_{Ld_{rq}} < N_{Ld_{ex}} \end{cases}$
			$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq}} - N_{Ld_{ru}}$

Fuente: Elaboración propia

La expresión (5.31) relaciona la cantidad de power-packs para sensores de ocupación y fotoceldas requerida por el SIH,  $NT_{pp}$ . A partir de este valor y la cantidad de controladores, se puede estimar la potencia consumida debida a los componentes de control y auxiliares del SIH,  $P_{aux}$ , tal como muestra (5.32), donde  $P_{nom_{ppCA}}$  es la potencia nominal consumida por el power-pack en corriente alterna (e.g. 0,250 W),  $N_{CTRL_{rq}}$  es el número de controladores requeridos y  $P_{nom_{CTRL}}$  es la potencia nominal consumida por un controlador (e.g. 0,300 W). Para este análisis se asume el

consumo de potencia de los power-packs y controladores al 75% dado que no estarán operando al 100% de su capacidad. Es importante indicar que la potencia nominal consumida por las fotoceldas y sensores es tenida en cuenta dentro de  $Pnom_{PPCA}$ , ya que el *power pack* es su unidad de alimentación.

$$NT_{PP} = Np_{SO_{rq}} + Np_{foo_{rq}} + Np_{fd_{rq}} \quad (5.31)$$

$$P_{aux} = 0,75 \left( NT_{PP} \cdot Pnom_{PPCA} + N_{CTRL_{rq}} \cdot Pnom_{CTRL} \right) \quad (5.32)$$

#### 5.4. ESTIMACIÓN DEL COSTO FINANCIERO TOTAL DE CADA ALTERNATIVA

Cada alternativa de control es considerada como un proyecto de inversión cuyo costo financiero total se define como el valor presente neto (VPN). El VPN es un índice financiero utilizado para evaluar alternativas de inversión con base en el comportamiento de los flujos financieros ( $CF_t$ ) para un horizonte de tiempo ( $HT$ ) determinado a una tasa de interés<sup>48</sup> dada ( $i$ ), también llamada tasa de descuento o retorno del costo de oportunidad de capital.  $CF_t$  se define como la diferencia entre el flujo entrante o ganancia ( $Cin_t$ ) y el flujo saliente o costo o gasto ( $Cout_t$ ), tal como muestra (5.34)

$$VPN(i, HT) = \sum_{t=0}^{HT} \frac{CF_t}{(1+i)^t} = -Cinv + \sum_{t=1}^{HT} \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (5.33)$$

$$CF_t = Cin_t - Cout_t \quad (5.34)$$

Dado que una alternativa de control no produce ganancias, solo se consideran flujos salientes. Para  $t = 0$ ,  $CF_0$  (flujo negativo) es igual a la inversión ( $Cinv$ ) o el costo de la implementación de la alternativa de control del SIH analizado; mientras para  $t \geq 1$ ,

<sup>48</sup> En general, el valor de la tasa de interés se define con base en el IPC o en la tasa de rendimiento del dinero en una cuenta bancaria, por lo que  $i$  tiende a tomar un valor entre 4% y 8%. Para este trabajo de investigación se definió en 5%.

$CF_t$  (flujo negativo) es igual a la suma de los costos de operación ( $Cop_t$ ) y los costos de mantenimiento del SIH ( $Cmn_t$ ).

### Costos de operación

$Cop_t$  es igual al costo del consumo energético anual ( $C_{eac}$ ) debida a la alternativa de control del SIH analizada, que se calcula como indica (5.35), donde  $C_{kWh}$  es el costo de la unidad de energía que se ha considerado en \$450/kWh<sup>49</sup>,  $P_{cons}(t)$  es la potencia consumida en el instante  $t$  por la alternativa de control y  $EAC_{ac}$  es el consumo energético estimado anual de la alternativa de control del SIH, la cual fue definida a partir de la expresión (5.21).

$$Cop(t) = C_{eac} = C_{kWh} \cdot \int_{t1}^{t2} P_{cons}(t) \cdot dt = C_{kWh} \cdot EAC_{ac} \quad (5.35)$$

### Inversión inicial

La inversión inicial se determina con base en el número y el costo de adquisición, instalación (mano de obra) y adecuación eléctrica (material eléctrico, punto de conexión eléctrica, ductería y cajas EMT para la instalación física, cableado de potencia y control) de los componentes adicionados ( $\Delta N$ ) y reusados ( $N_{ru}$ ) para dos casos: i) Un SIH a implementar, ii) Un sistema de iluminación eléctrico existente según RETILAP o un SIH que se desee modernizar o mejorar. El cálculo de las cantidades de los componentes se expuso en el numeral 5.3. Las tablas 32 y 33 detallan los costos estimados<sup>50</sup> de adquisición, instalación y adecuación eléctrica de los componentes adicionados y reusados, respectivamente. Estos costos consideran los dos casos expuestos variando el tipo de techo, cielo-raso ( $CR$ ) o a la vista ( $AV$ ), es decir bajo placa. En ese sentido, es importante indicar que la instalación a la vista es más

<sup>49</sup> Valor de kWh cobrado a la Universidad Industrial de Santander promedio durante enero y diciembre de 2017.

<sup>50</sup> Estos costos son estimados a partir de los costos de instalación de sistemas electrónicos en el Edificio de Ingeniería Eléctrica (Interventoría del Sistema de Automatización del Edificio de Ingeniería Eléctrica), un sondeo de mercado realizado con proveedores de la UIS y consulta de precios del mercado a través de Internet de material eléctrico y de iluminación.

costosa debido a que se requiere ductería y cajas EMT, en comparación al costo de conexión de componentes entre cielo-raso.

Tabla 32. Costos de adquisición, instalación y adecuación eléctrica de los componentes adicionales.

Componente adicionales	Adquisición	Instalación <sup>51</sup>	Costo de adquisición e instalación	Costo de adecuación eléctrica y física	
				Cieloraso	A la vista
Sensor de ocupación	\$ 150 000	$C_{INS_{SO}} = \$ 10\,000$	$C_{AI_{SO}} = \$ 160\,000$	$C_{AE_{SO}_{CR}} = \$ 5\,000$	$C_{AE_{SO}_{AV}} = \$ 20\,000$
Power-pack para el sensor de ocupación	\$ 50 000	$C_{INS_{pSO}} = \$ 10\,000$	$C_{AI_{pSO}} = \$ 60\,000$	$C_{AE_{pSO}_{CR}} = \$ 10\,000$	$C_{AE_{pSO}_{AV}} = \$ 30\,000$
Fotocelda On/Off	\$ 50 000	$C_{INS_{foo}} = \$ 10\,000$	$C_{AI_{foo}} = \$ 60\,000$	$C_{AE_{foo}_{CR}} = \$ 5\,000$	$C_{AE_{foo}_{AV}} = \$ 20\,000$
Power-pack para fotocelda On/Off	\$ 50 000	$C_{INS_{pfoo}} = \$ 10\,000$	$C_{AI_{pfoo}} = \$ 60\,000$	$C_{AE_{pfoo}_{CR}} = \$ 10\,000$	$C_{AE_{pfoo}_{AV}} = \$ 30\,000$
Fotocelda dimerizable	\$ 75 000	$C_{INS_{fd}} = \$ 10\,000$	$C_{AI_{fd}} = \$ 85\,000$	$C_{AE_{fd}_{CR}} = \$ 5\,000$	$C_{AE_{fd}_{AV}} = \$ 20\,000$
Power-pack para fotocelda dimerizable	\$ 50 000	$C_{INS_{pfd}} = \$ 10\,000$	$C_{AI_{pfd}} = \$ 60\,000$	$C_{AE_{pfd}_{CR}} = \$ 10\,000$	$C_{AE_{pfd}_{AV}} = \$ 30\,000$
Controlador <sup>52</sup>	\$ 300 000	$C_{INS_{CTRL}} = \$ 300\,000$	$C_{AI_{CTRL}} = \$ 600\,000$	$C_{AE_{CTRL}_{CR}} = \$ 50\,000$	$C_{AE_{CTRL}_{AV}} = \$ 80\,000$
Contactador <sup>53</sup>	\$ 50 000	$C_{INS_{Ctor}} = \$ 20\,000$	$C_{AI_{Ctor}} = \$ 70\,000$	$C_{AE_{Ctor}_{CR}} = \$ 5\,000$	$C_{AE_{Ctor}_{AV}} = \$ 5\,000$
Luminaria On/Off <sup>54</sup>	\$ 250 000	$C_{INS_{Loo}} = \$ 50\,000$	$C_{AI_{Loo}} = \$ 300\,000$	$C_{AE_{Loo}_{CR}} = \$ 5\,000$	$C_{AE_{Loo}_{AV}} = \$ 10\,000$
Luminaria dimerizable <sup>55</sup>	\$ 400 000	$C_{INS_{Ld}} = \$ 50\,000$	$C_{AI_{Ld}} = \$ 450\,000$	$C_{AE_{Ld}_{CR}} = \$ 10\,000$	$C_{AE_{Ld}_{AV}} = \$ 20\,000$

Fuente: Elaboración propia

La inversión inicial o costo del año 0 para la implementación de una alternativa de control, sea de un SIH existente o por ser implementado, se puede establecer a partir de las expresiones (5.29) a (5.32) para los dos tipos de techo, cielo-raso y a la vista.

Específicamente, las expresiones (5.36) y (5.37) muestran cómo calcular la parte de la inversión inicial debida a los componentes a ser adquiridos para techo con

<sup>51</sup> El costo de instalación considera la intervención del operario para fijar mecánicamente y conectar eléctricamente un componente. Se considera que este costo es igual para los tipos de techo, cielo-raso o a la vista, debido a que la diferenciación en el tipo de techo se incluye en el costo de adecuación eléctrica y física.

<sup>52</sup> El costo de instalación del controlador considera los servicios de programación y puesta en marcha. Se considera controlador a un dispositivo eléctrico que puede ser programado, tiene entradas y salidas diversas y puede operar de forma aislada, como por ejemplo una tarjeta de desarrollo.

<sup>53</sup> El costo de adecuación eléctrica del contactador para ambos tipos de techo es bajo, ya que dentro de la misma caja o tablero que se disponga para la controladora es posible ubicar el contactador. El costo del contactador incluye el costo del relé; por cada contactador se requiere un relé.

<sup>54</sup> El costo de la luminaria On/Off incluye los balastos On/Off.

<sup>55</sup> El costo de la luminaria dimerizable incluye el costo de los balastos dimerizables.

cielo-raso y techo con instalación a la vista, respectivamente. Estas expresiones aplican tanto para SIH existentes o por ser implementados.

$$\begin{aligned}
 CF_{0\_AD\_CR} = & \Delta N_{SO} \cdot (C_{AI\_SO} + C_{AE\_SO\_CR}) + \Delta N_{p_{SO}} \cdot (C_{AI\_p_{SO}} + C_{AE\_p_{SO\_CR}}) + \Delta N_{foo} \\
 & \cdot (C_{AI\_foo} + C_{AE\_foo\_CR}) + \Delta N_{p_{foo}} \cdot (C_{AI\_p_{foo}} + C_{AE\_p_{foo\_CR}}) + \Delta N_{fd} \\
 & \cdot (C_{AI\_fd} + C_{AE\_fd\_CR}) + \Delta N_{p_{fd}} \cdot (C_{AI\_p_{fd}} + C_{AE\_p_{fd\_CR}}) + \Delta N_{CTRL} \\
 & \cdot (C_{AI\_CTRL} + C_{AE\_CTRL\_CR}) + \Delta N_{Ctor} \cdot (C_{AI\_Ctor} + C_{AE\_Ctor\_CR}) + \Delta N_{Loo} \\
 & \cdot (C_{AI\_Loo} + C_{AE\_Loo\_CR}) + \Delta N_{Ld} \cdot (C_{AI\_Ld} + C_{AE\_Ctor\_Ld})
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

$$\begin{aligned}
 CF_{0\_AD\_AV} = & \Delta N_{SO} \cdot (C_{AI\_SO} + C_{AE\_SO\_AV}) + \Delta N_{p_{SO}} \cdot (C_{AI\_p_{SO}} + C_{AE\_p_{SO\_AV}}) + \Delta N_{foo} \\
 & \cdot (C_{AI\_foo} + C_{AE\_foo\_AV}) + \Delta N_{p_{foo}} \cdot (C_{AI\_p_{foo}} + C_{AE\_p_{foo\_AV}}) + \Delta N_{fd} \\
 & \cdot (C_{AI\_fd} + C_{AE\_fd\_AV}) + \Delta N_{p_{fd}} \cdot (C_{AI\_p_{fd}} + C_{AE\_p_{fd\_AV}}) + \Delta N_{CTRL} \\
 & \cdot (C_{AI\_CTRL} + C_{AE\_CTRL\_AV}) + \Delta N_{Ctor} \cdot (C_{AI\_Ctor} + C_{AE\_Ctor\_AV}) + \Delta N_{Loo} \\
 & \cdot (C_{AI\_Loo} + C_{AE\_Loo\_AV}) + \Delta N_{Ld} \cdot (C_{AI\_Ld} + C_{AE\_Ctor\_AV})
 \end{aligned} \tag{5.37}$$

Asimismo, si existe un sistema de iluminación eléctrico o un SIH que se desee modernizar o mejorar, las expresiones (5.38) y (5.39) muestran cómo calcular la parte de la inversión inicial debida a la reutilización de componentes para techo con cielo-raso y techo con instalación a la vista, respectivamente. Tales costos son estimados con base en la Tabla 5.12. Donde los costos debidos a la instalación adquieren peso asumiendo que los componentes de control y auxiliares reusados serán reubicados para permitir la implementación de la alternativa de control, cuando ésta contempla más de un grupo de control.

$$\begin{aligned}
CF_{0\_RU\_CR} &= C_{inv} \\
&= N_{SO_{ru}} \cdot (C_{INS\_SO} + C_{AE\_SO\_CR}) + Np_{SO_{ru}} \cdot (C_{INS\_pSO} + C_{AE\_pSO\_CR}) \\
&+ N_{foo_{ru}} \cdot (C_{INS\_foo} + C_{AE\_foo\_CR}) + Np_{foo_{ru}} \\
&\cdot (C_{INS\_pfoo} + C_{AE\_pfoo\_CR}) + N_{fd_{ru}} \cdot (C_{INS\_fd} + C_{AE\_fd\_CR}) + Np_{fd_{ru}} \\
&\cdot (C_{INS\_pfd} + C_{AE\_pfd\_CR}) + N_{CTRL_{ru}} \cdot (C_{INS\_CTRL} + C_{AE\_CTRL\_CR}) \\
&+ N_{Ctor_{ru}} \cdot (C_{INS\_Ctor} + C_{AE\_Ctor\_CR}) + N_{Loo_{ru}} \\
&\cdot (C_{INS\_Loo} + C_{AE\_Loo\_CR}) + N_{Ld_{ru}} \cdot (C_{INS\_Ld} + C_{AE\_Ld\_CR}) \\
&+ (N_{Ld_{ru}} + N_{Loo_{ru}}) \cdot C_{AI\_tL}
\end{aligned} \tag{5.38}$$

$$\begin{aligned}
CF_{0\_RU\_AV} &= C_{inv} \\
&= N_{SO_{ru}} \cdot (C_{INS\_SOV} + C_{AE\_SO\_AV}) + Np_{SO_{ru}} \cdot (C_{INS\_pSO} + C_{AE\_pSO\_AV}) \\
&+ N_{foo_{ru}} \cdot (C_{INS\_foo} + C_{AE\_foo\_AV}) + Np_{foo_{ru}} \\
&\cdot (C_{INS\_pfoo} + C_{AE\_pfoo\_AV}) + N_{fd_{ru}} \cdot (C_{INS\_fd} + C_{AE\_fd\_AV}) + Np_{fd_{ru}} \\
&\cdot (C_{INS\_pfd} + C_{AE\_pfd\_AV}) + N_{CTRL_{ru}} \cdot (C_{INS\_CTRL} + C_{AE\_CTRL\_AV}) \\
&+ N_{Ctor_{ru}} \cdot (C_{INS\_Ctor} + C_{AE\_Ctor\_AV}) + N_{Loo_{ru}} \\
&\cdot (C_{INS\_Loo} + C_{AE\_Loo\_AV}) + N_{Ld_{ru}} \cdot (C_{INS\_Ld} + C_{AE\_Ld\_AV}) \\
&+ (N_{Ld_{ru}} + N_{Loo_{ru}}) \cdot C_{AI\_tL}
\end{aligned} \tag{5.39}$$

Tabla 33. Costos de instalación y adecuación eléctrica de los componentes reusados.

Compo- nente adic- ionales	Costo de Instalación	Costo de adecuación eléctrica y física	
		Cieloraso	A la vista
Sensor de ocupación	$C_{INS\_SO} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 10\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$	$C_{AE\_SO\_CR} = \$ 5\,000$	$C_{AE\_SO\_AV} = \$ 20\,000$
Power-pack para el sensor de ocupación	$C_{INS\_pSO} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 10\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$	$C_{AE\_pSO\_CR} = \$ 10\,000$	$C_{AE\_pSO\_AV} = \$ 30\,000$
Fotocelda On/Off	$C_{INS\_foo} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 10\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$	$C_{AE\_foo\_CR} = \$ 5\,000$	$C_{AE\_foo\_AV} = \$ 20\,000$
Power-pack para fotocelda On/Off	$C_{INS\_pfoo} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 10\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$	$C_{AE\_pfoo\_CR} = \$ 10\,000$	$C_{AE\_pfoo\_AV} = \$ 30\,000$
Fotocelda dimerizable	$C_{INS\_fd} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 10\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$	$C_{AE\_fd\_CR} = \$ 5\,000$	$C_{AE\_fd\_AV} = \$ 20\,000$
Power-pack para fotocelda dimerizable	$C_{INS\_pfd} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 10\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$	$C_{AE\_pfd\_CR} = \$ 10\,000$	$C_{AE\_pfd\_AV} = \$ 30\,000$

Compo- nente adi- cionales	Costo de Instalación		Costo de adecuación eléctrica y física	
			Cieloraso	A la vista
Controlador <sup>56</sup>	$C_{INS\_CTRL} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 300\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$		$C_{AE\_CTRL\_CR} = \$ 50\,000$	$C_{AE\_CTRL\_AV} = \$ 80\,000$
Contactador	$C_{INS\_Ctor} = \begin{cases} \$ 0, & N_{gc} = 1 \\ \$ 20\,000, & N_{gc} > 1 \end{cases}$		$C_{AE\_Ctor\_CR} = \$ 5\,000$	$C_{AE\_Ctor\_AV} = \$ 5\,000$
Luminaria On/Off	$C_{INS\_Loo} = \$ 0$		$C_{AE\_Loo\_CR} = \$ 5\,000$	$C_{AE\_Loo\_AV} = \$ 10\,000$
Luminaria di- merizable	$C_{INS\_Ld} = \$ 0$		$C_{AE\_Ld\_CR} = \$ 10\,000$	$C_{AE\_Ld\_AV} = \$ 20\,000$
Tubos de una lumina- ria <sup>57</sup>	Adquisi- ción	Insta- lación	Costo de adquisición e instalación	
	\$ 40 000	\$ 5 000	$C_{AL\_tL} = \begin{cases} \$ 0, & N_{Ld_{ru}} + N_{Loo_{ru}} = 0 \\ \$ 45\,000, & N_{Ld_{ru}} + N_{Loo_{ru}} \geq 1; V_{uru}^* \geq 5; \end{cases}$	$C_{AE\_tL\_CR} = \$ 0$

\* $V_{uru}$ : Vida útil de los tubos de las luminarias reusadas. Si al momento de iniciar el proyecto (año 1), la vida útil de los tubos de las luminarias reusadas ya posee 5 años o más, este valor se debe tener en cuenta en la inversión inicial.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al costo de instalación de las luminarias reusadas, se indica que éste tiene un valor de \$0, debido a que las luminarias no deben ser reubicadas porque se considera que no implica cambios en el diseño de iluminación.

De acuerdo con lo anterior, la inversión inicial ( $CF_0$ ) para la implementación de la alternativa de control se define a través de las expresiones (5.40) y (5.41), como la suma del costo del año 0 asociado a los componentes adicionales y reusados, dependiendo del tipo de techo.  $CF_{0\_RU\_CR}$  y  $CF_{0\_RU\_AV}$  serán igual a \$0 sí se trata de un sistema a iluminación que no ha sido implementado.

$$C_0 = CF_{0\_AD\_CR} + CF_{0\_RU\_CR} \quad (5.40)$$

$$CF_0 = CF_{0\_AD\_AV} + CF_{0\_RU\_AV} \quad (5.41)$$

<sup>56</sup> El costo de instalación del controlador considera los servicios de programación y puesta en marcha.

<sup>57</sup> El costo de adquisición e instalación de los tubos solo se considera cuando se requiere realizar cambio de tubos de las luminarias reusadas, según información del tiempo transcurrido de la vida útil de éstos. Dado el tiempo de operación de los tubos fluorescentes en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, se considera pertinente cambiarlos.

## Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento se basan en este caso en el reemplazo de componentes al final de su vida útil. La vida útil de los componentes de un sistema determina los instantes de tiempo (años) en los cuales deben ser realizados cambios de los mismos; tales cambios se consideran costos de mantenimiento que se incluyen en el flujo de caja del proyecto.

Se estima que la vida útil promedio de los sensores, power-packs, controladores, contactores y luminarias (estructura metálica y balastos) es de 10 años<sup>58</sup>, y de los tubos fluorescentes de las luminarias es 5 años. Los instantes de tiempo para el cambio de los componentes del SIH dependen del instante de adquisición e instalación de los mismos. Para el caso de los componentes adicionados al SIH, se toma el tiempo desde el instante 0 años, por lo que su reemplazo debe ser realizado al año 10 y el cambio de los tubos de las luminarias adicionales se realizaría en los años 5 y 15<sup>59</sup> de horizonte de la evaluación del proyecto. Para el caso de los componentes reusados, se tiene en cuenta el año de inicio de operación formal del Edificio de Ingeniería Eléctrica (2013); por lo cual se deberá realizar cambios de luminarias en los años 1 y 11<sup>60</sup> y cambio de los componentes reusados en los años 6 y 16 del proyecto; se debe tener en cuenta que el año 0 es 2017.

## Esquema de flujos de caja

Con base en lo mencionado, se procede a construir el esquema de los flujos de caja del proyecto de modificación del SIH de un recinto interior, tal como lo muestra la Figura 72. Los costos considerados para determinar los flujos de caja son: costo de

---

<sup>58</sup> <http://www.lightsearch.com/resources/lightguides/sensors.html> (Consulta: Junio de 2017)

[http://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech\\_sheets/occupancy\\_controls\\_for\\_lighting.pdf](http://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/occupancy_controls_for_lighting.pdf) (Consulta: Junio de 2017)

<http://greenmanual.rutgers.edu/existingcommercial/strategies/occupancysensors.pdf> (Consulta: Junio de 2017)

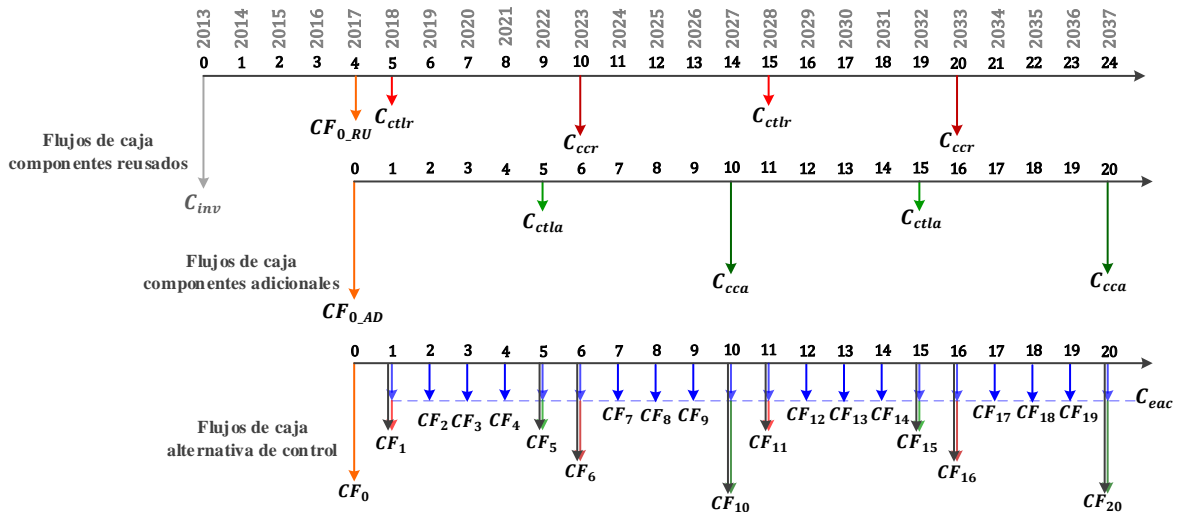
<sup>59</sup> No se incluye el año 10 dado que cuando se cambie la luminaria esto incluye la instalación de tubos fluorescentes nuevos.

<sup>60</sup> No se incluyen los años 6 y 16 dado que cuando se cambie la luminaria esto incluye la instalación de tubos fluorescentes nuevos.

inversión inicial ( $CF_0$ ), costo de la energía anual consumida ( $C_{eac}$ ), costo de cambio de tubos de luminarias reusadas ( $C_{ctr}$ ), costo de cambio de tubos de luminarias adicionales ( $C_{ctla}$ ), costo de cambio de componentes reusados ( $C_{ccr}$ )<sup>61</sup>, costo de cambio de componentes adicionales ( $C_{cca}$ )<sup>62</sup>. Los costos asociados al cambio de componentes incluyen la adquisición e instalación de los mismos. A continuación, se indica cómo determinar el valor de flujo de caja de cada año durante el horizonte de tiempo del proyecto (0 a 20 años)<sup>63</sup>.

$$\begin{array}{llll}
 CF_0 = CF_{0\_AD} + CF_{0\_RU} & CF_6 = C_{eac} + C_{ccr} & CF_{12} = C_{eac} & CF_{18} = C_{eac} \\
 CF_1 = C_{eac} + C_{ctr} & CF_7 = C_{eac} & CF_{13} = C_{eac} & CF_{19} = C_{eac} \\
 CF_2 = C_{eac} & CF_8 = C_{eac} & CF_{14} = C_{eac} & CF_{20} = C_{eac} \\
 CF_3 = C_{eac} & CF_9 = C_{eac} & CF_{15} = C_{eac} + C_{ctla} & \\
 CF_4 = C_{eac} & CF_{10} = C_{eac} + C_{cca} & CF_{16} = C_{eac} + C_{ccr} & \\
 CF_5 = C_{eac} + C_{ctla} & CF_{11} = C_{eac} + C_{ctr} & CF_{17} = C_{eac} & 
 \end{array}$$

Figura 72. Esquema de los flujos de caja del proyecto (modificación del SIH de un recinto) para un horizonte de tiempo de 20 años.



Fuente: Elaboración propia

<sup>61</sup>  $C_{ccr}$  ya incluye el costo de cambio de los tubos fluorescentes.

<sup>62</sup>  $C_{cca}$  ya incluye el costo de cambio de los tubos fluorescentes.

<sup>63</sup> Se considera un horizonte de 20 años dado que permite apreciar en detalle la dinámica del comportamiento financiero de la alternativa de control del SIH.

Las expresiones (5.42) a (5.45) permiten determinar los valores de  $C_{ccr}$ ,  $C_{cca}$ ,  $C_{ctrl}$  y  $C_{ctla}$ , donde  $C_{AI_{tL}}$  es el costo de adquisición e instalación de todos los tubos de una luminaria.

$$\begin{aligned}
 C_{ccr} = & N_{SO_{ru}} \cdot C_{AI_{SO}} + Np_{SO_{ru}} \cdot C_{AI_{pSO}} + N_{foo_{ru}} \cdot C_{AI_{foo}} + Np_{foo_{ru}} \\
 & \cdot C_{AI_{pfoo}} + N_{fd_{ru}} \cdot C_{AI_{fd}} + Np_{fd_{ru}} \cdot C_{AI_{pfd}} + N_{CTRL_{ru}} \\
 & \cdot C_{AI_{CTRL}} + N_{Ctor_{ru}} \cdot C_{AI_{Ctor}} + N_{Loo_{ru}} \cdot C_{AI_{Loo}} + N_{Ld_{ru}} \\
 & \cdot C_{AI_{Ld}}
 \end{aligned} \tag{5.42}$$

$$\begin{aligned}
 C_{cca} = & \Delta N_{SO} \cdot C_{AI_{SO}} + \Delta Np_{SO} \cdot C_{AI_{pSO}} + \Delta N_{foo} \cdot C_{AI_{foo}} + \Delta Np_{foo} \cdot C_{AI_{pfoo}} \\
 & + \Delta N_{fd} \cdot C_{AI_{fd}} + \Delta Np_{fd} \cdot C_{AI_{pfd}} + \Delta N_{CTRL} \cdot C_{AI_{CTRL}} \\
 & + \Delta N_{Ctor} \cdot C_{AI_{Ctor}} + \Delta N_{Loo} \cdot C_{AI_{Loo}} + \Delta N_{Ld} \cdot C_{AI_{Ld}}
 \end{aligned} \tag{5.43}$$

$$C_{ctrl} = (N_{Loo_{ru}} + N_{Ld_{ru}}) \cdot C_{AI_{tL}} \tag{5.44}$$

$$C_{ctla} = (\Delta N_{Loo} + \Delta N_{Ld}) \cdot C_{AI_{tL}} \tag{5.45}$$

## 5.5. ESTRUCTURA DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE MENOR COSTO FINANCIERO

La Figura 73 muestra el diagrama de las etapas que permiten tanto la estimación de la energía consumida por cada alternativa de control, como la selección de la alternativa de menor costo financiero total. En total, se establecieron 8 etapas de cálculo principales denominadas como **17, 18, 20, 22, 24, 25, 30 y 31**, y 23 sub-etapas. La Tabla 34 presenta las sub-etapas asociadas a cada etapa principal con su respectiva función o entrada. Los datos de entrada se obtienen de la caracterización de la irradiación solar incidente (CISI), la caracterización de la iluminancia natural interior (CINI), la caracterización de la iluminancia artificial interior (CIAI), la caracterización de la operación de las luminarias (COL), el proceso de definición de

los grupos de control y estrategias de control (DGEC), la determinación de los perfiles de ocupación e irradiación solar (DPOIS) y cuantificación de las cantidades de componentes de la alternativa de control para el SIH (CCSIH).

CISI permite estimar la irradiación solar vertical  $GV_{sur}(t)$  para cualquier instante de tiempo a partir de la irradiación solar global,  $Gh(t)$  medida, el factor de conversión entre la irradiancia solar ( $GW_{med}(t)$ ) e iluminancia exterior vertical ( $E_{E_{wmed}}(t)$ ) incidentes, medidas sobre una superficie  $W$ ,  $fc$ .

CINI permite establecer el factor de atenuación por ocupación,  $f_{oc}$  sobre la iluminancia natural estimada y la matriz de los factores de luz día ( $DF - Daylight Factor$ ) promedio,  $d_{f_{prom_w}}$  del mallado de puntos que representa la superficie de trabajo, para lo cual previamente se define el número total de puntos,  $NP$ , que describen la superficie de trabajo y su ubicación ( $P_{N(xp,yp)}$ ), a partir de los cuales es posible definir el vector  $P_{rilum_{p1 \times NP}}$ , que indica los puntos de la superficie de trabajo que pertenecen al área útil de trabajo.

CAI da a conocer el número de luminarias ( $NK$ ) y su distribución espacial ( $P_{Lk(xk,yk)}$ ) y las curvas de iluminancia de las luminarias en los ejes  $X$  y  $Y$ , denominadas  $Elx$  y  $Ely$ .

COL permite formular las condiciones de operación de las luminarias,  $COp$ , como funciones de su estado de operación en el instante de tiempo actual  $OO_k(t)$ , y el instante de tiempo anterior  $OO_k(t-1)$ , su porcentaje de flujo luminoso  $\varphi_k(t)$ , la iluminancia total interior del recinto  $E_{T_{1 \times NP}}(t)$  y el parámetro de nivel de iluminación interior mínimo que debe cumplirse sobre la superficie de trabajo,  $emin$ . COL también ayuda a establecer la curva característica de potencia de operación de la luminaria,  $P_{lum}(\varphi_k(t)) = a_p + b_p \cdot \varphi_k(t)$ , en función del porcentaje de flujo luminoso de operación de la misma.

DGEC permite definir el número de grupos de control,  $N_{gc}$ , en que puede ser agrupadas las luminarias del recinto, donde  $N_{gc}$  puede llegar a ser igual a  $NK$  y el número de estrategias de control,  $N_{ec}$ , así como los tipos de componentes de control, auxiliares y luminarias que las conforman<sup>64</sup>.

DPOIS permite determinar con base en el análisis de datos de ocupación y radiación solar de los recintos, un número determinado de escenarios  $N_{td}$ , para el estudio, dada la variabilidad de los datos. Estos escenarios son denominados tipo de día,  $t_d$ , producto de la combinación de niveles de ocupación e irradiación solar bajo, medio y alto, para los cuales es hallada su respectiva probabilidad de ocurrencia,  $PO_{td}$ . Para tal fin, es establecido el parámetro  $Nds$  (número de días de servicio del recinto) a partir de la observación de los datos de ocupación recopilados durante un año.

CCSIH permite estimar la cantidad de componentes requeridos,  $N_{rq}$  de control, auxiliares y luminarias para cada alternativa de control a analizar y los componentes que deben ser adicionados,  $\Delta N$  o pueden ser reusados  $N_{ru}$  para implementar la alternativa de control.

---

<sup>64</sup> Estrategia de control A  $\rightarrow$  SOF,  $P_{SO}$  y  $L_{oo}$

Estrategia de control B  $\rightarrow$  SO,  $f_{oo}$ ,  $P_{SO}$ ,  $P_{f_{oo}}$  y  $L_{oo}$

Estrategia de control C  $\rightarrow$  SO,  $f_d$ ,  $P_{SO}$ ,  $P_{f_d}$  y  $L_d$

Estrategia de control D  $\rightarrow$  SO,  $f_d$ ,  $P_{SO}$ ,  $P_{f_d}$ , CTRL, Ctor y  $L_d$

Figura 73. Diagrama de etapas de cálculo de la alternativa de menor costo financiero total.

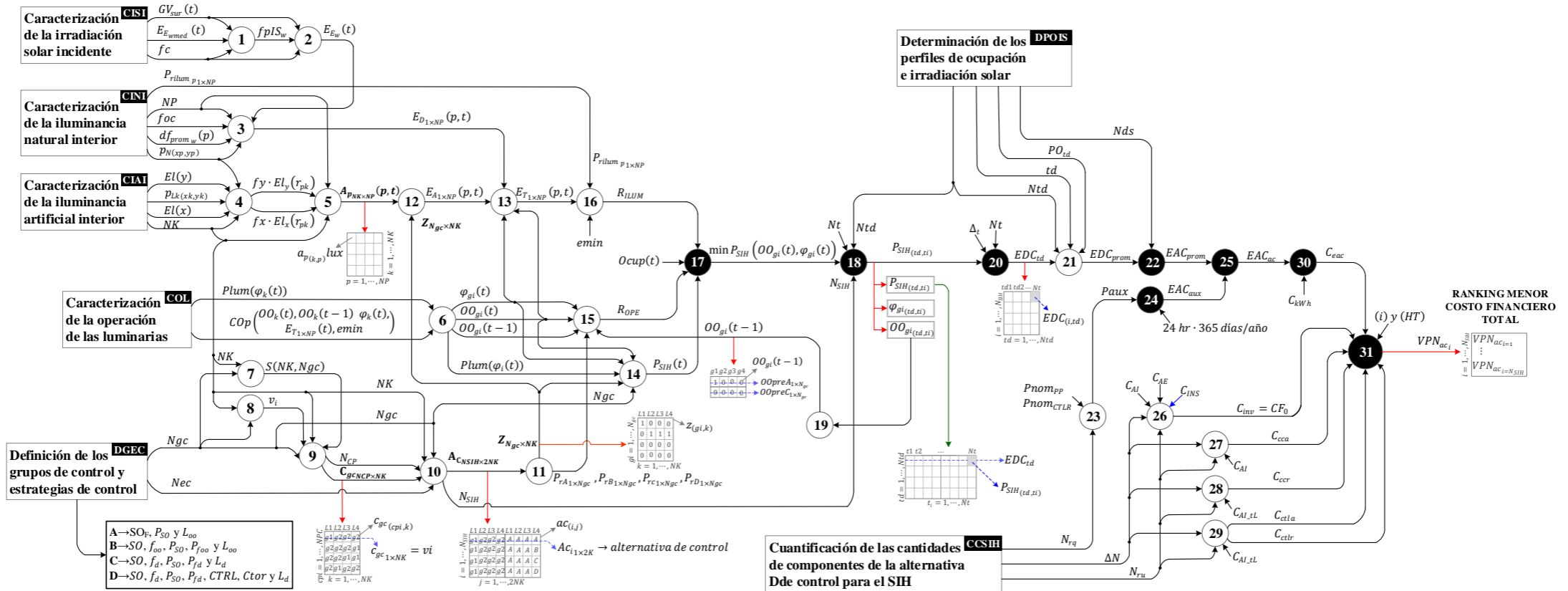


Tabla 34. Descripción de las etapas y sub-etapas de cálculo de la alternativa de menor costo financiero total.

Sub-etapa	Función/entrada	Etapas	Función
1	Establece el factor de ponderación de la irradiación solar vertical ( $GV_{sur}(t)$ ), $f_{pIS}$ sobre las ventanas de los recintos analizados.		
2	Permite estimar la iluminancia natural exterior incidente en las ventanas, $E_{E_w}(t)$ de la fachada sur.		
3	Permite estimar el vector de iluminancia natural interior de todos los puntos del mallado que describen la superficie de trabajo, $E_{D_{1 \times NP}}(p, t)$ .		
4	Permite expresar las curvas de iluminancia $Elx$ y $Ely$ como funciones de la distancia horizontal, $r_{pk}$ entre el punto de la luminaria, $p_{Lk(xk, yk)}$ y el punto del mallado de la superficie de trabajo, $P_{N(xp, yp)}$ , y los factores de participación, $fx$ y $fy$ de las curvas $Elx$ y $Ely$ en la iluminancia artificial del punto del mallado $p_{N(xp, yp)}$ .		
5	Permite estimar la matriz de las máximas contribuciones de iluminancia de cada luminaria $k$ para cada punto $p_{N(xp, yp)}$ del mallado, $A_{pNK \times NP}(p, t)$ .		
6	Establece las variables de operación y potencia de las luminarias en función de los grupos de control, $gi$ en que estas pueden ser agrupadas: $OO_{gi}(t)$ , $OO_{gi}(t - 1)$ , $\varphi_{gi}(t)$ $P_{lum}(\varphi_{gi}(t))$ .		
7	Estima el número de posibles configuraciones de organizar las luminarias para un número específico de grupos de control, $N_{gc}$ .		
8	Da a conocer las opciones de agrupación de las luminarias dentro de cada grupo de control, por medio de los vectores $v_i$ , los cuales muestran con cuántas luminarias se podría conformar cada grupo de control $gi$ .	17	Permite formular el problema de optimización, a partir de la función objetivo, $min P_{SIH}(t) = min \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} Plum(\varphi_{gi}(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)}$ que consiste en minimizar la potencia, $P_{SIH}(t)$ debida a la operación de una alternativa de control específica.
9	Permite determinar el número total de configuraciones posibles, $N_{cp}$ para $NK$ luminarias y $N_{gc}$ grupos de control y la matriz con las configuraciones identificadas ( $v_i$ ), $C_{gcNcp \times NK}$ , que tiene $N_{cp} * NK$ elementos.		
10	Permite estimar el número total de alternativas de control posibles, $N_{SIH}$ y la matriz con las configuraciones de alternativas de control identificadas, $A_{cNSIH \times 2NK}$ . En esta etapa ya se debe conocer el número y composición de las estrategias de control, $N_{ec}$ a ser estudiadas.		
11	Proporciona los vectores de pertinencia $p_{rA_{gi}}$ , $p_{rB_{gi}}$ , $p_{rC_{gi}}$ , $p_{rD_{gi}}$ , los cuales indican que luminaria de cada grupo de control se encuentra bajo la operación de las estrategias de control que conforman cada alternativa de control, $A_{c_{1 \times 2NK}}$ , y la matriz de pertenencia $Z_{N_{gc} \times NK}$ , cuya función es indicar la pertenencia de la luminaria $k$ al grupo de control $gi$ .		
12	Permite estimar el vector de iluminancia artificial interior de todos los puntos del mallado que describen la superficie de trabajo, $E_{A_{1 \times NP}}(p, t)$ .		
13	Permite estimar el vector de iluminancia total interior o iluminancia híbrida de todos los puntos del mallado que describen la superficie de trabajo, $E_{T_{1 \times NP}}(p, t)$ .		

Sub-etapa	Función/entrada	Etap	Función
14	Permite expresar la potencia consumida por las luminarias, $P_{SIH}(t)$ para cualquier instante de tiempo $t$ , en función de las variables de operación, $\varphi_{gi}(t)$ y $OO_{gi}(t)$ de los grupos de control.		
15	Permite establecer las restricciones de operación en función de $\varphi_{gi}(t)$ , $OO_{gi}(t)$ y $OO_{gi}(t - 1)$ para la formulación de la función objetivo.		
16	Permite establecer las restricciones de iluminancia total interior, de acuerdo a los puntos de la superficie de trabajo que pertenecen al área útil de trabajo.		
19	Proporciona los vectores memoria, $OO_{pre}A_{1 \times N_{gc}}$ y $OO_{pre}C_{1 \times N_{gc}}$ , los cuales almacenan el valor de $OO_{gi}(t - 1)$ para cada grupo de control que opera bajo las estrategias de control A y C.		
17	$\min P_{SIH}(t) = \min \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} Plum(\varphi_{gi}(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)}$ <p>(Ver columna de la derecha)</p>	18	<p>Permite solucionar el problema de optimización que da como resultado el menor valor de la potencia <math>P_{SIH(td,ti)}</math> y los valores de <math>\varphi_{gi(td,ti)}</math> y <math>OO_{gi(td,ti)}</math> asociados a las condiciones de operación de una alternativa de control específica para el instante de tiempo <math>ti</math> de <math>Nt</math> intervalos de tiempo considerados para un tipo de día <math>td</math> (ver figura abajo). Lo anterior sugiere que podría darse <math>Nt \cdot Ntd</math> problemas de minimización que deberían ser resueltos para una misma alternativa de control, donde <math>Ntd = 9</math>, corresponde a el número de tipos de día que caracterizan el número total de días de servicio del recinto durante el año. Entonces, para determinar el consumo energético de todas las alternativas de control analizadas por recinto, el número de problemas de minimización debe ser resuelto <math>Nt \cdot Ntd \cdot N_{SIH}</math> veces cuando haya ocupación para todos los intervalos de tiempo <math>Nt</math>.</p> <div style="text-align: center;"> <p style="text-align: center;"> <math>td</math>  <math>\leftarrow \Delta t \rightarrow</math>    ...    <math>\leftarrow \Delta t \rightarrow</math>  <math>t_{i=1}</math>    <math>t_{i=2}</math>    ...    <math>t_{i=Nt}</math> </p> </div> <p>Donde <math>\Delta_t = 1 \text{ hora}</math> y <math>Nt = \frac{Nhr}{\Delta_t}</math>, siendo <math>Nhr</math> el número de horas totales de servicio del recinto, el cual se toma como las 24 horas del día, para realizar los cálculos, debido a que los componentes de control y auxiliares operan de manera permanente. Sin embargo, para el caso de las luminarias, no habría problema de optimización que resolver, ya que no hay ocupación antes de las 6 a.m. y después de las 10 p.m. De manera tal que las horas de servicio para las luminarias corresponde solo a aquellas comprendidas entre la 6 a.m. y las 10 p.m.</p>
18	$P_{SIH_{ti}}(t)$ para cada una de las alternativas de control analizadas ( $N_{SIH}$ alternativas de control).	20	Permite estimar la energía diaria consumida por las luminarias, $EDC_{td} = \sum_{ti=1}^{Nt} P_{SIH(td,ti)} \cdot \Delta_t$ para un tipo de día $td$ para una alternativa de control específica.
20	$EDC_{td}$ (ver columna de la derecha)	22	Permite estimar la energía anual promedio consumida por las luminarias, $EAC_{prom} =$

Sub-etapa	Función/entrada	Etapa	Función
21	Permite estimar la energía diaria promedio consumida, $EDC_{prom} = \sum_{td=1}^{Ntd} PO_{td} \cdot EDC_{td}$ para una alternativa de control específica.		$EDC_{prom} \cdot Nds$ para una alternativa de control específica
23	Permite estimar la potencia consumida por los componentes de control y auxiliares, $P_{aux}$ la cual se asume tiene un comportamiento constante durante todo el tiempo que los componentes operan. Esta potencia es calculada a partir de la cantidad de componentes requeridos, $N_{rq}$ para implementar cada alternativa de control y la potencia nominal de estos, lo que indica que $P_{aux_{ii}}$ puede variar según la alternativa de control, dependiendo de la cantidad de sus componentes.	24	Permite estimar la energía anual consumida por los componentes de control y auxiliares, $EAC_{aux} = P_{aux} \cdot 24hr \cdot 365 \text{ días/año}$ .
22	$EAC_{prom}$ (ver columna de la derecha)	25	Permite estimar la energía anual consumida para una estrategia de control específica, $EAC_{ac} = EAC_{prom} + EAC_{aux}$
24	$EAC_{aux}$ (ver columna de la derecha)		
25	$EAC_{ac}$ (ver columna de la derecha)	30	Permite estimar el costo anual del consumo energético, $C_{eac} = EAC_{ac} \cdot C_{kWh}$ , a partir de $EAC_{ac}$ y el costo de la unidad de energía, $C_{kWh}$ .
26	Permite estimar el costo de la inversión inicial, $CF_0$ de una alternativa de control específica con base en la cantidad de componentes adicionales, $\Delta N$ y reusados, $N_{ru}$ , con sus respectivos costos de adquisición e instalación, $C_{AI}$ o solo de adquisición, $C_{INS}$ para los componente reusados y el costo de la adecuación eléctrica, $C_{AE}$ para ambos tipos de componentes.	31	Permite estimar el costo financiero total de cada alternativa de control analizada, el cual se define como el valor presente neto, $VPN_{ac,i}(i, HT) = -CF_0 + \sum_{t=1}^{HT} \frac{CF_t}{(1+i)^t}$ de los flujos financieros durante un horizonte de tiempo, $HT$ y una tasa de interés dada, $i$ . Tales flujos se determinan a partir de la inversión inicial, $CF_0$ el costo anual del consumo energético, $C_{eac}$ , el costo de cambio de los componentes de acuerdo a su vida útil, $C_{cca}$ , $C_{ccr}$ , $C_{ctla}$ y $C_{ctlr}$ . Este cálculo se realiza para todas las alternativas de control posibles y se selecciona aquella de menor valor (búsqueda exhaustiva).
27	Permite estimar el costo del cambio de los componentes adicionales (incluye las luminarias), $C_{cca}$ de acuerdo a su vida útil, $C_{AI}$ y $\Delta N$ para una alternativa de control específica.		
28	Permite estimar el costo del cambio de los componentes reusados (incluye las luminarias), $C_{ccr}$ de acuerdo a su vida útil, $C_{AI}$ y $N_{ru}$ para una alternativa de control específica.		
29	Permite estimar el costo del cambio de tubos de luminarias adicionales, $C_{ctla}$ y de tubos de luminarias reusadas, $C_{ctlr}$ con base el costo de adquisición en instalación de todos los tubos de la luminaria, $C_{AI_{TL}}$ y la cantidad de luminarias de ambos tipos.		
30	$C_{eac}$ (ver columna de la derecha)		

Fuente: Elaboración propia

## 6. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL DE MENOR COSTO FINANCIERO

---

Este capítulo aborda los resultados del consumo energético anual y costo financiero total de las alternativas de control (Sección 6.1), descripción de la alternativa de control de menor costo financiero total (Sección 6.2).

### 6.1. RESULTADOS DEL CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL Y COSTO FINANCIERO TOTAL

Las tablas 35 a 39 exponen los resultados obtenidos para la Sala de reuniones considerando diversos niveles de iluminancia mínima,  $e_{min}$  (300 lux, 400 lux, 500 lux y 600 lux)<sup>65</sup> y las tablas 40 y 41 presentan los resultados para el Aula IE-305 considerando un  $e_{min}$  de 300 lux<sup>66</sup>. Tales resultados se obtuvieron a partir de la aplicación del script desarrollado en MATLAB que permite hallar la alternativa de menor costo financiero total, considerando las cantidades de componentes existentes de la alternativa de control actualmente implementada en los espacios seleccionados.

---

<sup>65</sup> Se consideraron 4 valores de  $e_{min}$  para la Sala de reuniones debido a que el mínimo de los valores máximos de iluminancia artificial en los puntos críticos (p8, p9, p10 y p11) de la superficie de trabajo es superior a 600 lux. Tal valor de referencia se obtiene cuando las luminarias operando con un  $\varphi$  igual a 100%.

<sup>66</sup> Se consideró un solo valor de  $e_{min}$  para el aula IE305 debido a que el mínimo de los valores máximos de iluminancia artificial en los puntos de la superficie de trabajo es aproximadamente 340 lux. Tal valor de referencia se obtiene cuando las luminarias operando con un  $\varphi$  igual a 100%.

Estos resultados corresponden a 15 alternativas de control para valor de *emin* analizado; las filas 1 a 10 muestran las 10 mejores alternativas con el VPN más favorable; las demás filas muestran alternativas compuestas por un solo grupo de control (fila 11, 12 y 13), la alternativa (#756) con el mayor grado de automatización (fila 14), la cual presenta el menor consumo energético anual promedio y la fila 15 presenta la alternativa de referencia que hace operar a las luminarias ( $\varphi = 100\%$ ) siempre que haya presencia (sensor de ocupación), por lo que no hace uso de la iluminación natural.

Los resultados para cada alternativa están compuestos por: Número de la alternativa de control (columna 1), configuración de grupos de control (columna 2 a 5), estrategias de control bajo la cual operan cada una de las luminarias (columna 6 a 9), consumo energético anual promedio de las luminarias (*Clum*), consumo energético anual debido a los componentes de control y auxiliares (*Caux*), consumo energético anual total promedio (*Cea*), el valor presente neto (*VPN*) (unidades de millones de pesos M\$), la inversión inicial para la implementación de la alternativa (*II*), costo del consumo energético anual (*Ceac*), costo del cambio de los tubos de las luminarias reusadas (*Cctrlr*), costo del cambio de tubos de las luminarias adicionales (*Cctla*), costo del cambio de los componentes reusados (*Cccr*) y costo del cambio de los componentes adicionales (*Ccca*).

Con base en los datos mostrados por las tablas 34 a 37, se aprecia que la alternativa de control #3 es la alternativa de menor costo financiero total para la sala de reuniones en los cuatro casos de *emin*, con VPNs de -\$1.579, -\$1.634, -\$1.747 y -\$1.800. Esta alternativa consiste en una configuración de un solo grupo de control en donde las luminarias operan con la estrategia de control C (sensor de ocupación con fotocelda dimerizable). La Tabla 38 muestra las cantidades existentes, requeridas, adicionales, reusadas y no reusadas respecto de cambiar la alternativa de control actual (#4) por la alternativa de control de menor costo financiero total (#3).

Si la Sala de reuniones continúa operando con la alternativa de control actual (#4), presenta para la E3T los siguientes valores financiero total, -\$1.897, -\$1.952, -

\$2.065 y -\$2.120, según el nivel de iluminancia. Tales valores financieros son menos atractivos debido a que se deberá incurrir en costos de mantenimiento mayores por el reemplazo de los componentes al final de su vida útil.

Tabla 35. Conjunto de resultados seleccionados obtenidos en la búsqueda de la alternativa de control de menor costo financiero total (VPN) para la sala de reuniones, a partir de un  $e_{min} = 300 \text{ lux}$

Alternativa de control													Clum (kWh)	Caux (kWh)	Cea (kWh)	VPN (M\$)	II (M\$)	Ceac (M\$)	Cctlr (M\$)	Cctla (M\$)	Cccr (M\$)	Ccca (M\$)
Grupos de control				Estrategias de control																		
#Alt	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4														
3	1	1	1	1	C1	C1	C1	C1	28.082	3.285	31.367	-1.579	0.070	0.014	0.180	0.000	2.165	0.000				
79	1	1	2	2	C1	C1	C2	C2	16.785	3.285	20.070	-1.768	0.200	0.009	0.180	0.000	2.165	0.085				
111	1	2	2	1	C1	C2	C2	C1	19.350	3.285	22.635	-1.782	0.200	0.010	0.180	0.000	2.165	0.085				
47	2	2	1	2	C2	C2	C1	C2	23.447	3.285	26.732	-1.805	0.200	0.012	0.180	0.000	2.165	0.085				
63	2	2	2	1	C2	C2	C2	C1	24.659	3.285	27.944	-1.812	0.200	0.013	0.180	0.000	2.165	0.085				
15	1	2	2	2	C1	C2	C2	C2	27.068	3.285	30.353	-1.825	0.200	0.014	0.180	0.000	2.165	0.085				
31	2	1	2	2	C2	C1	C2	C2	27.259	3.285	30.544	-1.826	0.200	0.014	0.180	0.000	2.165	0.085				
95	1	2	1	2	C1	C2	C1	C2	27.396	3.285	30.681	-1.827	0.200	0.014	0.180	0.000	2.165	0.085				
159	1	2	3	3	C1	C2	C3	C3	16.374	1.643	18.017	-1.851	0.270	0.008	0.180	0.000	2.105	0.170				
479	3	3	1	2	C3	C3	C1	C2	16.785	1.643	18.428	-1.853	0.270	0.008	0.180	0.000	2.105	0.170				
4	1	1	1	1	D1	D1	D1	D1	28.082	5.256	33.338	-1.897	0.000	0.015	0.180	0.000	2.835	0.000				
1	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	50.934	1.643	52.577	-2.580	1.220	0.024	0.000	0.180	0.220	1.200				
2	1	1	1	1	B1	B1	B1	B1	50.934	3.285	54.219	-2.798	1.355	0.024	0.000	0.180	0.220	1.320				
756	1	2	3	4	D1	D2	D3	D4	16.374	3.614	19.988	-2.990	0.91	0.009	0.180	0.000	2.775	0.465				
0	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	337.163	1.643	338.805	-4.185	1.220	0.152	0.000	0.180	0.220	1.200				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Conjunto de resultados seleccionados obtenidos en la búsqueda de la alternativa de control de menor costo financiero total (VPN) para la sala de reuniones, a partir de un  $e_{min} = 400 \text{ lux}$

Alternativa de control													Clum (kWh)	Caux (kWh)	Cea (kWh)	VPN (M\$)	II (M\$)	Ceac (M\$)	Cctlr (M\$)	Cctla (M\$)	Cccr (M\$)	Ccca (M\$)
Grupos de control				Estrategias de control																		
#Alt	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4														
3	1	1	1	1	C1	C1	C1	C1	38.007	3.285	41.292	-1.634	0.070	0.019	0.180	0.000	2.165	0.000				
79	1	1	2	2	C1	C1	C2	C2	23.568	3.285	26.853	-1.806	0.200	0.012	0.180	0.000	2.165	0.085				
63	2	2	2	1	C2	C2	C2	C1	32.695	3.285	35.980	-1.857	0.200	0.016	0.180	0.000	2.165	0.085				
47	2	2	1	2	C2	C2	C1	C2	32.881	3.285	36.166	-1.858	0.200	0.016	0.180	0.000	2.165	0.085				
31	2	1	2	2	C2	C1	C2	C2	34.035	3.285	37.320	-1.864	0.200	0.017	0.180	0.000	2.165	0.085				
111	1	2	2	1	C1	C2	C2	C1	34.046	3.285	37.331	-1.864	0.200	0.017	0.180	0.000	2.165	0.085				
95	1	2	1	2	C1	C2	C1	C2	35.212	3.285	38.497	-1.871	0.200	0.017	0.180	0.000	2.165	0.085				
15	1	2	2	2	C1	C2	C2	C2	36.362	3.285	39.647	-1.877	0.200	0.018	0.180	0.000	2.165	0.085				
159	1	2	3	3	C1	C2	C3	C3	21.963	1.643	23.605	-1.882	0.270	0.011	0.180	0.000	2.105	0.170				
479	3	3	1	2	C3	C3	C1	C2	23.509	1.643	25.152	-1.891	0.270	0.011	0.180	0.000	2.105	0.170				
4	1	1	1	1	D1	D1	D1	D1	38.007	5.256	43.263	-1.952	0.000	0.019	0.180	0.000	2.835	0.000				
1	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	61.631	1.643	63.273	-2.640	1.220	0.028	0.180	0.220	0.220	1.200				
2	1	1	1	1	B1	B1	B1	B1	61.631	3.285	64.916	-2.858	1.355	0.029	0.000	0.180	0.220	1.320				
756	1	2	3	4	D1	D2	D3	D4	21.963	3.614	25.576	-3.021	0.910	0.012	0.180	0.000	2.775	0.465				
0	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	337.163	1.643	338.805	-4.185	1.220	0.152	0.000	0.180	0.220	1.200				

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 6. Selección de la alternativa de control de menor costo financiero.

Tabla 37. Conjunto de resultados seleccionados obtenidos en la búsqueda de la alternativa de control de menor costo financiero total (VPN) para la sala de reuniones, a partir de un  $e_{min} = 500 \text{ lux}$ 

Alternativa de control										Clum (kWh)	Caux (kWh)	Cea (kWh)	VPN (M\$)	II (M\$)	Ceac (M\$)	Cctlr (M\$)	Cctla (M\$)	Cccr (M\$)	Ccca (M\$)
Grupos de control				Estrategias de control															
#Alt	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4											
3	1	1	1	1	C1	C1	C1	C1	58.172	3.285	61.457	-1.747	0.070	0.028	0.180	0.000	2.165	0.000	
79	1	1	2	2	C1	C1	C2	C2	44.581	3.285	47.866	-1.923	0.200	0.022	0.180	0.000	2.165	0.085	
63	2	2	2	1	C2	C2	C2	C1	46.673	3.285	49.958	-1.935	0.200	0.022	0.180	0.000	2.165	0.085	
31	2	1	2	2	C2	C1	C2	C2	46.938	3.285	50.223	-1.937	0.200	0.023	0.180	0.000	2.165	0.085	
111	1	2	2	1	C1	C2	C2	C1	48.497	3.285	51.782	-1.945	0.200	0.023	0.180	0.000	2.165	0.085	
47	2	2	1	2	C2	C2	C1	C2	49.399	3.285	52.684	-1.950	0.200	0.024	0.180	0.000	2.165	0.085	
15	1	2	2	2	C1	C2	C2	C2	50.112	3.285	53.397	-1.954	0.200	0.024	0.180	0.000	2.165	0.085	
95	1	2	1	2	C1	C2	C1	C2	50.508	3.285	53.793	-1.957	0.200	0.024	0.180	0.000	2.165	0.085	
479	3	3	1	2	C3	C3	C1	C2	37.692	1.643	39.335	-1.970	0.270	0.018	0.180	0.000	2.105	0.170	
159	1	2	3	3	C1	C2	C3	C3	40.512	1.643	42.155	-1.986	0.270	0.019	0.180	0.000	2.105	0.170	
4	1	1	1	1	D1	D1	D1	D1	58.172	5.256	63.428	-2.065	0.000	0.029	0.180	0.000	2.835	0.000	
1	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	94.483	1.643	96.126	-2.824	1.220	0.043	0.180	0.220	0.220	1.200	
2	1	1	1	1	B1	B1	B1	B1	94.483	3.285	97.768	-3.042	1.355	0.044	0.000	0.180	0.220	1.320	
756	1	2	3	4	D1	D2	D3	D4	37.185	3.614	40.799	-3.107	0.910	0.018	0.180	0.000	2.775	0.465	
0	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	337.163	1.643	338.805	-4.185	1.220	0.152	0.000	0.180	0.220	1.200	
3	1	1	1	1	C1	C1	C1	C1	58.172	3.285	61.457	-1.747	0.000	0.028	0.180	0.000	2.165	0.000	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Conjunto de resultados seleccionados obtenidos en la búsqueda de la alternativa de control de menor costo financiero total (VPN) para la sala de reuniones, a partir de un  $e_{min} = 600 \text{ lux}$ 

Alternativa de control										Clum (kWh)	Caux (kWh)	Cea (kWh)	VPN (M\$)	II (M\$)	Ceac (M\$)	Cctlr (M\$)	Cctla (M\$)	Cccr (M\$)	Ccca (M\$)
Grupos de control				Estrategias de control															
#Alt	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4											
3	1	1	1	1	C1	C1	C1	C1	68.0	3.3	71.2	-1.80	0.070	0.032	0.180	0.000	2.165	0.000	
79	1	1	2	2	C1	C1	C2	C2	56.6	3.3	59.9	-1.99	0.200	0.027	0.180	0.000	2.165	0.085	
111	1	2	2	1	C1	C2	C2	C1	58.2	3.3	61.5	-2.00	0.200	0.028	0.180	0.000	2.165	0.085	
47	2	2	1	2	C2	C2	C1	C2	61.3	3.3	64.6	-2.02	0.200	0.029	0.180	0.000	2.165	0.085	
15	1	2	2	2	C1	C2	C2	C2	63.9	3.3	67.2	-2.03	0.200	0.030	0.180	0.000	2.165	0.085	
63	2	2	2	1	C2	C2	C2	C1	64.3	3.3	67.6	-2.03	0.200	0.030	0.180	0.000	2.165	0.085	
31	2	1	2	2	C2	C1	C2	C2	65.6	3.3	68.9	-2.04	0.200	0.031	0.180	0.000	2.165	0.085	
95	1	2	1	2	C1	C2	C1	C2	66.0	3.3	69.3	-2.04	0.200	0.031	0.180	0.000	2.165	0.085	
479	3	3	1	2	C3	C3	C1	C2	55.0	1.6	56.7	-2.07	0.270	0.025	0.180	0.000	2.105	0.170	
159	1	2	3	3	C1	C2	C3	C3	55.1	1.6	56.7	-2.07	0.270	0.026	0.180	0.000	2.105	0.170	
4	1	1	1	1	D1	D2	D3	D4	68.0	5.3	73.2	-2.12	0.000	0.033	0.180	0.000	2.835	0.000	
1	1	1	1	1	A1	A2	A3	A4	94.5	1.6	96.1	-2.82	1.220	0.043	0.000	0.180	0.220	1.200	
2	1	1	1	1	B1	B2	B3	B4	94.5	3.3	97.8	-3.04	1.355	0.044	0.000	0.180	0.220	1.320	
756	1	2	3	4	D1	D2	D3	D4	54.0	3.6	57.6	-3.20	0.910	0.026	0.180	0.000	2.775	0.465	
0	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	337.2	1.6	338.8	-4.19	1.220	0.152	0.000	0.180	0.220	1.200	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Cantidades de cada tipo de componentes de la alternativa de control No. 3 de la Sala de reuniones

Cantidades	$N_{SO}$	$N_{p_{SO}}$	$N_{foo}$	$N_{p_{foo}}$	$N_{fd}$	$N_{p_{fd}}$	$N_{CTRL}$	$N_{Ctor}$	$N_{Loo}$	$N_{Ld}$
Existentes	1	1	0	0	1	1	1	1	0	4
Requeridas	1	1	0	0	1	1	0	0	0	4
Adicionales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
No reusadas	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Reusadas	1	1	0	0	1	1	0	0	0	4

Fuente: Elaboración propia

Ahora, para el caso del aula IE305, se tiene que los datos mostrados por la Tabla 40, indican que la alternativa de control #1079 es la alternativa de menor costo financiero total (VPN de -\$4.989) con  $emin$  igual a 300 lux. Esta alternativa consiste en una configuración de tres grupos de control; el primer grupo está conformado por las luminarias L3 y L4 y operan con la estrategia de control A (sensor de ocupación con fotocelda incluida); segundo grupo está conformado por las luminarias L1, L2, L5 y L6 y operan con la estrategia de control A; tercer grupo está conformado por las luminarias L7 a L12 y operan con la estrategia de control C (sensor de ocupación y fotocelda dimerizable).

Si el aula 305 continúa operando con la alternativa de control actual (#1), presenta para la E3T un valor financiero total, -\$ 8,098, para un  $emin = 300$  lux. Tal valor financiero es menos atractivo debido a que se deberá incurrir en costos de operación mayores a causa de un mayor consumo energético.

Tabla 40. Conjunto de resultados seleccionados obtenidos en la búsqueda de la alternativa de control de menor costo financiero total (VPN) para el aula IE305, a partir de un  $emin = 300$  lux.

#Alt	Alternativa de control										Clum (kWh)	Caux (kWh)	Cea (kWh)	VPN (M\$)	II (M\$)	Ceac (M\$)	Cctlr (M\$)	Cctla (M\$)	Ccr (M\$)	Cca (M\$)
	Grupos de control					Estrategias de control														
	La	Lb	Lc	Ld	Le	La	Lb	Lc	Ld	Le										
1079	2	1	2	3	3	A2	A1	A2	C3	C3	0,439	0,071	0,510	-4,989	0,395	0,230	0,270	0	2,240	0,145
861	3	3	3	1	2	A3	A3	A3	C1	C2	0,500	0,024	0,523	-5,024	0,370	0,235	0,270	0	2,180	0,170
102	1	2	1	2	2	A1	B2	A1	B2	B2	0,489	0,047	0,536	-5,027	0,500	0,279	0,270	0	2,180	0,240
1095	2	1	2	3	3	A2	B1	A2	C3	C3	0,420	0,071	0,491	-5,056	0,525	0,221	0,270	0	2,180	0,265
890	1	2	2	3	3	A1	B2	B2	B3	B3	0,429	0,071	0,500	-5,068	0,500	0,251	0,270	0	2,180	0,240
233	2	2	2	1	1	A2	A2	A2	B1	B1	0,497	0,047	0,544	-5,071	0,330	0,245	0,270	0	2,180	0,120
886	1	2	2	3	3	A1	A2	A2	B3	B3	0,463	0,071	0,535	-5,088	0,370	0,241	0,270	0	2,240	0,120
150	2	1	1	2	2	B2	A1	A1	B2	B2	0,502	0,047	0,550	-5,101	0,330	0,247	0,270	0	2,180	0,120
891	1	2	2	3	3	A1	B2	B2	C3	C3	0,429	0,071	0,500	-5,104	0,525	0,225	0,270	0	2,180	0,265
1275	2	2	1	3	3	B2	B2	A1	C3	C3	0,423	0,071	0,500	-5,110	0,525	0,225	0,270	0	2,180	0,265
2	1	1	1	1	1	B1	B1	B1	B1	B1	0,568	0,043	0,615	-5,309	0,170	0,277	0,270	0	2,180	0,120
1	1	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	A1	1,132	0,024	1,156	-8,098	0	0,520	0,270	0	2,180	0

## Capítulo 6. Selección de la alternativa de control de menor costo financiero.

3	1	1	1	1	1	C1	C1	C1	C1	C1	0,596	0,047	0,644	-8,887	3,015	0,290	0	0,270	0,380	2,845
4	1	1	1	1	1	D1	D1	D1	D1	D1	0,371	0,049	0,420	-8,801	3,770	0,189	0	0,270	0,380	3,515
0	1	1	1	1	1	A1	A1	A1	A1	A1	1,332	0,024	1,355	-9,216	0	0,610	0,270	0	2,180	0
<p><i>La: Luminarias L1 y L2    Lb: Luminarias L3 y L4    Lc: Luminarias L5 y L6    Ld: Luminarias L7, L8 y L9</i>  <i>Le: Luminarias L10, L11 y L12</i></p>																				

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 41 muestra las cantidades existentes, requeridas, adicionales, reusadas y no reusadas respecto de cambiar la alternativa de control actual (#1) por la alternativa de control de menor costo financiero total (#1079).

Tabla 41. Cantidades de cada tipo de componentes de la alternativa de control No. 1079 del aula IE305.

Cantidades	$N_{SO}$	$N_{p_{SO}}$	$N_{foo}$	$N_{p_{foo}}$	$N_{fd}$	$N_{p_{fd}}$	$N_{CTRL}$	$N_{Ctor}$	$N_{Loo}$	$N_{Ld}$
Existentes	2	2	0	0	0	0	0	0	12	0
Requeridas	2	2	0	0	1	1	0	0	6	0
Adicionales	0	0	0	0	1	1	0	0	0	6
No reusadas	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
Reusadas	2	2	0	0	0	0	0	0	6	0

Fuente: Elaboración propia

## 6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE CONTROL SELECCIONADA (REPORTE TÉCNICO)

La descripción de la alternativa de control seleccionada para la sala de reuniones (alternativa #3) y el aula IE-305 (alternativa #1079), es presentada a partir de un reporte técnico que consta de:

### Especificaciones técnicas mínimas de los componentes que conforma la alternativa.

Éstas son mostradas por medio de la Tabla 42 y Tabla 44, cuya construcción se basa en la información disponible en el mercado de los componentes para iluminación y control que actualmente integran el SIH para ambos casos de estudio. Adicionalmente, se muestra el esquema general de conexión de la alternativa que puede ser usado como guía.

**Presupuesto para la implementación de la alternativa.**

Hace referencia al costo de inversión inicial. Particularmente, para la sala de reuniones, esta inversión constituye únicamente los costos de adecuación eléctrica y física de los componentes reusados, ya que la cantidad de componentes requeridos es igual a la existente, razón por la cual todos los componentes existentes excepto la controladora y el contactor podrán ser reusados y no existen cantidades adicionales o nuevas a adquirir. Mientras que para el aula IE-305 la inversión inicial está conformada por los costos de adquisición e instalación de los componentes adicionales, seis luminarias dimerizables y una fotocelda dimerizable con su power-pack, los costos de instalación de los componentes reusados debido a que hay más de un grupo de control, y por los costos de adecuación eléctrica y física de los componentes reusados y adicionales.

**Análisis energético.**

Para la Sala de reuniones éste se basa en dos aspectos, el consumo energético diario debido a cada escenario (tipo de día) estudiado, representado por la Figura 74, y el costo de operación y consumo energético anual para diversos niveles mínimos de iluminación, representado por la Fuente: Elaboración propia

En cuanto al aula IE 305, el análisis energético es abordado a partir de la Figura 76.

Es importante indicar que, aunque las alternativas de control seleccionadas tengan el menor costo financiero total, no siempre corresponderán a las alternativas de menor consumo energético anual.

• **Caso – Sala de reuniones**

La Tabla 42 muestra las especificaciones técnicas de la alternativa de control No. 3 para el espacio de la sala de reuniones, cuya inversión inicial  $I = \$70\,000$  y corresponde a los costos de adecuación eléctrica y física de los componentes reusados para tipo techo, cielo raso.

Tabla 42. Especificaciones técnicas de la alternativa de control seleccionada para la Sala de reuniones

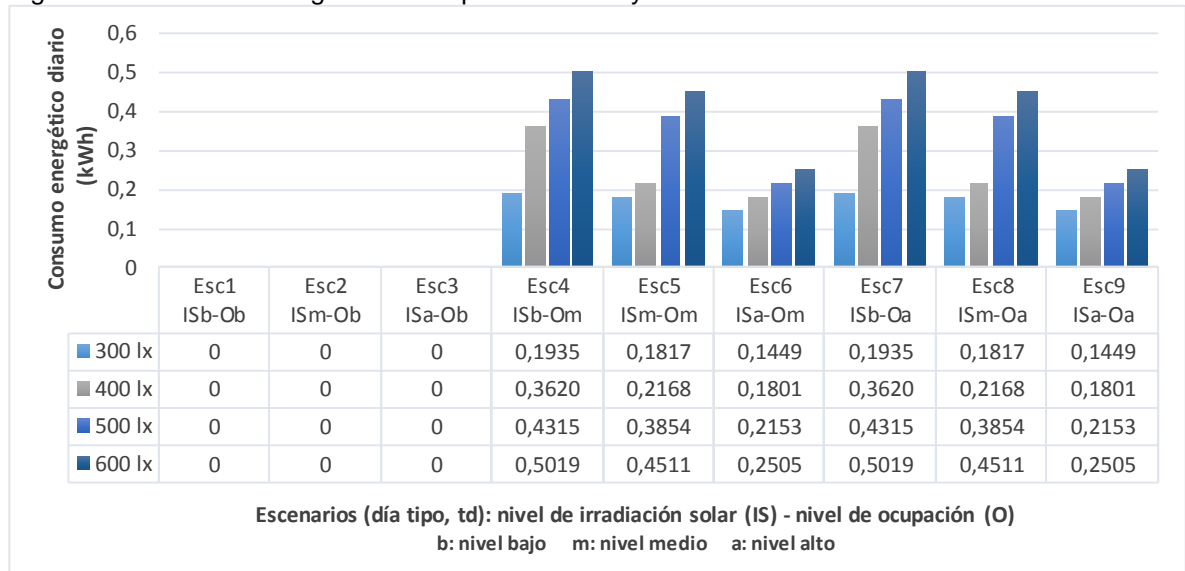
Componente	Grupos de control	Cant.	Características técnicas	Esquema de conexión general
Sensor de ocupación $SO$		1	<b>Referencia:</b> OSC10-M0W, marca LEVITON <b>Consumo de corriente:</b> 40 mA <b>Tensión de alimentación:</b> 24 Vdc <b>Área de cubrimiento:</b> 95 m <sup>2</sup>	
Power pack del sensor de ocupación $P_{SO}$		1	<b>Referencia:</b> OSP20-RD0, marca LEVITON <b>Tensión de alimentación:</b> 120 Vac, 60 Hz <b>Salida:</b> 24 Vdc, 150 mA	
Fotocelda dimerizable $fd$		1	<b>Referencia:</b> LS-301, marca WATT STOPPER <b>Tensión de alimentación:</b> 24 Vdc <b>Consumo de corriente:</b> 30 mA	
Power pack fotocelda dimerizable $P_{fd}$	1	1	<b>Referencia:</b> OSP20-RD0, marca LEVITON <b>Tensión de alimentación:</b> 120 Vac, 60 Hz <b>Salida:</b> 24 Vdc, 150 mA	
Luminaria dimerizable $L_d$		4	Luminaria cuadrada para instalación en cielo raso (60 cm x 60 cm). <b>Potencia de consumo nominal:</b> 80W <b>Tubos:</b> 4 tubos T8 de 17 W <b>Balasto:</b> Electrónico dimerizable 6 W, alimentación 120 Vac, 60 Hz y señal de control 0-10 Vdc	<p><b>Nomenclatura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Alimentación AC (120 V)</li> <li>- - - Alimentación DC (e.g. 12/24 Vdc)</li> <li>- - - Señal de control DC (e.g. 10Vdc)</li> <li>· · · Señal de ocupación</li> <li>PP Power pack</li> <li>SO Sensor de ocupación</li> <li>fdim Fotocelda dimerizable</li> <li>L Luminaria dimerizable</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

La Figura 74 muestra que para los escenarios 4 al 9 hay un incremento del consumo energético diario según se aumenta el nivel mínimo de iluminación ( $e_{min}$ ). Esto se presenta debido a que la condición de iluminancia total sobre los puntos del área útil de trabajo de la sala de reuniones,  $e_T(t) = e_D(t) + e_A(t) \geq e_{min}$  debe ser cumplida, para ello las luminarias operan consumiendo energía de acuerdo al nivel de iluminancia artificial,  $e_A(t)$  que aportan para compensar la falta de iluminancia natural,  $e_D(t)$  que se presenta durante parte de las horas del día donde existe ocupación, según el nivel de ocupación establecido para estos escenarios (ver Tabla 43).

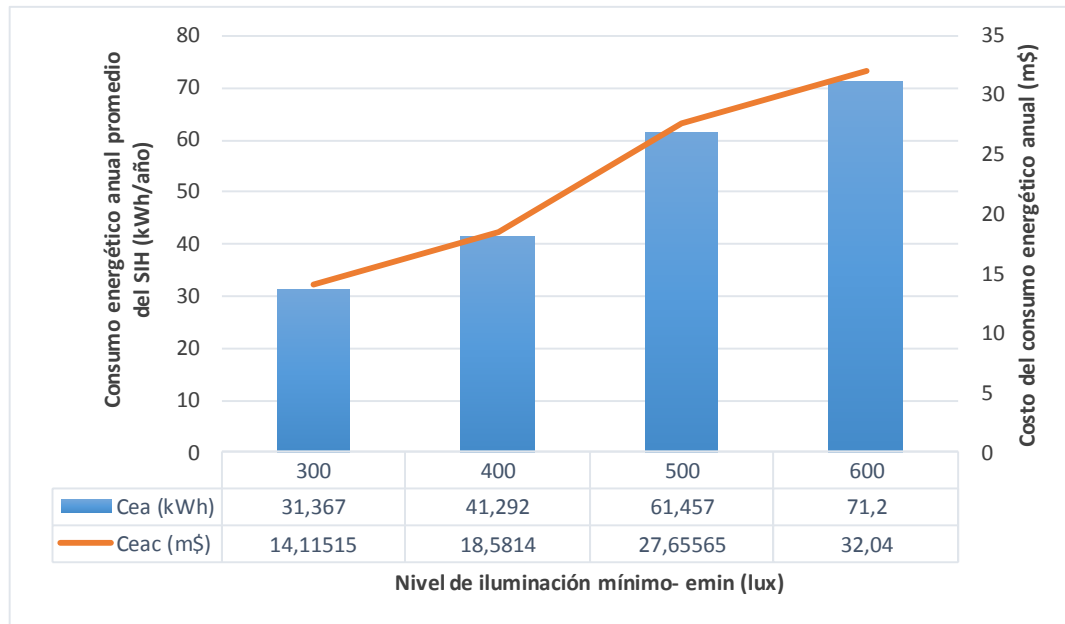
En tal sentido, se observa también, que los escenarios 6 y 9 tienen un menor consumo energético en comparación a los escenarios mencionados, puesto que en los escenarios 6 y 9 existen un nivel de irradiación alto que produce un  $e_D(t)$  mayor al resto de escenarios, reduciendo el aporte de  $e_A(t)$  y, por ende, el consumo energético.

Figura 74. Consumo energético diario por escenario y nivel de iluminancia mínimo.



Fuente: Elaboración propia





Fuente: Elaboración propia

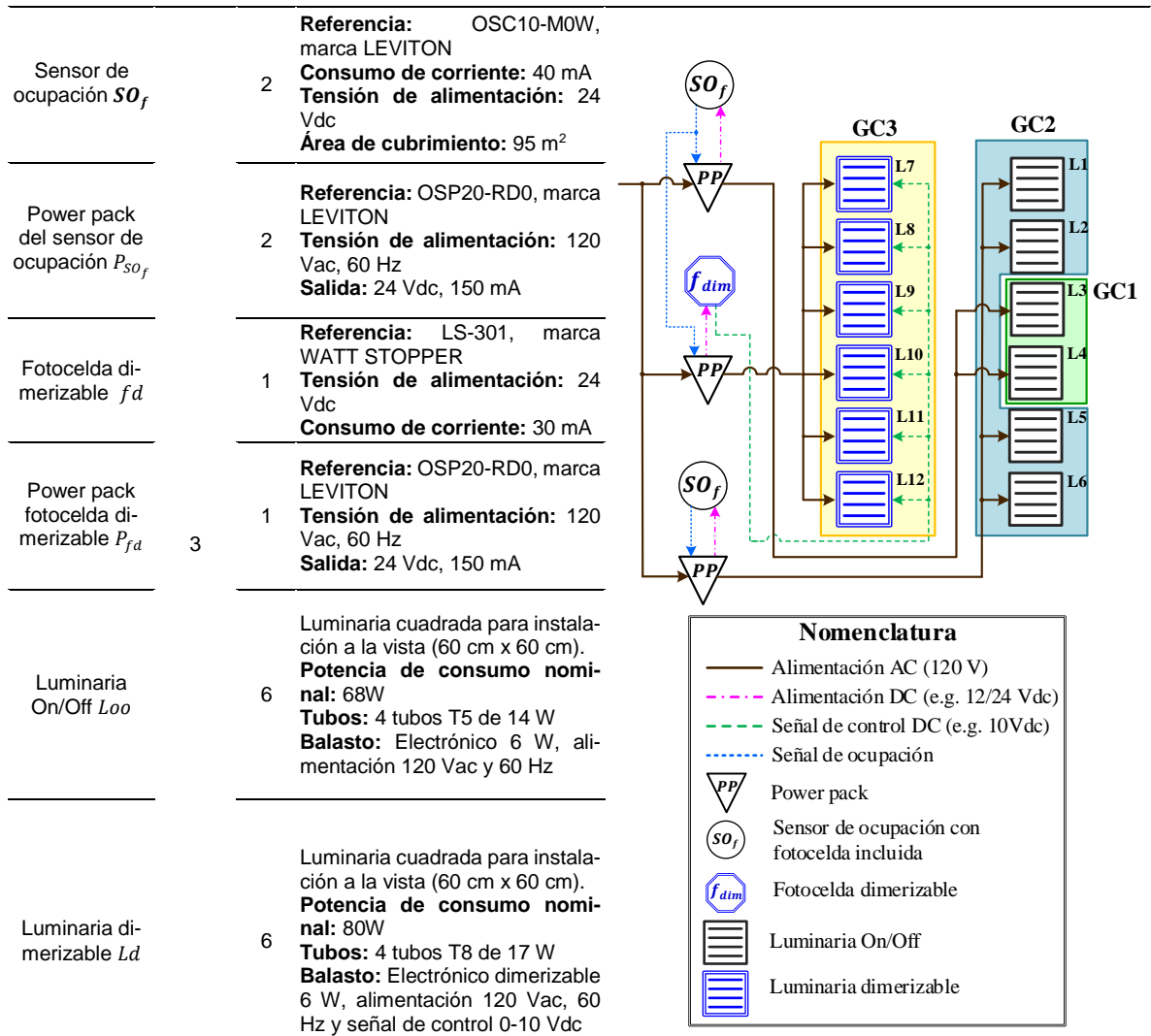
- **Caso – Aula IE305**

La Tabla 44 muestra las especificaciones técnicas de la alternativa de control No. 1079 para el espacio de la sala de reuniones, cuya inversión inicial  $II = \$395\,000$  y corresponde a los costos de adquisición e instalación y adecuación eléctrica y física de componentes nuevos y reusados para tipo techo a la vista (bajo placa).

La Figura 76 muestra el consumo energético diario por escenario (ver Tabla 43) para las alternativas de control seleccionada y actual. Esta figura permite apreciar el beneficio energético, cerca de un ahorro del 50%, que proveería la alternativa definida a partir de la aplicación del procedimiento propuesto en este trabajo de investigación. Esto se debe al uso de luminarias dimerizables y a la existencia de varios grupos de control que están en concordancia con la penetración de luz natural según la zona del aula.

Tabla 44. Especificaciones técnicas de la alternativa de control seleccionada para el aula IE305.

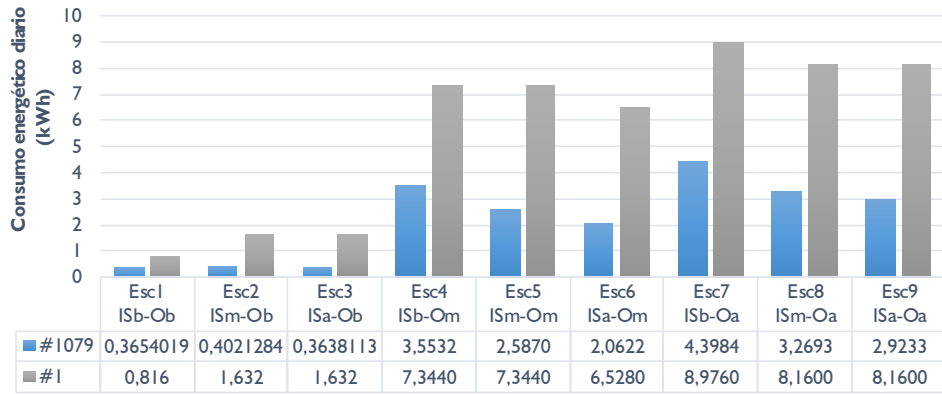
Componente	Grupos de control		Características técnicas	Esquema de conexión general
	Cant.			



Fuente: Elaboración propia

Figura 76. Comparación del consumo energético diario entre las alternativas #1079 (seleccionada) y #1 (actual).

Capítulo 6. Selección de la alternativa de control de menor costo financiero.



Escenarios (día tipo, td): nivel de irradiación solar (IS) - nivel de ocupación (O)  
 b: nivel bajo m: nivel medio a: nivel alto

Fuente: Elaboración propia

# 7. CONCLUSIONES, RESULTADOS, TRABAJO FUTURO Y OBSERVACIONES

---

Este capítulo inicia con la presentación de las conclusiones sobre los hallazgos obtenidos más relevantes (Sección 7.1); posteriormente, se realiza una breve exposición de los resultados de la investigación (Sección 7.2); se luego se comentan los aspectos técnicos identificados que debiesen ser abordados en futuras investigaciones (Sección 7.3) y finalmente, se comparten algunas observaciones relacionadas con la investigación desarrollada (Sección 7.4).

## 7.1. CONCLUSIONES

El modelado matricial propuesto en este trabajo de investigación permitió identificar parámetros y variables que intervienen en la descripción del comportamiento lumínico y de consumo de energía de los casos de estudio, tales como la disponibilidad de luz natural a partir del  $DF$ , el efecto de las estrategias y técnicas de control sobre el uso de la iluminación eléctrica para lograr la integración con la iluminación natural en pro de reducir el consumo de energía eléctrica y, en consecuencia, un potencial ahorro económico. Asimismo, este modelado se considera satisfactorio de acuerdo con los resultados de la validación, lo cual indica que puede ser usado como fundamentación para la formulación de un modelo de tipo general más robusto, aplicable a diferentes espacios y soluciones de SIH, bajo algunas restricciones.

El consumo energético diario de una alternativa de control cualquiera se determina a partir de la potencia consumida horaria; tal potencia se obtiene a partir de su formulación y solución como un problema de optimización no lineal entero mixto (MINLP) empleando GAMS (*solver* BARON). Este planteamiento se basa en el hecho de que los componentes de control de un SIH (sensores de ocupación y fotoceldas) están orientados por diseño a reducir el consumo de energía.

El número de alternativas de control posibles,  $N_{SIH}$ , que puede tener un recinto interior depende del número de luminarias del recinto,  $NK$ , el número de configuraciones o agrupaciones posibles de las luminarias,  $N_{cp}$ , y el número de estrategias de control consideradas,  $N_{ec}$ , y puede ser establecido a partir de un proceso combinatorio establecido por Osma y que a su vez se basa en los números de Stirling de segunda especie  $S(NK, N_{gc})$ , los cuales indican el número de agrupaciones posibles de  $NK$  luminarias para  $N_{gc}$  grupos de control, donde  $N_{gc}$  varía entre 1 y  $NK$ . Por ejemplo, un recinto con  $NK = 4$  (Sala de reuniones) se caracterizará por  $N_{cp} = 15$  y si se considera  $N_{ec} = 4$  entonces se tendrá un  $N_{SIH} = 756$ ; si  $NK = 6$  entonces  $N_{cp} = 203$  que generará un  $N_{SIH} = 42\ 399$ .

El mallado de puntos ( $p(x,y)$ ) de un recinto, en este caso 18 puntos (sala de reuniones) y 28 puntos (aula IE-305), se debe definir de tal forma que se pueda estimar de manera más correcta la iluminancia producida por cada luminaria en la superficie de trabajo del recinto.

Debido a la asimetría del flujo luminoso de una luminaria, la contribución de iluminancia de la luminaria  $k$  en el punto  $p_N$  del mallado,  $(a_{p(k,p)})$  puede ser expresada como la suma ponderada de las curvas de iluminancia de la luminaria en los ejes X y Y sobre el plano de trabajo,  $Elx(r_{pk})$  y  $Ely(r_{pk})$ . Ambas curvas están en función de la distancia horizontal ( $r_{pk}$ ) entre la proyección vertical del punto centro de la luminaria  $k$  sobre el plano de trabajo y el punto  $p_N$  (donde  $N = 1, \dots, n \times m$ ) del mallado (ver Figura 68).

La energía anual debida a la potencia consumida por las luminarias,  $P_{SIH}(t)$ , puede ser estimada a partir del consumo diario ( $\int_{24h} P_{SIH_{td}}(t) \cdot dt$ ) para  $N_{td}$  tipo de días. En total, se consideraron 9 días tipo determinados a partir del comportamiento diario de la irradiación solar y dinámica diaria de ocupación del recinto.

## 7.2. RESULTADOS

Como resultado principal de este trabajo de investigación, se definió un procedimiento para el dimensionamiento de la alternativa de control de la iluminación eléctrica de sistemas de iluminación híbrida de espacios seleccionados con características físicas similares (área máxima: 100 m<sup>2</sup>, altura de la superficie de trabajo: 0,75m, forma geométrica del recinto: rectangular o cuadrada, zona útil de trabajo: todo el área del recinto o una parte de ésta, orientación de las fuentes de luz natural: fachada sur o norte) a los existentes en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, considerando el menor costo financiero total. Este procedimiento consta de ocho (8) pasos secuenciales: (i) Caracterización del espacio (física y lumínica natural), (ii) Caracterización lumínica y de operación de las luminarias del SIH, (iii) Definición de las alternativas de control (cantidad y características técnicas) de potencial aplicación, (iv) Modelado de la iluminación total interior y consumo de energía para cada alternativa de control, (v) Cuantificación de las cantidades mínimas de los componentes requeridos para la implementación de cada alternativa de control, (vi) Definición de la función de costo financiero total por alternativa, (vii) Estimación del costo financiero total de cada alternativa de control y selección de la alternativa de menor costo financiero total y (viii) Construcción del informe de dimensionamiento de la alternativa de control del SIH seleccionada.

Se llevó a cabo la experimentación en dos espacios interiores que permitió caracterizar el comportamiento lumínico (iluminación natural, iluminación eléctrica e híbrida) sobre la superficie de trabajo, a partir de lo cual se obtuvo el modelo experimental y generalizado de iluminancia total interior de los recintos, teniendo en cuenta sus

características físicas (dimensiones, fuentes de luz natural y su orientación y el sistema de iluminación eléctrico existente).

El procedimiento propuesto se aplicó a dos espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica, aula IE305 y Sala de reuniones (piso 5), lo que permitió establecer la alternativa de control de menor costo financiero para cada recinto. En total, se consideraron 756 y 5428 alternativas de control para cada recinto, respectivamente; por lo que se debió utilizar softwares especializado (MATLAB y GAMS).

### **7.3. TRABAJO FUTURO**

Con el fin de buscar dar uso comercial al procedimiento propuesto, se recomienda realizar su adaptación para que sea posible integrarlo con un software de diseño de iluminación (p.e. DIALux), lo que permitiría considerar la selección de la alternativa de control de menor costo financiero desde la etapa de diseño del sistema de iluminación.

Se recomienda la construcción o adquisición de un sistema de medición de iluminación que permita la monitorización simultánea de varios puntos (p.e. 30 puntos), con el fin de incrementar la calidad de la matriz del DF característica de un recinto interior.

Se recomienda realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de la aplicación del procedimiento propuesto según el método de obtención de la matriz de DF, ya sea por experimentación o por simulación (p.e. utilizando DIALux), con el fin de determinar si la diferencia entre los valores de estas matrices puede influir en la selección de la alternativa de control.

Debido a que la incidencia de la irradiación solar en las fachadas de las edificaciones varía significativamente en la zona tropical, se recomienda llevar a cabo una investigación para estudiar el comportamiento de la matriz  $DF$  según la hora y día del año.

Este trabajo de investigación consideró recintos interiores con sistemas de iluminación artificial basados en tubos fluorescentes, por lo que será conveniente aplicar el procedimiento desarrollado para SIH con tecnología LED.

Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para determinar la influencia del valor de paso de tiempo  $\Delta t$ , considerando los siguientes casos: 5 minutos, 10 minutos y 30 minutos. Ello implica contar con muestras de irradiación solar para los mismos intervalos de tiempo.

Este trabajo de investigación consideró la variación de las condiciones de ocupación e irradiación solar a partir de la definición de nueve escenarios con probabilidad de ocurrencias diversas. Por ende, se recomienda explorar tal variación a partir de un análisis estocástico que permita considerar la ocupación e irradiación solar como funciones de probabilidad.

#### **7.4. OBSERVACIONES**

Tal como se expuso, se seleccionó la alternativa de control con mayor VPN, que para este caso significa el VPN menos negativo. Los VPN de todas las alternativas son negativos puesto que no se generan ingresos o flujos de caja positivos. Un VPN negativo indica que el proyecto evaluado no generará un beneficio financiero directo para el cliente. Sin embargo, es importante aclarar que, una alternativa con VPN menos negativo que otra significará un menor costo equivalente para el cliente durante el horizonte de tiempo analizado del SIH, siendo tal reducción un ahorro potencial para el cliente.

En la literatura es común encontrar que las mediciones o simulaciones para cuantificar la iluminancia, natural o artificial, son realizadas con los recintos sin ocupación; sin embargo, tales valores difieren cuando hay ocupantes. Por tal motivo, en este trabajo se consideró un factor de atenuación que busca tener en cuenta tal influencia.

# REFERENCIAS

---

- [1] International Energy Agency -IEA, “Energy Efficiency Training Week Where to start: Energy efficiency potential in buildings,” 2016. [Online]. Available: [www.iea.org/media/training/eetw2016/buildings/A.2\\_Energy\\_efficiency\\_potential.pdf](http://www.iea.org/media/training/eetw2016/buildings/A.2_Energy_efficiency_potential.pdf). [Accessed: 02-Feb-2018].
- [2] “CEC - Secretariat Reports: Green Building.” [Online]. Available: [http://www.cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=341&BL\\_ExpandID=&AA\\_SiteLanguageID=1](http://www.cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=341&BL_ExpandID=&AA_SiteLanguageID=1). [Accessed: 30-Oct-2014].
- [3] M. Mayhoub and D. Carter, “A feasibility study for hybrid lighting systems,” *Build. Environ.*, vol. 53, pp. 83–94, Jul. 2012.
- [4] C. Aghemo, L. Blaso, and a. Pellegrino, “Building automation and control systems: A case study to evaluate the energy and environmental performances of a lighting control system in offices,” *Autom. Constr.*, vol. 43, pp. 10–22, Jul. 2014.
- [5] M. A. U. Haq *et al.*, “A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 268–279, May 2014.
- [6] Y. Chen, J. Liu, J. Pei, X. Cao, Q. Chen, and Y. Jiang, “Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential,” *Energy Build.*, vol. 73, pp. 184–191, Apr. 2014.
- [7] A. Ge, P. Qiu, J. Cai, W. Wang, and J. Wang, “Hybrid daylight/light-emitting diode illumination system for indoor lighting,” *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 9, pp.

- 1869–73, Mar. 2014.
- [8] L. Martirano, “Lighting systems to save energy in educational classrooms,” in *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2011, pp. 1–5.
- [9] Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP*. Colombia, 2010, p. 243.
- [10] M. M. Monroy, *Manual ICARO. Manual de la Iluminación*. España: Departamento de Construcción Arquitectónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2006.
- [11] M. Cucumo, a. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, and V. Marinelli, “Correlations of global and diffuse solar luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 2036–2047, Sep. 2008.
- [12] S. N. Kamaruzzaman, R. Edwards, E. M. A. Zawawi, and A. I. Che-Ani, “Achieving energy and cost savings through simple daylighting control in tropical historic buildings,” *Energy Build.*, vol. 90, pp. 85–93, Mar. 2015.
- [13] P. Boyce and P. Raynham, *The SLL Lighting Handbook*, 1st ed., vol. 44, no. 0. Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), 2009.
- [14] E. Tetri and P. Bhusal, *ANNEX 45 GUIDEBOOK ON ENERGY EFFICIENT ELECTRIC*. Espoo, Finlandia: Aalto University, 2010.
- [15] G. N. Tiwari and A. Tiwari, *Handbook of Solar Energy*. Singapore: Springer Singapore, 2016.
- [16] Autodesk Education Community, “Autodesk Sustainability Workshop.” [Online]. Available: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/daylighting>. [Accessed: 10-Sep-2016].
- [17] a. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, and V. Marinelli, “Simplified

- correlations of global, direct and diffuse luminous efficacy on horizontal and vertical surfaces,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 11, pp. 1991–2001, Jan. 2008.
- [18] G. A. Osma Pinto, “Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la universidad industrial de santander,” Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [19] M. Nair, K. Ramamurthy, and a. Ganesan, “Classification of indoor daylight enhancement systems,” *Light. Res. Technol.*, vol. 46, no. 3, pp. 245–267, Jun. 2013.
- [20] D. H. W. Li, T. N. T. Lam, and S. L. Wong, “Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 9–10, pp. 1133–1145, Jun. 2006.
- [21] I. Acosta, C. Munoz, M. A. Campano, and J. Navarro, “Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions,” *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 194–207, May 2015.
- [22] M. B. Piderit, C. Cauwerts, and M. Diaz, “Definition of the CIE standard skies and application of high dynamic range imaging technique to characterize the spatial distribution of daylight in Chile,” *Rev. la construcción*, vol. 13, no. 2, pp. 22–30, Aug. 2014.
- [23] B. Gherri, *Assessment of daylight performance in buildings: Methods and Design Strategies*. Southampton, Boston: WIT Pres, 2015.
- [24] V. R. M. Lo Verso, A. Pellegrino, and F. Pellerey, “A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems,” *Energy Build.*, vol. 76, pp. 151–163, Jun. 2014.
- [25] M. Asif ul Haq, M. Y. Hassan, H. Abdullah, H. Abdul Rahman, M. P. Abdullah, and F. Hussin, “A method for evaluating energy saving potential in lighting from daylight utilization,” *2014 IEEE Int. Conf. Power Energy*, pp. 177–181,

Dec. 2014.

- [26] S. Görgülü and N. Ekren, "Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast," *Energy Build.*, vol. 61, pp. 172–176, Jun. 2013.
- [27] N. Gentile and M. Dubois, "Daylight harvesting control systems Design recommendations based on a literature review," 2015.
- [28] X. Chen, H. Xiao, J. Fang, and L. Peng, "Optimal design of lighting control system based on matrix theory," in *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2015, pp. 804–809.
- [29] L. Parise, F. Lamonaca, and D. L. Carni, "Interior lighting control system: A practical case using daylight harvesting control strategy," in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 719–724.
- [30] E. Shen, J. Hu, and M. Patel, "Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies," *Build. Environ.*, vol. 78, pp. 155–170, 2014.
- [31] G. Parise, L. Martirano, and L. Parise, "A Procedure to Estimate the Energy Requirements for Lighting," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. c, pp. 1–1, 2015.
- [32] D. Bourgeois, C. Reinhart, and I. Macdonald, "Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control," *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 814–823, 2006.
- [33] G. Parise, L. Martirano, and S. Member, "Combined Electric Light and Daylight Systems Ecodesign," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1062–1070, 2013.
- [34] L. Bellia, F. Fragliasso, and A. Pedace, "Lighting control systems: Factors affecting energy savings' evaluation," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2645–

- 2650, 2015.
- [35] L. E. Mavromatidis, X. Marsault, and H. Lequay, "Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings' energy consumption due to artificial lighting: A numerical approach based on Doehlert and Box–Behnken designs," *Energy*, vol. 65, pp. 488–502, Feb. 2014.
- [36] M. Mayhoub and D. Carter, "A feasibility study for hybrid lighting systems," *Build. Environ.*, vol. 53, pp. 83–94, 2012.
- [37] L. Martirano, "A smart lighting control to save energy," in *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011 IEEE 6th International Conference on*, 2011, vol. 1, no. September, pp. 132–138.
- [38] G. A. Osma, G. Ordóñez, L. Y. Amado, and R. Villamizar, "Control of a Hybrid Illumination System in a Tropical Zone," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 704, pp. 368–372, Dec. 2014.
- [39] E. J. Gago, T. Muneer, M. Knez, and H. Köster, "Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1–13, Jan. 2015.
- [40] L. L. Fernandes, E. S. Lee, D. L. DiBartolomeo, and A. McNeil, "Monitored lighting energy savings from dimmable lighting controls in The New York Times Headquarters Building," *Energy Build.*, vol. 68, pp. 498–514, Jan. 2014.
- [41] G. Parise, L. Martirano, and L. Parise, "Energy performance of buildings: An useful procedure to estimate the impact of the lighting control systems," in *2014 IEEE/IAS 50th Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, 2014, pp. 1–7.
- [42] D. H. W. Li, A. C. K. Cheung, S. K. H. Chow, and J. C. Lam, "Switching frequency and energy analysis for photoelectric controls," *Build. Environ.*, vol. 85, pp. 205–210, Feb. 2015.
- [43] M. M. Vallina, *Instalaciones Domóticas*. Madrid, España: Paraninfo, 2011.

- [44] S. Gallardo Vásquez, *Configuración de instalaciones domóticas y automáticas*. Madrid, España: Paraninfo, 2013.
- [45] G. Parise, L. Martirano, and G. Cecchini, “Design and Energetic Analysis of an Advanced Control Upgrading Existing Lighting Systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1338–1347, Mar. 2014.
- [46] G. Parise, L. Martirano, and S. Member, “Daylight Impact on Energy Performance of Internal Lighting,” *Ind. Appl. IEEE Trans.*, vol. 49, no. 1, pp. 242–249, 2013.
- [47] V. Logar, Ž. Kristl, and I. Škrjanc, “Using a fuzzy black-box model to estimate the indoor illuminance in buildings,” *Energy Build.*, vol. 70, pp. 343–351, Feb. 2014.
- [48] B. Roisin, M. Bodart, a. Deneyer, and P. D’Herdt, “Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 4, pp. 514–523, Jan. 2008.
- [49] M. Fischer, K. Wu, and P. Agathoklis, “Intelligent Illumination Model-Based Lighting Control,” in *2012 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2012, pp. 245–249.
- [50] Z. Wang and Y. K. Tan, “Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm,” *Energy Build.*, vol. 62, pp. 514–521, 2013.
- [51] Reinhart and Christoph, “Daylight Availability Metrics,” 2012. [Online]. Available: [https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4\\_430S12\\_lec12.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4_430S12_lec12.pdf). [Accessed: 24-Sep-2016].
- [52] C. Cauwerts, “Calculation and Design Methods | [www.educate-sustainability.eu](http://www.educate-sustainability.eu).” [Online]. Available: <https://www.educate-sustainability.eu/portal/print/1871>. [Accessed: 17-Apr-2016].
- [53] V. Congradac, B. Milosavljevic, J. Velickovic, and B. Prebiracevic, “Control of

- the lighting system using a genetic algorithm,” *Therm. Sci.*, vol. 16, no. suppl. 1, pp. 237–250, 2012.
- [54] B. Roisin, M. Bodart, A. Deneyer, and P.D’Herdt, “Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption,” *Energy Build.*, vol. 40, pp. 514–523, 2008.
- [55] S. G. Colaco, A. M. Colaco, C. P. Kurian, and V. I. George, “An Adaptive predictive framework to online prediction of interior daylight illuminance,” in *2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)*, 2014, pp. 174–180.
- [56] M. Sudan, G. N. Tiwari, and I. M. Al-Helal, “A daylight factor model under clear sky conditions for building\_ An experimental validation,” *Sol. Energy*, vol. 115, pp. 379–389, 2015.
- [57] W. T. Grondzik, A. G. Kwok, B. Stein, and J. S. Reynolds, *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings*, 11th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [58] C. Reinhart, “Lecture 9: Daylight Simulations.” Massachusetts Institute of Technology, pp. 1–23, 2011.
- [59] L. E. Y, D. M. Rangel, and P. M. E. Fernández, “ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARÁMETROS URBANOS SOBRE LAS CONDICIONES DE ILUMINACIÓN NATURAL EN EL INTERIOR DE LA EDIFICACIÓN. (APLICACIÓN A UNA CIUDAD CON CLIMA CÁLIDO Y LATITUD ENTRE 30 Y 40°),” in *Greencities & Sostenibilidad. Inteligencia aplicada a la Sostenibilidad Urbana*, no. Edición, Malaga, España, 2014, pp. 366–380.
- [60] E. Ghisi and J. a. Tinker, “An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 1, pp. 51–61, Jan. 2005.
- [61] C. Reinhart, “6332 Day-Lighting Buildings - Lighting Simulation I - Ecotect.” [Online]. Available: <http://sites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic466781.files/L05.6332.SimulationI.E>

- cotect.pdf. [Accessed: 28-Dec-2016].
- [62] K. Alshaibani, "Average daylight factor for the ISO/CIE Standard General Sky," *Light. Res. Technol.*, vol. 48, no. 6, pp. 742–754, Oct. 2016.
- [63] L. Brotas and M. Wilson, "The average total daylight factor," no. June, 2007.
- [64] D. H. . Li and J. C. Lam, "Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications," *Renew. Energy*, vol. 20, no. 4, pp. 389–404, Aug. 2000.
- [65] Comité Español de iluminación and Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Guía Técnica Aprovechamiento de la luz natural de edificios*. España, 2005.
- [66] T. Kazanasmaz, M. Günaydin, and S. Binol, "Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 8, pp. 1751–1757, Aug. 2009.
- [67] M. Mohsenin and J. Hu, "Assessing daylight performance in atrium buildings by using Climate Based Daylight Modeling," *Sol. Energy*, vol. 119, pp. 553–560, Sep. 2015.
- [68] D. Lindelöf, "A fast daylight model suitable for embedded controllers," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 57–68, Jan. 2009.
- [69] D. A. Galvis Neira and C. A. Expósito Cáceres, "Caracterización de la iluminación en los espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [70] A. M. Agogino, "Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction," in *2008 IEEE Wireless Hive Networks Conference*, 2008, pp. 1–7.
- [71] M. Miki, K. Yoshida, Y. Hirano, and H. Ikegami, "Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system," *2013 IEEE 8th Int. Symp. Appl. Comput. Intell.*

- Informatics*, pp. 137–142, May 2013.
- [72] M. Miki, K. Yoshida, Y. Hirano, and H. Ikegami, “Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system,” *2013 IEEE 8th Int. Symp. Appl. Comput. Intell. Informatics*, pp. 137–142, May 2013.
- [73] L. G. Caldas and L. K. Norford, “A design optimization tool based on a genetic algorithm,” *Autom. Constr.*, vol. 11, no. 2, pp. 173–184, Feb. 2002.
- [74] B. Raphael, “Active Control of Daylighting Features in Buildings,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 26, no. 5, pp. 393–405, Jul. 2011.
- [75] R. Yang and L. Wang, “Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, Feb. 2012.
- [76] V. R. M. Lo Verso, A. Pellegrino, and F. Pellerrey, “A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems,” *Energy Build.*, vol. 76, pp. 151–163, Jun. 2014.
- [77] S. Ozenc, M. Uzunoglu, and O. Guler, “Experimental evaluation of the impacts of considering inherent response characteristics for lighting technologies in building energy modeling,” *Energy Build.*, vol. 77, pp. 432–439, Jul. 2014.
- [78] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, and F. Topalis, “Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 1, pp. 36–50, Jan. 2008.
- [79] N. van de Meughevel, A. Pandharipande, D. Caicedo, and P. P. J. van den Hof, “Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation,” *Energy Build.*, vol. 75, pp. 321–329, Jun. 2014.
- [80] P. Chaiwiwatworakul, S. Chirarattananon, and P. Rakkwamsuk, “Application of automated blind for daylighting in tropical region,” *Energy Convers. Manag.*,

- vol. 50, no. 12, pp. 2927–2943, Dec. 2009.
- [81] “Haciendo realidad las ideas en el ambiente laboral.” [Online]. Available: [http://www.lighting.philips.com.co/pwc\\_li/co\\_es/connect/assets/catalogooficina.pdf](http://www.lighting.philips.com.co/pwc_li/co_es/connect/assets/catalogooficina.pdf).
- [82] Z. Wang and Y. K. Tan, “Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm,” *Energy Build.*, vol. 62, pp. 514–521, Jul. 2013.
- [83] P. Kumar and M. Vishwas, “Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design,” *Energy Build.*, vol. 66, pp. 329–337, 2013.
- [84] Y. Hua, A. Oswald, and X. Yang, “Effectiveness of daylighting design and occupant visual satisfaction in a LEED Gold laboratory building,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 1, pp. 54–64, Jan. 2011.
- [85] T. Li, F. Yang, and C. Yuan, “A novel parabolic trough solar lighting and thermal system for building energy efficiency,” in *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2013, pp. 657–662.
- [86] G. A. Osma Pinto, “Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido,” Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.
- [87] Ministerio de Minas y Energía, “Anexo general. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. RETILAP. Proyecto de modificación capítulo 4,” 2013. [Online]. Available: [http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id\\_categoria=157&id\\_subcategoria=963](http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id_categoria=157&id_subcategoria=963).
- [88] J. M. Stellman, *Encyclopedia of occupational health and safety*, 4th ed. International Labour Organization, 1998.
- [89] L. Amado, G. Osma, and R. Villamizar, “Modeling of lighting behaviour of a

- hybrid lighting system in inner spaces of Building of Electrical Engineering,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 138, p. 12011, Jul. 2016.
- [90] E. W. Weisstein, “Stirling number of the second kind,” *MathWorld--A Wolfram Web Resource*. [Online]. Available: [mathworld.wolfram.com/StirlingNumberoftheSecondKind.html](http://mathworld.wolfram.com/StirlingNumberoftheSecondKind.html). [Accessed: 27-Jul-2017].
- [91] J. Riordan, *An Introduction to Combinatorial Analysis*. Princeton University Press, 2014.
- [92] P. Oteiza, A. Soler, and G. Yáñez, “Eficacia luminosa de la radiación solar global para superficie horizontal en Madrid. España,” *Inf. la Construcción*, vol. 44, no. 419, pp. 53–57, Jun. 1992.
- [93] LEVITON, “Sensors de ocupación de montaje en el techo.” [Online]. Available: <http://spanish.leviton.com/en/products/osc10-m0w>.
- [94] M. Stanley Rea, “Lighting Controls,” in *IESNA Lighting Handbook*, 9th ed., New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000, pp. 881–901.
- [95] S. Electric, “Andover Continuum.” [Online]. Available: <http://www.schneider-electric.com.co/es/product-range/6823-andover-continuum/>. [Accessed: 11-Apr-2017].

# BIBLIOGRAFÍA

---

- Acosta, I., Munoz, C., Campano, M. A., & Navarro, J. (2015). Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions. *Renewable Energy*, 77, 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.017>
- Aghemo, C., Blaso, L., & Pellegrino, a. (2014). Building automation and control systems: A case study to evaluate the energy and environmental performances of a lighting control system in offices. *Automation in Construction*, 43, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.015>
- Agogino, A. M. (2008). Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction. In *2008 IEEE Wireless Hive Networks Conference* (pp. 1–7). Ieee. <https://doi.org/10.1109/WHNC.2008.4629493>
- Alshaibani, K. (2016). Average daylight factor for the ISO/CIE Standard General Sky. *Lighting Research and Technology*, 48(6), 742–754. <https://doi.org/10.1177/1477153515572939>
- Amado, L., Osma, G., & Villamizar, R. (2016). Modeling of lighting behaviour of a hybrid lighting system in inner spaces of Building of Electrical Engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 138, 12011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/138/1/012011>
- Asif ul Haq, M., Hassan, M. Y., Abdullah, H., Abdul Rahman, H., Abdullah, M. P., & Hussin, F. (2014). A method for evaluating energy saving potential in lighting from daylight utilization. *2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 177–181. <https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062436>

Autodesk Education Community. (n.d.). Autodesk Sustainability Workshop. Retrieved September 10, 2016, from <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/daylighting>

Bellia, L., Fragliasso, F., & Pedace, A. (2015). Lighting control systems: Factors affecting energy savings' evaluation. *Energy Procedia*, 78, 2645–2650. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.336>

Bourgeois, D., Reinhart, C., & Macdonald, I. (2006). Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and Buildings*, 38(7), 814–823. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.002>

Boyce, P., & Raynham, P. (2009). *The SLL Lighting Handbook*. (S. Boreham & P. Hadley, Eds.) (1st ed., Vol. 44). Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). Retrieved from <http://www.cibse.org/knowledge/cibse-ig/sll-lighting-handbook>

Brotas, L., & Wilson, M. (2007). The average total daylight factor, (June).

Caldas, L. G., & Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11(2), 173–184. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00096-0)

Cauwerts, C. (n.d.). Calculation and Design Methods | [www.educate-sustainability.eu](http://www.educate-sustainability.eu). Retrieved April 17, 2016, from <https://www.educate-sustainability.eu/portal/print/1871>

CEC - Secretariat Reports: Green Building. (n.d.). Retrieved October 30, 2014, from [http://www.cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=341&BL\\_ExpandID=&A\\_A\\_SiteLanguageID=1](http://www.cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=341&BL_ExpandID=&A_A_SiteLanguageID=1).

Chaiwiwatworakul, P., Chirarattananon, S., & Rakkwamsuk, P. (2009). Application of automated blind for daylighting in tropical region. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 2927–2943. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.07.008>

- Chen, X., Xiao, H., Fang, J., & Peng, L. (2015). Optimal design of lighting control system based on matrix theory. In *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)* (pp. 804–809). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2015.7162029>
- Chen, Y., Liu, J., Pei, J., Cao, X., Chen, Q., & Jiang, Y. (2014). Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential. *Energy and Buildings*, 73, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.030>
- Colaco, S. G., Colaco, A. M., Kurian, C. P., & George, V. I. (2014). An Adaptive predictive framework to online prediction of interior daylight illuminance. In *2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)* (pp. 174–180). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAECT.2014.6757083>
- Comité Español de iluminación, & Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2005). *Guía Técnica Aprovechamiento de la luz natural de edificios Guía Técnica Aprovechamiento de la luz natural de edificios*. España.
- Congradac, V., Milosavljevic, B., Velickovic, J., & Prebiracevic, B. (2012). Control of the lighting system using a genetic algorithm. *Thermal Science*, 16(suppl. 1), 237–250. <https://doi.org/10.2298/TSCI120203075C>
- Cucumo, M., De Rosa, a., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2008). Correlations of global and diffuse solar luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities. *Renewable Energy*, 33(9), 2036–2047. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.11.015>
- De Rosa, a., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2008). Simplified correlations of global, direct and diffuse luminous efficacy on horizontal and vertical surfaces. *Energy and Buildings*, 40(11), 1991–2001. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.018>
- Doulos, L., Tsangrassoulis, A., & Topalis, F. (2008). Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts. *Energy and*

*Buildings*, 40(1), 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.019>

Electric, S. (n.d.). Andover Continuum. Retrieved April 11, 2017, from <http://www.schneider-electric.com.co/es/product-range/6823-andover-continuum/>

Fernandes, L. L., Lee, E. S., DiBartolomeo, D. L., & McNeil, A. (2014). Monitored lighting energy savings from dimmable lighting controls in The New York Times Headquarters Building. *Energy and Buildings*, 68, 498–514. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.009>

Fischer, M., Wu, K., & Agathoklis, P. (2012). Intelligent Illumination Model-Based Lighting Control. In *2012 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops* (pp. 245–249). Ieee. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2012.75>

Gago, E. J., Muneer, T., Knez, M., & Köster, H. (2015). Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.002>

Gallardo Vásquez, S. (2013). *Configuración de instalaciones domóticas y automáticas*. Madrid, España: Paraninfo.

Galvis Neira, D. A., & Expósito Cáceres, C. A. (2015). *Caracterización de la iluminación en los espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Ge, A., Qiu, P., Cai, J., Wang, W., & Wang, J. (2014). Hybrid daylight/light-emitting diode illumination system for indoor lighting. *Applied Optics*, 53(9), 1869–73. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24663465>

Gentile, N., & Dubois, M. (2015). Daylight harvesting control systems Design recommendations based on a literature review.

Gherri, B. (2015). *Assessment of daylight performance in buildings: Methods and Design Strategies*. Southampton, Boston: WIT Pres. Retrieved from <http://www.witpress.com/books/978-1-78466-040-6>

Ghisi, E., & Tinker, J. a. (2005). An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. *Building and Environment*, 40(1), 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.004>

Görgülü, S., & Ekren, N. (2013). Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast. *Energy and Buildings*, 61, 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.037>

Grondzik, W. T., Kwok, A. G., Stein, B., & Reynolds, J. S. (2010). *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings* (11th ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Haciendo realidad las ideas en el ambiente laboral. (n.d.). Retrieved from [http://www.lighting.philips.com.co/pwc\\_li/co\\_es/connect/assets/catalogooficina.pdf](http://www.lighting.philips.com.co/pwc_li/co_es/connect/assets/catalogooficina.pdf)

Haq, M. A. U., Hassan, M. Y., Abdullah, H., Rahman, H. A., Abdullah, M. P., Hussin, F., & Said, D. M. (2014). A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.090>

Hua, Y., Oswald, A., & Yang, X. (2011). Effectiveness of daylighting design and occupant visual satisfaction in a LEED Gold laboratory building. *Building and Environment*, 46(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.016>

International Energy Agency -IEA. (2016). Energy Efficiency Training Week Where to start : Energy efficiency potential in buildings. Retrieved February 2, 2018, from [www.iea.org/media/training/eetw2016/buildings/A.2\\_Energy\\_efficiency\\_potential.pdf](http://www.iea.org/media/training/eetw2016/buildings/A.2_Energy_efficiency_potential.pdf)

Kamaruzzaman, S. N., Edwards, R., Zawawi, E. M. A., & Che-Ani, A. I. (2015). Achieving energy and cost savings through simple daylighting control in tropical historic buildings. *Energy and Buildings*, 90, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.045>

Kazanasmaz, T., Günaydin, M., & Binol, S. (2009). Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings. *Building and Environment*, 44(8), 1751–1757. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.012>

Kumar, P., & Vishwas, M. (2013). Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design. *Energy and Buildings*, 66, 329–337.

LEVITON. (n.d.). Sensors de ocupación de montaje en el techo. Retrieved from <http://spanish.leviton.com/en/products/osc10-m0w>

Li, D. H. ., & Lam, J. C. (2000). Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications. *Renewable Energy*, 20(4), 389–404. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00126-3)

Li, D. H. W., Cheung, A. C. K., Chow, S. K. H., & Lam, J. C. (2015). Switching frequency and energy analysis for photoelectric controls. *Building and Environment*, 85, 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.022>

Li, D. H. W., Lam, T. N. T., & Wong, S. L. (2006). Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls. *Energy Conversion and Management*, 47(9–10), 1133–1145. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.016>

Li, T., Yang, F., & Yuan, C. (2013). A novel parabolic trough solar lighting and thermal system for building energy efficiency. In *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 657–662). Ieee. <https://doi.org/10.1109/CoASE.2013.6654060>

Lindelöf, D. (2009). A fast daylight model suitable for embedded controllers. *Solar Energy*, 83(1), 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.008>

Lo Verso, V. R. M., Pellegrino, A., & Pellerrey, F. (2014a). A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems. *Energy and Buildings*, 76, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.063>

Lo Verso, V. R. M., Pellegrino, A., & Pellerrey, F. (2014b). A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems. *Energy and Buildings*, 76, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.063>

Logar, V., Kristl, Ž., & Škrjanc, I. (2014). Using a fuzzy black-box model to estimate the indoor illuminance in buildings. *Energy and Buildings*, 70, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.082>

Martirano, L. (2011a). A smart lighting control to save energy. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011 IEEE 6th International Conference on* (Vol. 1, pp. 132–138). Prague: IEEE. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6072726](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6072726)

Martirano, L. (2011b). Lighting systems to save energy in educational classrooms. In *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2011.5874691>

Mavromatidis, L. E., Marsault, X., & Lequay, H. (2014). Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings' energy consumption due to artificial lighting: A numerical approach based on Doehlert and Box–Behnken designs. *Energy*, 65, 488–502. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.028>

Mayhoub, M., & Carter, D. (2012a). A feasibility study for hybrid lighting systems. *Building and Environment*, 53, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.011>

Mayhoub, M., & Carter, D. (2012b). A feasibility study for hybrid lighting systems. *Building and Environment*, 53, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.011>

Miki, M., Yoshida, K., Hirano, Y., & Ikegami, H. (2013a). Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system. *2013 IEEE 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 137–142. <https://doi.org/10.1109/SACI.2013.6608954>

Miki, M., Yoshida, K., Hirano, Y., & Ikegami, H. (2013b). Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system. *2013 IEEE 8th International Symposium on Applied Computational*

*Intelligence and Informatics (SACI)*, 137–142.  
<https://doi.org/10.1109/SACI.2013.6608954>

Ministerio de Minas y Energía. (2013). Anexo general. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. RETILAP. Proyecto de modificación capítulo 4. Retrieved from [http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id\\_categoria=157&id\\_subcategoria=963](http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id_categoria=157&id_subcategoria=963)

Ministerio de Minas y Energía. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP, Pub. L. No. Resolución No. 180540 de marzo 30 de 2010, 243 (2010). Colombia.

Mohsenin, M., & Hu, J. (2015). Assessing daylight performance in atrium buildings by using Climate Based Daylight Modeling. *Solar Energy*, 119, 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.011>

Monroy, M. M. (2006). *Manual ICARO. Manual de la Iluminación*. España: Departamento de Construcción Arquitectónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Nair, M., Ramamurthy, K., & Ganesan, a. (2013). Classification of indoor daylight enhancement systems. *Lighting Research and Technology*, 46(3), 245–267. <https://doi.org/10.1177/1477153513483299>

Osma Pinto, G. A. (2011). *Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la universidad industrial de santander*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Osma Pinto, G. A. (2016). *Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Osma, G. A., Ordóñez, G., Amado, L. Y., & Villamizar, R. (2014). Control of a Hybrid Illumination System in a Tropical Zone. *Applied Mechanics and Materials*, 704, 368–372. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.704.368>

Oteiza, P., Soler, A., & Yáñez, G. (1992). Eficacia luminosa de la radiación solar global para superficie horizontal en Madrid. España. *Informes de La Construcción*, 44(419), 53–57. <https://doi.org/10.3989/ic.1992.v44.i419.1333>

Ozenc, S., Uzunoglu, M., & Guler, O. (2014). Experimental evaluation of the impacts of considering inherent response characteristics for lighting technologies in building energy modeling. *Energy and Buildings*, 77, 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.062>

Parise, G., Martirano, L., & Cecchini, G. (2014). Design and Energetic Analysis of an Advanced Control Upgrading Existing Lighting Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), 1338–1347. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2272752>

Parise, G., Martirano, L., & Member, S. (2013a). Combined Electric Light and Daylight Systems Ecodesign. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1062–1070. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2253534>

Parise, G., Martirano, L., & Member, S. (2013b). Daylight Impact on Energy Performance of Internal Lighting. *Industry Applications, IEEE Transactions*, 49(1), 242–249.

Parise, G., Martirano, L., & Parise, L. (2014). Energy performance of buildings: An useful procedure to estimate the impact of the lighting control systems. In *2014 IEEE/IAS 50th Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference* (pp. 1–7). Fort Worth, TX: Ieee. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2014.6839154>

Parise, G., Martirano, L., & Parise, L. (2015). A Procedure to Estimate the Energy Requirements for Lighting. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 9994(c), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2463761>

Parise, L., Lamonaca, F., & Carni, D. L. (2015). Interior lighting control system: A practical case using daylight harvesting control strategy. In *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 719–724). Ieee. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165253>

Piderit, M. B., Cauwerts, C., & Diaz, M. (2014). Definition of the CIE standard skies

and application of high dynamic range imaging technique to characterize the spatial distribution of daylight in Chile. *Revista de La Construcción*, 13(2), 22–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2014000200003>

Raphael, B. (2011). Active Control of Daylighting Features in Buildings. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(5), 393–405. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00692.x>

Reinhart, & Christoph. (2012). Daylight Availability Metrics. Retrieved September 24, 2016, from [https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4\\_430S12\\_lec12.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4_430S12_lec12.pdf)

Reinhart, C. (2011). Lecture 9: Daylight Simulations. Massachusetts Institute of Technology. Retrieved from [https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4\\_430S12\\_lec09.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4_430S12_lec09.pdf)

Reinhart, C. (n.d.). 6332 Day-Lighting Buildings - Lighting Simulation I - Ecotect. Retrieved December 28, 2016, from <http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic466781.files/L05.6332.SimulationI.Ecotect.pdf>

Riordan, J. (2014). *An Introduction to Combinatorial Analysis*. Princeton University Press.

Roisin, B., Bodart, M., Deneyer, a., & D'Herdt, P. (2008). Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. *Energy and Buildings*, 40(4), 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.006>

Roisin, B., Bodart, M., Deneyer, A., & P.D'Herdt. (2008). Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. *Energy and Buildings*, 40, 514–523. <https://doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2007.04.006>

Shen, E., Hu, J., & Patel, M. (2014). Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies. *Building and Environment*, 78, 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.028>

- Stanley Rea, M. (2000). Lighting Controls. In *IESNA Lighting Handbook* (9th ed., pp. 881–901). New York: Illuminating Engineering Society of North America.
- Stellman, J. M. (1998). *Encyclopedia of occupational health and safety* (4th ed.). International Labour Organization.
- Sudan, M., Tiwari, G. N., & Al-Helal, I. M. (2015). A daylight factor model under clear sky conditions for building\_ An experimental validation. *Solar Energy*, *115*, 379–389. <https://doi.org/doi:10.1016/j.solener.2015.03.002>
- Tetri, E., & Bhusal, P. (2010). *ANNEX 45 GUIDEBOOK ON ENERGY EFFICIENT ELECTRIC*. Espoo, Finlandia: Aalto University. Retrieved from <http://www.lightinglab.fi/IEAAnnex45/>
- Tiwari, G. N., & Tiwari, A. (2016). *Handbook of Solar Energy*. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0807-8>
- Vallina, M. M. (2011). *Instalaciones Domóticas*. Madrid, España: Paraninfo.
- van de Meughevel, N., Pandharipande, A., Caicedo, D., & van den Hof, P. P. J. (2014). Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation. *Energy and Buildings*, *75*, 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.016>
- Wang, Z., & Tan, Y. K. (2013a). Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm. *Energy and Buildings*, *62*, 514–521.
- Wang, Z., & Tan, Y. K. (2013b). Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm. *Energy and Buildings*, *62*, 514–521. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.029>
- Weisstein, E. W. (n.d.). Stirling number of the second kind. Retrieved July 27, 2017, from [mathworld.wolfram.com/StirlingNumberoftheSecondKind.html](http://mathworld.wolfram.com/StirlingNumberoftheSecondKind.html)
- Y, L. E., Rangel, D. M., & Fernández, P. M. E. (2014). ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARÁMETROS URBANOS SOBRE LAS CONDICIONES DE ILUMINACIÓN NATURAL EN EL INTERIOR DE LA EDIFICACIÓN. (APLICACIÓN

A UNA CIUDAD CON CLIMA CÁLIDO Y LATITUD ENTRE 30 Y 40°). In *Greencities & Sostenibilidad. Inteligencia aplicada a la Sostenibilidad Urbana* (pp. 366–380). Malaga, España. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=661099>

Yang, R., & Wang, L. (2012). Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control. *Sustainable Cities and Society*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.09.001>

# ANEXOS

---

ANEXO A. Caracterización de la irradiación solar incidente para la estimación de la iluminancia natural exterior sobre ventanas

ANEXO B. Determinación de los perfiles de ocupación e irradiación solar

ANEXO C. Formulación de problema de optimización para el SIH existente en la Sala de Reuniones

ANEXO D. Formulación del problema de optimización para una alternativa potencial de control del SIH en la Sala de Reuniones

ANEXO E. Descripción del uso de MATLAB y GAMS

ANEXO F. Aplicación de la cuantificación de componentes del SIH

# Anexo A. Caracterización de la irradiación solar incidente para la estimación de la iluminancia natural exterior sobre ventanas

---

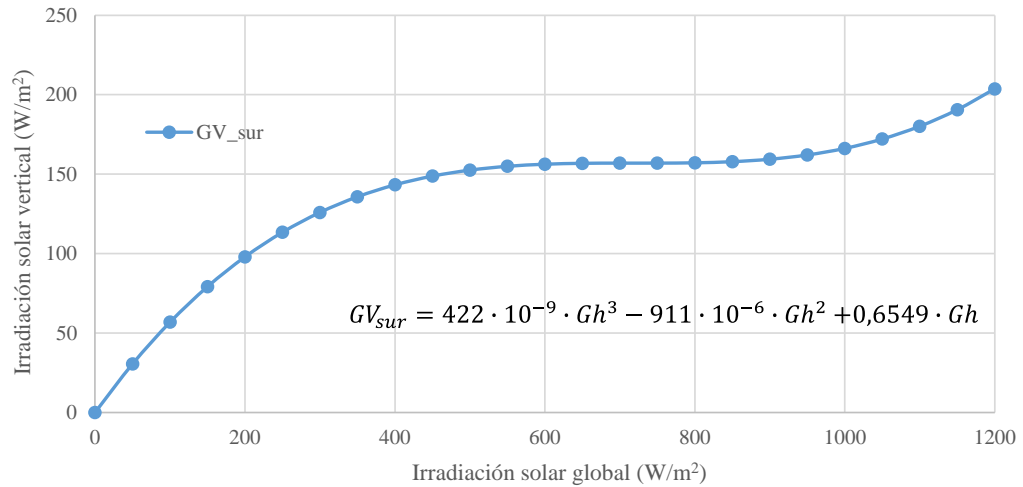
Este anexo describe la obtención de dos tipos de factores que caracterizan la irradiación solar incidente sobre una superficie, considerados para la estimación de la iluminancia natural exterior incidente sobre una superficie  $W$  (ventanas),  $E_{E_w}(t)$ . El primer tipo es un factor de ponderación de la irradiación solar vertical,  $f_{pIS_w}$  que permite calcular la irradiación solar incidente sobre las ventanas,  $G_w(t)$  con base en la irradiación solar vertical,  $GV_{Sur}(t)$ . El segundo tipo es el factor de conversión entre la irradiancia solar ( $G_{w_{med}}(t)$ ) e iluminancia exterior ( $E_{E_{w_{med}}}(t)$ ) incidentes, medidas sobre una superficie  $W$ ,  $f_c$ .

## A.1 IRRADIACIÓN SOLAR VERTICAL, $GV_{Sur}(t)$

Con el fin de estimar la iluminancia incidente exterior (vertical) sobre las aberturas verticales, se estableció la relación entre la irradiación solar global (horizontal) con las irradiaciones solares incidentes sobre la fachada sur. Para ello, se monitorizaron estas variables sobre la terraza superior y fachada sur (muro más expuesto a nivel del piso 5) del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Se utilizaron dos piranómetros Kipp&Zonen calibrados (SMP11 - *secondary standard* y SMP3 – *second class*) y un datalogger PACE XR5-SE-20mV.

La Figura A.1 muestra la curva y la expresión matemática para estimar la irradiación solar vertical a partir de la irradiación global típicamente monitorizada.

Figura A.1. Relación entre las irradiancias solares global y vertical sur.



Dado que la irradiación solar global,  $G_h$  varía con el tiempo, la irradiación solar vertical  $GV_{sur}$  se puede definir a través de la expresión (A.1).

$$GV_{sur}(t) = 422 \cdot 10^{-9} \cdot G_h^3(t) - 911 \cdot 10^{-6} \cdot G_h^2(t) + 0,6549 \cdot G_h(t) \quad (\text{A.1})$$

## A.2 RELACIÓN ENTRE ILUMINANCIA E IRRADIANCIA

Con base en la revisión de la literatura, se encuentra que el factor de conversión entre irradiancia e iluminancia oscila entre 100 y 144 lux/W/m<sup>2</sup> [10], [12], [17], [92]. Este valor permite convertir la irradiación vertical incidente en la iluminancia exterior incidente sobre una ventana.

Este valor fue confirmado a partir de mediciones realizadas en la terraza superior y fachada sur del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Se utilizaron un piranómetro Kipp&Zonen SMP11 (*secondary standard*), un datalogger PACE XR5-SE-20mV y 4 luxómetros calibrados (1 *Extech* 407026 y 3 *Amprobe* LM-120). En total, se tomaron

cerca de 100 muestras<sup>67</sup> de irradiancia solar entre 100 W/m<sup>2</sup> y 300 W/m<sup>2</sup> (rango típico de la irradiación solar difusa que incide en una ventana), obteniéndose un valor promedio de 126,1 lux/W/m<sup>2</sup> con una desviación estándar de 2,9 lux/W/m<sup>2</sup>. Por lo cual, se toma este valor como el factor de conversión  $f_c$ .

### A.3 OBTENCIÓN DEL FACTOR DE PONDERACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR INCIDENTE EN LAS VENTANAS

Debido a que la irradiación solar no incide de la misma manera en cada punto de la fachada sur, es necesario establecer un factor de ponderación para estimar su incidencia en un punto específico a partir de su medición o estimación en un punto conocido, como por ejemplo la pared sur del piso 5 del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Con base en los datos obtenidos de la monitorización de la irradiación solar ( $GV_{sur}(t)$ ) descrita en la Sección A.1, el factor de conversión  $f_c$  establecido en la Sección A.2 y las mediciones de iluminancia exterior incidente en las ventanas sur de los recintos ( $E_{E_{wmed}}(t)$ ), se estableció el factor de ponderación de la irradiación solar vertical ( $f_{pIS}$ ) sobre las ventanas de los recintos analizados, tal como describe la expresión (A.2), donde  $NM$  es el número de muestras analizadas.

$$f_{pIS_w} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{NM} \frac{E_{E_{wmed_i}}(t)}{f_c \cdot GV_{sur_{med_i}}(t)} \quad (A.2)$$

La Tabla A.1 muestra el valor de este factor para las ventanas del aula IE305 y la Sala de reuniones. Por ejemplo, estos factores permiten apreciar el efecto de los cortasoles en el IE305, los cuales reducen en aproximadamente 54% la iluminancia exterior incidente sobre la ventana sureste con respecto a la ventana suroeste.

---

<sup>67</sup> Este análisis también se realizó con cerca de 100 muestras de irradiancia solar entre 400 W/m<sup>2</sup> y 1 000 W/m<sup>2</sup>, dando un valor promedio de 127,6 lux/W/m<sup>2</sup> con una desviación estándar de 3,3 lux/W/m<sup>2</sup>.

Tabla A.1. Factores de ponderación de la irradiación en las ventanas de los recintos analizados.

Recinto	Aula IE305		Sala de reuniones
Ventana	Ventana sureste	Ventana suroeste	Ventana sur
Promedio	$fpIS_{VSE_{305}} = 0,430$	$fpIS_{VSO_{305}} = 0,797$	$fpIS_{VSR} = 0,596$
Desviación estándar	0,013	0,008	0,011

## Anexo B. Determinación de los perfiles de ocupación e irradiación solar

---

Dado que el modelado de iluminancia total interior y del consumo energético dependen de la iluminancia exterior incidente y del uso del recinto, se debe conocer el comportamiento de la ocupación del recinto y la irradiación solar global. Dada la variabilidad en el tiempo de estas variables, su descripción es realizada a partir de un número determinado de escenarios a los cuales se les asigna una probabilidad de ocurrencia definida con base en el análisis de datos obtenidos de la monitorización y uso programado de los espacios en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.

En ese caso, la energía anual consumida por una alternativa de control ( $EAC_{ac}$ ) es calculada como muestra (B.1), donde  $Nds$  es el número de días de servicio del recinto,  $td$  es un tipo de día,  $Ntd$  es el número total de tipo de día,  $PO_{td}$  es la probabilidad de ocurrencia del tipo de día  $td$  y  $EDC_{td}$  es la energía diaria consumida en un tipo de día  $td$ .

$$EAC_{ac} = Nds \sum_{td=1}^{Ntd} PO_{td} \cdot EDC_{td} + 24 \cdot 365 \cdot P_{aux} \quad (kWh/año) \quad (B.1)$$

Dado que los espacios son utilizados un número determinado de días al año, se tiene que el  $Nds$  para el aula IE305 y la Sala de Reuniones es 187 días/año y 225

días/año, respectivamente. Estos valores fueron determinados a partir del análisis de ocupación de los recintos.

Por otro lado, se determinan dos relaciones: entre la irradiación solar horizontal (sobre terraza y comúnmente conocida) y la irradiación solar incidente en las ventanas y entre la irradiancia solar y la iluminancia. Tales relaciones permiten suministrar información al modelado utilizado.

### B.1 OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE OCUPACIÓN DE LOS RECINTOS

La variabilidad de la ocupación se caracteriza a partir de tres niveles de uso: alto, medio y bajo, que se definen con base en el tiempo total de uso del espacio medido en horas/día, tal como muestra la Tabla B.1, donde  $P_{O_B}$ ,  $P_{O_M}$  y  $P_{O_A}$  son las probabilidad de ocurrencia para los niveles alto, medio y bajo, respectivamente. La probabilidad de ocurrencia se definió como la relación entre el número de días del año con una ocupación específica y el número total de días al año que es usado el espacio; por ejemplo, la Sala de reuniones es ocupada entre 1 y 3 horas días durante 68 días del año, de un total de 225 días de uso, por lo que la probabilidad de ocurrencia de este nivel de ocupación (bajo) es 0,302 (68/225).

Tabla B.1. Caracterización de la ocupación de los recintos analizados.

Nivel de ocupación	Aula IE305			Sala de reuniones		
	Horas/día	# días/año	Prob. de ocurrencia	Horas/día	# días/año	Prob. de ocurrencia
Bajo	$1 \leq t \leq 4$	51	$P_{O_B} = 0,273$	$1 \leq t \leq 3$	68	$P_{O_B} = 0,302$
Medio	$4 < t \leq 10$	68	$P_{O_M} = 0,364$	$3 > t \leq 7$	117	$P_{O_M} = 0,520$
Alto	$t > 10$	68	$P_{O_A} = 0,364$	$t > 7$	40	$P_{O_A} = 0,178$
Total	$\forall t \geq 1$	187	1,000	$\forall t \geq 1$	225	1,000

Los datos para realizar la caracterización de ocupación de los recintos se obtuvieron de fuentes diferentes de información. Para el caso de la Sala de Reuniones, se analizaron los datos de ocupación de un año obtenidos con la plataforma Andover Continuum del sistema de automatización del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Este

sistema registra el estado del sensor de ocupación del recinto con un paso de muestreo de 3 minutos; por lo que se obtienen 480 registros diarios de ocupación, para un total de 175 200 registros anuales, cifra cercana de datos analizados a partir de los cuales se determinaron las probabilidades de ocurrencia en este trabajo.

Para el caso del aula IE305, se analizaron los registros de programación de clases de dos semestres académicos (2016-II y 2017-I) y los acuerdos del Consejo Académicos N°203 de 2016 y N°014 de 2017. Se aclara que los sensores de ocupación de este espacio no están integrado a la plataforma Andover Continuum.

## B.2 OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE IRRADIACIÓN SOLAR INCIDENTE

La variabilidad de la irradiación solar global incidente se caracteriza a partir de tres niveles de ocurrencia: alto, medio y bajo, que se definen con base en el histograma de la irradiación solar diaria (*ISD*) mostrado en la Figura B.1. La Tabla B.2 muestra la información para cada nivel de irradiación definido, donde  $P_{G_B}$ ,  $P_{G_M}$  y  $P_{G_A}$  son las probabilidad de ocurrencia para los niveles alto, medio y bajo, respectivamente.

Figura B.1. Histograma del comportamiento de la irradiación solar global en el Edificio de Ingeniería Eléctrica durante 2002 y 2008.

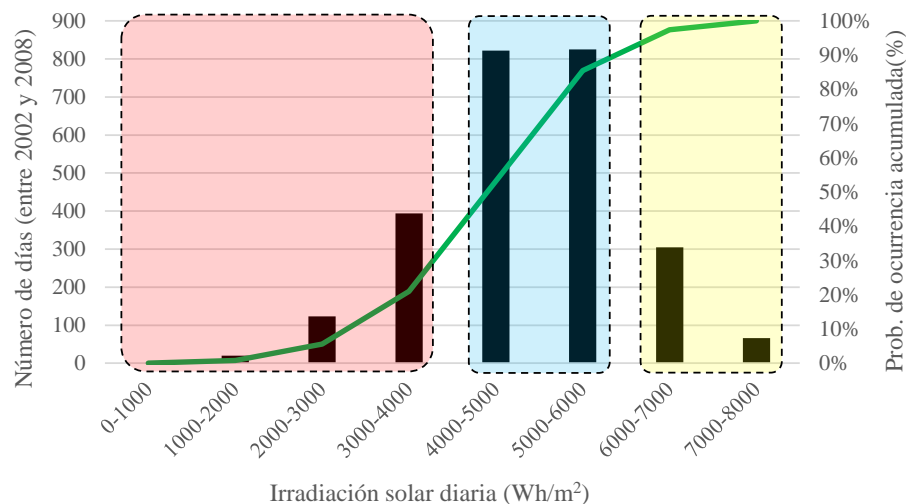


Tabla B.2. Caracterización de la irradiación solar incidente de los recintos analizados.

Nivel de irradiación	Irradiación diaria (Wh/día)	Valor promedio (Wh/día)	# días (2002-2008)	# días / año	Probabilidad de ocurrencia
Bajo	$ISD \leq 4\,000$	3 299	537	76,71	$P_{G\_B} = 0,210$
Medio	$4\,001 < ISD \leq 6\,000$	4 975	1 647	235,29	$P_{G\_M} = 0,645$
Alto	$ISD > 6\,000$	6 540	371	53,00	$P_{G\_A} = 0,145$
Total	$\forall ISD$	4 850	2 555	365	1,000

La probabilidad de ocurrencia se definió como la relación entre el número de días con una irradiación solar diaria específica y el número total de días del intervalo de tiempo analizado; por ejemplo, la irradiación solar diaria tuvo un valor entre 4 001 y 6 000 Wh/día durante 1 647 días entre 2002 y 2008, de un total de 2 555 días, por lo que la probabilidad de ocurrencia de este nivel de irradiación (medio) es 0,645 (1 647 / 2 555).

### B.3 ESCENARIOS Y CURVAS DE OCUPACIÓN E IRRADIACIÓN SOLAR INCIDENTE

La Tabla B.3 muestra los 9 tipos de día que se obtienen a partir de la combinación de los casos de irradiancia solar y ocupación; asimismo, expresa la probabilidad de ocurrencia de un escenario como el producto de las probabilidades de los casos de irradiancia solar y ocupación.

Tabla B.3. Definición de los escenarios de análisis.

Tipo de día ( <i>td</i> )	Nivel de irradiancia solar	Nivel de ocupación	Probabilidad de ocurrencia
1	Bajo	Bajo	$PO_{td=1} = P_{G\_B} \cdot P_{O\_B}$
2	Bajo	Medio	$PO_{td=2} = P_{G\_B} \cdot P_{O\_M}$
3	Bajo	Alto	$PO_{td=3} = P_{G\_B} \cdot P_{O\_A}$
4	Medio	Bajo	$PO_{td=4} = P_{G\_M} \cdot P_{O\_B}$
5	Medio	Medio	$PO_{td=5} = P_{G\_M} \cdot P_{O\_M}$
6	Medio	Alto	$PO_{td=6} = P_{G\_M} \cdot P_{O\_A}$
7	Alto	Bajo	$PO_{td=7} = P_{G\_A} \cdot P_{O\_B}$
8	Alto	Medio	$PO_{td=8} = P_{G\_A} \cdot P_{O\_M}$
9	Alto	Alto	$PO_{td=9} = P_{G\_A} \cdot P_{O\_A}$

Las tablas B.4 y B.5 muestran las probabilidades de ocurrencia ( $PO_{td}$ ), asociadas a cada uno de los tipos de día,  $td$ , productos de la combinación de los casos de irradiación solar global y ocupación para el aula IE305 y la Sala de Reuniones. Por ejemplo, para la Sala de Reuniones un escenario con alta irradiación solar y alta ocupación tiene una probabilidad de ocurrencia de 0,02581; mientras un escenario con irradiación solar media y ocupación media tiene una probabilidad de ocurrencia de 0,33540.

Tabla B.4. Probabilidades de ocurrencia de cada uno de los nueve escenarios posibles de irradiación solar y ocupación para la Sala de Reuniones.

	$P_{G,A}$	$P_{G,M}$	$P_{G,B}$	Total
$P_{O,A}$	0,02581	0,11481	0,03738	<b>0,178</b>
$P_{O,M}$	0,07540	0,33540	0,10920	<b>0,520</b>
$P_{O,B}$	0,04379	0,19479	0,06342	<b>0,302</b>
Total	<b>0,145</b>	<b>0,645</b>	<b>0,210</b>	<b>1,000</b>

Tabla B.5. Probabilidades de ocurrencia de cada uno de los nueve escenarios posibles de irradiación solar y ocupación para el aula IE305.

	$P_{G,A}$	$P_{G,M}$	$P_{G,B}$	Total
$P_{O,A}$	0,05272	0,23452	0,07636	<b>0,3636</b>
$P_{O,M}$	0,05272	0,23452	0,07636	<b>0,3636</b>
$P_{O,B}$	0,03954	0,17589	0,05727	<b>0,2727</b>
Total	<b>0,145</b>	<b>0,645</b>	<b>0,210</b>	<b>1,000</b>

# Anexo C. Formulación del problema de optimización para el SIH existente en la Sala de Reuniones

Este anexo presenta la formulación del problema de optimización de menor consumo de energía del SIH para la Sala de reuniones de acuerdo a sus características actuales para la estrategia de control actual o D (Secciones C.1 y C.2) y para las estrategias de control A, B y C (Sección C.3). La Tabla C.1 presenta las características actuales del recinto.

Tabla C.1. Características actuales de la sala de reuniones

Dimensiones	$NK$	$N_{gc}$	$N_p$	Estrategia de control de iluminación eléctrica	$NA$
longitud $l = 6m$ ancho $w = 3,6m$	4	1	18	D → Componentes: $SO$ , $Fdim$ , $Ld$ y $Co$ Técnica: Dimerización	1

$NK$ : Número de luminarias en el recinto  $N_{gc}$ : Número de grupos de control  
 $SO$ : Sensor de ocupación  $Fdim$ : Fotocelda dimerizable  $N_p$ : Número de puntos del mallado  
 $Ld$ : Luminaria dimerizable  $Co$ : Controlador

## C.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

### Función objetivo

La condición de operación del sistema SIH puede ser modelado como un problema de optimización de minimización, en el cual la potencia demandada  $P_{SIH}(t)$  en un instante  $t$  por el SIH es la función objetivo mostrada por (C.1), (C.2) y (C.3).

$$P_{SHI}(t) = \sum_{g_i}^{N_{gc}} n l_{g_i} \cdot OO_{g_i}(t) \cdot a_p + \sum_{g_i}^{N_{gc}} n l_{g_i} \cdot OO_{g_i}(t) \cdot b_p \cdot \varphi_{g_i}(t) \quad (W) \quad (C.1)$$

$$P_{SHI}(t) = \sum_{g_i=1}^{N_{gc}} nl_{g_1} \cdot OO_{g_1}(t) \cdot a_p + \sum_{g_i=1}^{N_{gc}} nl_{g_1} \cdot OO_{g_1}(t) \cdot b_p \cdot \varphi_{g_1}(t) \quad (W) \quad (C.2)$$

$$\min F.O. = \min P_{SHI}(t) = \min(4 \cdot OO_{g_1}(t) \cdot a_p + 4 \cdot OO_{g_1}(t) \cdot b_p \cdot \varphi_{g_1}(t)) \quad (C.3)$$

Donde  $nl_{g_i}$  es el número de luminarias que conforman el grupo de control  $g_i$ , siendo para este caso,  $nl_{g_i} = NK$  y  $g_i = g_1$ , dado que solo hay un grupo de control al que pertenecen todas las luminarias del recinto.  $a_p$  y  $b_p$  son parámetros conocidos ( $a_p = 30,806$  W y  $b_p = 50,27$  W) que se obtienen a partir de la curva de potencia consumida por las luminarias,  $Plum = 50,27 \cdot \varphi + 30,806$ , que es función del porcentaje del flujo luminoso  $\varphi$ . Entonces las variables desconocidas a determinar que satisfacen (C.3) son el estado de operación del grupo de control  $g_1$ ,  $OO_{g_1}(t)$  y el porcentaje de flujo luminoso emitido por las luminarias de  $g_1$ ,  $\varphi_{g_1}(t)$ .

### Restricciones de estado de operación

$$OO_{g_{1D}}(t) \in \{0,1\} \quad (C.4)$$

### Restricciones del porcentaje de flujo luminoso de operación

$$0 \leq \varphi_{g_{1D}}(t) \leq 1 \quad (C.5)$$

$$\varphi_{g_{1D}}(t) \geq 0,06 \cdot OO_{g_{1D}} \quad (C.6)$$

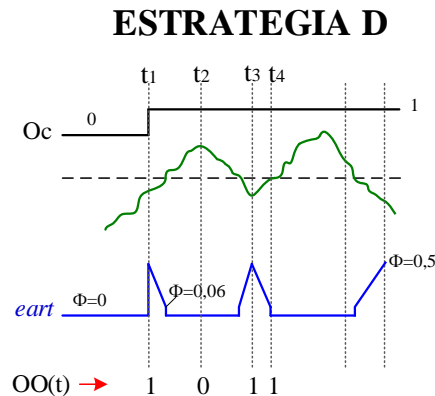
$$\varphi_{g_{1D}}(t) \leq OO_{g_{1D}} \quad (C.7)$$

Las restricciones de estado de operación  $OO_{g_{1D}}(t)$  y porcentaje de flujo luminoso  $\varphi_{g_{1D}}(t)$  son determinadas de acuerdo a tres factores: (i) la estrategia de control empleada, que se compone de la técnica de control: dimerización y los elementos de control y luminarias: SO, Fdim, Ld y Co para este caso; (ii) el estado de ocupación  $Oc$  del recinto y (iii) el comportamiento de la iluminancia artificial interior  $e_A(p, t)$  sobre la superficie de trabajo, que se supone es proporcional al flujo luminoso emitido

por las luminarias.  $e_A(p, t)$  depende de la disponibilidad de luz natural interior representada por la iluminancia natural  $e_D(p, t)$  sobre la superficie de trabajo y el nivel mínimo de iluminación  $e_{min}$  requerido.

Con el fin de ilustrar lo expuesto, la Figura C.1 muestra un ejemplo del comportamiento de  $OO_{g1D}(t)$  y  $\varphi_{g1D}(t)$  según  $e_A(p, t)$  y  $e_D(p, t)$  medidas en un punto  $p(x, y)$  (de menor iluminancia natural) sobre la sección de interés de la superficie de trabajo (mesa de juntas).

Figura C.1. Comportamiento del estado de operación  $OO(t)$  y el flujo luminoso  $\varphi(t)$  para las estrategias de control D.



Cuando no hay ocupación en el recinto ( $O_c = 0$ ) las luminarias están apagadas y, por ende, la potencia demandada es 0. En ese sentido, solo se consideran las franjas de tiempo cuando  $O_c = 1$ . Para el primer intervalo, entre  $t_1$  y  $t_2$ , se aprecia que inicialmente  $OO(t_1)$  toma el valor de 1 (On) y  $\varphi(t_1)$  toma un valor de 0,5; posteriormente, la iluminancia natural aumenta dentro del intervalo analizado y por sí misma satisface la necesidad de iluminancia del espacio, por ello,  $\varphi$  disminuye hasta descender a su valor mínimo (0,06). Dado que la fotocelda dimerizable no puede llevar el flujo luminoso a 0, el controlador  $Co$  desenergiza las luminarias, definiendo el valor de las variables del sistema,  $OO = 0$  y  $\varphi = 0$ . En  $t_3$ ,  $e_{nat} \leq e_{min}$ , las luminarias están encendidas y por ende  $OO(t_3) = 0$  y  $\varphi(t_3) = 0,5$  que produce la  $e_{art}$  necesaria para satisfacer  $e_{min}$ ; en  $t_4$ ,  $e_{nat} \geq e_{min}$ , las luminarias están encendidas

en consecuencia  $OO(t_4) = 1$  y  $\varphi(t_4) = 0,06$  el valor más bajo que pueden emitir las luminarias.

### Restricciones de iluminancia

Las restricciones de iluminancia son determinadas por la iluminancia total interior en el punto  $p$  para el instante  $t$  dada por (C.8), definida como la suma de la iluminancia artificial total en el punto  $p$  para un instante de tiempo  $t$ ,  $e_A(p, t)$ , y la iluminancia natural en el punto  $p$  para un instante de tiempo  $t$ ,  $e_D(p, t)$ . El término  $z_{(gi,k)}$  de (C.9) es igual a 1 dado que las cuatro luminarias del recinto pertenecen a un solo grupo de control. En definitiva,  $e_A(p, t)$  se expresa tal como muestra (C.10).

$$e_T(p, t) = e_A(p, t) + e_D(p, t) \geq e_{min} \quad (C.8)$$

$$e_A(p, t) = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} a_{p(k,p)} \cdot OO_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t) \cdot z_{(gi,k)} \quad (C.9)$$

$$e_A(p, t) = \sum_{k=1}^{NK} a_{p(k,p)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot 1 \quad (C.10)$$

$a_{p(k,p)}$  es elemento de la matriz  $A_p$  de NK filas por NP columnas mostrada por (C.11) y que almacena los aportes de iluminancia de cada luminaria del recinto sobre cada punto  $p$  de la superficie de trabajo (a una altura de 0,75 m)

$$A_{p_{NK \times NP}} = \begin{pmatrix} a_{p(1,1)} & a_{p(1,2)} & \cdots & a_{p(1,18)} \\ a_{p(2,1)} & a_{p(2,2)} & \cdots & a_{p(2,18)} \\ a_{p(3,1)} & a_{p(3,2)} & \cdots & a_{p(3,18)} \\ a_{p(4,1)} & a_{p(4,2)} & \cdots & a_{p(4,18)} \end{pmatrix} \quad (C.11)$$

Para el caso de la Sala de reuniones, las restricciones de iluminancia corresponden únicamente a los puntos del mallado ubicados sobre la mesa de juntas ( $p_{8 \rightarrow (i=2, j=2)}$ ,  $p_{9 \rightarrow (i=2, j=3)}$ ,  $p_{10 \rightarrow (i=2, j=4)}$ ,  $p_{11 \rightarrow (i=2, j=5)}$ ), la cual se considera el área útil de trabajo donde interesa que se satisfaga un nivel de iluminancia mínimo  $e_{min}$  cuando hay

presencia. Entonces el desarrollo de (C.8) para estos cuatro puntos es expresado por las ecuaciones (C.12) a (C.21).

$$e_{AT(2,2)}(t) = a_{p(1,8)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(2,8)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(3,8)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(4,8)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \quad (C.12)$$

$$= OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,8)} + a_{p(2,8)} + a_{p(3,8)} + a_{p(4,8)})$$

$$e_{AT(2,3)}(t) = a_{p(1,9)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(2,9)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(3,9)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(4,9)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \quad (C.13)$$

$$= OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,9)} + a_{p(2,9)} + a_{p(3,9)} + a_{p(4,9)})$$

$$e_{AT(2,4)}(t) = a_{p(1,10)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(2,10)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(3,10)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(4,10)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \quad (C.14)$$

$$= OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,10)} + a_{p(2,10)} + a_{p(3,10)} + a_{p(4,10)})$$

$$e_{AT(2,5)}(t) = a_{p(1,11)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(2,11)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(3,11)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + a_{p(4,11)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \quad (C.15)$$

$$= OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,11)} + a_{p(2,11)} + a_{p(3,11)} + a_{p(4,11)})$$

$$e_D(p, t) = f_c \cdot \sum_{w=1}^{NA} G_w(t) \cdot df_{prom_w}(p) \quad (C.16)$$

$$e_{D(2,2)}(t) = f_c \cdot G_{W=1}(t) \cdot df_{prom_{w=1}(2,2)}$$

$$e_{D(2,3)}(t) = f_c \cdot G_{W=1}(t) \cdot df_{prom_{w=1}(2,3)}$$

$$e_{D(2,4)}(t) = f_c \cdot G_{W=1}(t) \cdot df_{prom_{w=1}(2,4)}$$

$$e_{D(2,5)}(t) = f_c \cdot G_{W=1}(t) \cdot df_{prom_{w=1}(2,5)} \quad (C.17)$$

Finalmente, se obtienen las restricciones para cada punto, representadas por (C.18)→ $p_8$ , (C.19)→ $p_9$ , (C.20)→ $p_{10}$ , (C.21)→ $p_{11}$ .

$$\begin{aligned}
e_{T(2,2)}(t) &\geq e_{min} \\
e_{AT(2,2)}(t) + f_c \cdot G_1(t) \cdot df_{prom_w(2,2)} &\geq e_{min} \\
OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,8)} + a_{p(2,8)} + a_{p(3,8)} + a_{p(4,8)}) + f_c \cdot G_1(t) \cdot df_{prom_w(2,2)} &\geq e_{min}
\end{aligned} \tag{C.18}$$

$$\begin{aligned}
e_{T(2,3)}(t) &\geq e_{min} \\
e_{AT(2,3)}(t) + f_c \cdot G_1(t) \cdot df_{prom_w(2,3)} &\geq e_{min} \\
OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,9)} + a_{p(2,9)} + a_{p(3,9)} + a_{p(4,9)}) + f_c \cdot G_1(t) \cdot df_{prom_w(2,3)} &\geq e_{min}
\end{aligned} \tag{C.19}$$

$$\begin{aligned}
e_{T(2,4)}(t) &= e_{AT(2,4)}(t) + f_c \cdot G_1(t) \cdot df_{prom_w(2,4)} \geq e_{min} \\
e_{T(2,4)}(t) &= OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,10)} + a_{p(2,10)} + a_{p(3,10)} + a_{p(4,10)}) + f_c \cdot G_1(t) \\
&\cdot df_{prom_w(2,4)} \geq e_{min}
\end{aligned} \tag{C.20}$$

$$\begin{aligned}
e_{T(2,5)}(t) &= e_{AT(2,5)}(t) + f_c \cdot G_1(t) \cdot df_{prom_w(2,5)} \geq e_{min} \\
e_{T(2,5)}(t) &= OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) \cdot (a_{p(1,11)} + a_{p(2,11)} + a_{p(3,11)} + a_{p(4,11)}) + f_c \cdot G_1(t) \\
&\cdot df_{prom_w(2,5)} \geq e_{min}
\end{aligned} \tag{C.21}$$

Estas cuatro restricciones pueden ser escritas en la forma de (C.22), lo cual facilita la escritura en GAMS y reduce las líneas de código requeridas.

$$p_{ritum_p} \cdot e_T(p, t) \geq e_{min} \cdot p_{ritum_p} \tag{C.22}$$

Reemplazando (C.10) y (C.16) en (C.22), se obtiene (C.23)

$$p_{ritum_p} \cdot \sum_{k=1}^{NK} a_{p(k,p)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + e_D(p, t) \geq e_{min} \cdot p_{ritum_p} \tag{C.23}$$

Donde  $p_{ritum_p}$  es el elemento del vector  $P_{ritum_p}_{1 \times NP} = [0 \ \dots \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 0]$ , compuesto por unos y ceros de dimensión  $1 \times N_p$ , el cual indica los puntos del recinto que pertenecen a la mesa de juntas. Los 1 corresponden a la pertinencia de los puntos  $p_8, p_9, p_{10}$  y  $p_{11}$ .

## C.2 ESCRITURA DE ECUACIONES EN GAMS

La Tabla C.2 presenta la escritura en GAMS de la función objetivo y las restricciones del problema de optimización a fin de ser resuelto.

Tabla C.2. Escritura de ecuaciones en GAMS

	Ecuaciones resultantes	GAMS
<b>Función objetivo</b>	$P_{SIH}(t) = 4 \cdot OO_{g1D}(t) \cdot a_p + 4 \cdot OO_{g1D}(t) \cdot b_p \cdot \varphi_{g1}(t)$	FOBJ.. PSIH =E= 4*aP*OO+4*bP*OO*F;
<b>Restricciones estado de operación</b>	$OO_{g1D}(t) \in \{0,1\}$	BINARY VARIABLE OO;
<b>Restricciones de porcentaje de flujo luminoso</b>	$0 \leq \varphi_{g1D}(t) \leq 1$	POSITIVE VARIABLE F; F.lo=0; F.up=1;
	$\varphi_{g1D}(t) \geq 0,06 \cdot OO_{g1D}(t)$	R3.. F =G= 0,08*OO;
	$\varphi_{g1D}(t) \leq OO_{g1D}$	R4.. F =L= OO;
<b>Restricciones de iluminancia</b>	$p_{ritum_p} \cdot \sum_{k=1}^{NK} a_{p(k,p)} \cdot OO_{g1}(t) \cdot \varphi_{g1}(t) + e_D(p,t) \geq e_{min} \cdot p_{ritum_p}$	R5(p): st(p)*sum((k),ApT(k,p)*OO*F) +DF1(p)*IRS1*Fc+DF2(p)*IRS2*Fc) =G= emin* st(p);

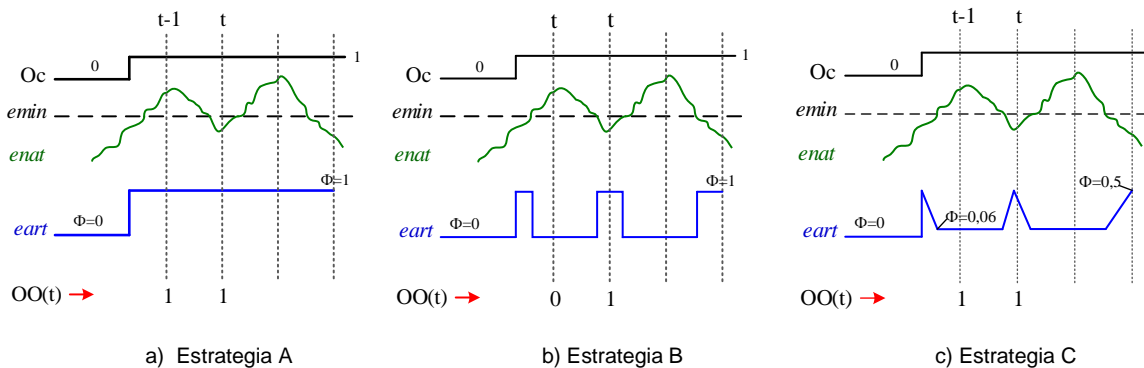
## C.3 FORMULACIÓN DE RESTRICCIONES DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL A, B Y C PARA SU USO EN LA SALA DE REUNIONES

La misma fundamentación establecida para las restricciones de estado de operación  $OO_{g1}(t)$  y flujo luminoso  $\varphi_{g1}(t)$  para la estrategia D aplican para la obtención de las restricciones de las estrategias A, B y C (ver Tabla C.3), teniendo en cuenta el comportamiento particular de  $OO(t)$  y  $\varphi(t)$  para cada estrategia de control, el cual es presentado por la Figura C.2. Al respecto, se indica que tanto para la estrategia A como para la estrategia C, los valores de  $OO(t)$  en el instante de tiempo actual  $t$ , dependen del instante de tiempo anterior ( $t-1$ ). Esto debido a que los componente de control, SO con fotocelda incluida para la estrategia A y la fdim para la estrategia C no tienen la capacidad de apagar las luminarias cuando  $enat \geq emin$  y la  $eart$  ya no es requerida, por ende, bajo esta situación  $OO(t) = 1$  y  $\varphi(t) = 1$  y  $\varphi(t) = 0,06$ , respectivamente. Donde  $\varphi(t) = 0,06$  es el flujo mínimo que puede emitir la luminaria por la acción de fdim.

Tabla C.3. Restricciones del problema de optimización para la aplicación de las estrategias de control A, B y C.

Estrategia de control	Restricciones del estado de operación	Restricciones del flujo luminoso
	Formulación	Formulación
<b>A</b> → Componentes: SO con fotocelda incluida y Luminaria On/Off ( <i>Loo</i> ) Técnica: On/Off	$OO_{g1A}(t) \in \{0,1\}$ $OO_{g1A}(t) \geq OO_{g1A}(t-1)$	$\varphi_{g1A}(t) = OO_{g1A}(t)$
<b>B</b> → Componentes: SO, Foo y <i>Loo</i> Técnica: On/Off	$OO_{g1B}(t) \in \{0,1\}$	$\varphi_{g1B}(t) = OO_{g1B}(t)$
<b>C</b> → Componentes: SO, <i>fdim</i> y <i>Ld</i> Técnica: Dimerización	$OO_{g1C}(t) \in \{0,1\}$ $OO_{g1C}(t) \geq OO_{g1C}(t-1)$	$0 \leq \varphi_{g1C}(t) \leq 1$ $\varphi_{g1C}(t) \geq 0,08 \cdot OO_{g1C}(t)$ $\varphi_{g1C}(t) \leq OO_{g1C}$

Figura C.2. Comportamiento del estado de operación  $OO(t)$  y el flujo luminoso  $\varphi(t)$  para las estrategias de control A, B y C.



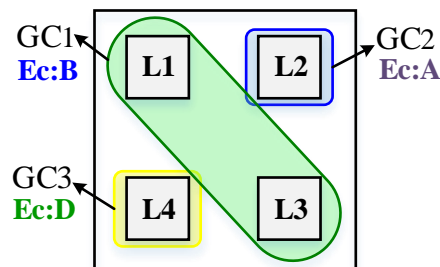
Los nuevos tres problemas de optimización (estrategias A, B y C) tienen las siguientes características comunes con el problema de optimización de la estrategia D:

- Las mismas restricciones de iluminancia no cambian para estas estrategias de control ya que se debe satisfacer el mínimo valor de iluminancia en el espacio  $e_{min}$ .
- El problema cuenta con un solo un grupo de control
- La iluminancia mínima  $e_{min}$  se debe garantizar únicamente sobre la zona útil de trabajo (los 4 puntos que se encuentra sobre la mesa de juntas), lo cual origina la existencia de las 4 restricciones de iluminancia. En caso de que se abarcará toda el área del recinto, como en un aula, habría tantas restricciones como puntos que representan la superficie de trabajo.

# Anexo D. Formulación del problema de optimización para una alternativa potencial de control del SIH en la Sala de Reuniones

Este anexo presenta un ejemplo de aplicación de la formulación del problema de minimización del consumo de potencia  $P_{SIH}(t)$  para un instante de tiempo  $t$ . El ejemplo se basa en la sala de reuniones, donde es considerada la alternativa de control compuesta por tres grupos de control (GC1, GC2 y GC3) y tres estrategias de control (A, B y D) organizados como se muestra en la Figura D.1. Las estrategias A y B utilizan la técnica de control de conmutación On/Off, sus componentes de control son un sensor de ocupación SO con fotocelda incluida para la estrategia A, una fotocelda On/Off (Foo) para la estrategia B y luminarias On/Off, Loo. Mientras que la estrategia D usa la técnica de control de dimerización y se incluye una fotocelda dimerizable, Fdim, un controlador Co y una luminaria dimerizable, Ld.

Figura D.1. Alternativa potencial de control del SIH



La Tabla D.1 presenta la formulación matemática del problema de optimización para cualquier posible alternativa de control dada por las diferentes configuraciones de grupos de control y estrategias de control (A, B, C y D). A partir de esta formulación,

fue desarrollada la programación en MATLAB y GAMS que permiten solucionar el problema de optimización mediante la obtención de las variables de operación  $OO_{gi}(t)$  y  $\varphi_{gi}(t)$  para determinar la potencia mínima consumida por las luminarias del SIH para cada alternativa de control a evaluar. Debido a que la alternativa de control del ejemplo analizado en este anexo no contiene la estrategia C, sus restricciones no son usadas, lo cual es indicado con color gris.

La expresión (D.1) permite establecer que el número de posibles alternativas de control de la Sala de reuniones es 756 ( $NK=4$ , número de luminarias del recinto,  $N_{gc} = 4$ , número de grupos de control,  $N_{ec} = 4$ , número de estrategias de control).

Tabla D.1. Formulación matemática del problema de optimización para cualquier posible alternativa de control y su escritura en GAMS

Estrategia de control	Formulación matemática	GAMS
		Declaración de subíndices: SET pt /1*18/; SET k /1*4/; SET gc /1*4/;
<b>Función objetivo</b>	A, B, C, D $\min P_{SIH} = \min \sum_{gI=1}^{N_{gc}} \sum_{k=1}^{NK} (a_P + b_P \cdot \varphi_{gi}(t)) \cdot OO_{gi}(t) \cdot Z_{(gI,k)}$	FOBJ.. Pcons =E= sum((gc,k),(OO(gc)*(aP+bP*F(gc))*zgc(gc,k)));
<b>Restricciones estado de operación</b>	A, B, C, D $OO_{gi}(t) \in \{0,1\}$	BINARY VARIABLE OO;
A	$OO_{gi}(t) \cdot p_{rAgi} \geq OO_{gi}(t-1) \cdot p_{rAgi}$	RA1(gc).. O(gc)*prA(gc)=G= oopreA(gc)*prA(gc);
B	-	-
C	$OO_{gi}(t) \cdot p_{rCgi} \geq OO_{gi}(t-1) \cdot p_{rCgi}$	RC1(gc).. OO(gc)*prC(gc)=G= oopreC(gc)*prC(gc);
D	-	-
<b>Restricciones del porcentaje de flujo luminoso</b>	A $\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rAgi} = OO_{gi}(t) \cdot p_{rAgi}$	RA2(gc).. F(gc)*prA(gc)=E= OO(gc)*prA(gc);
B	$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rBgi} = OO_{gi}(t) \cdot p_{rBgi}$	RB1(gc).. F(gc)*prB(gc)=E= OO(gc)*prB(gc);
C	$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rCgi} \geq 0,06 \cdot OO_{gi}(t) \cdot p_{rCgi}$ $\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rCgi} \leq OO_{gi}(t) \cdot p_{rCgi}$	RC2(gc).. F(gc)*prC(gc)=G= 0.05*OO(gc)*prC(gc); RC3(gc).. F(gc)*prC(gc)=L= OO(gc)*prC(gc);
D	$\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rDgi} \geq 0,06 \cdot OO_{gi}(t) \cdot p_{rDgi}$ $\varphi_{gi}(t) \cdot p_{rDgi} \leq OO_{gi}(t) \cdot p_{rDgi}$	RD1(gc).. F(gc)*prD(gc)=G= 0.06*OO(gc)*prD(gc); RD2(gc).. F(gc)*prD(gc)=L= OO(gc)*prD(gc);

Estrategia de control	Formulación matemática	GAMS
Restricciones de iluminancia A, B, C, D	$p_{rilum_p} \cdot \left( \sum_{gi=1}^{Ngc} \sum_{k=1}^{NK} OO_{gi}(t) \cdot \varphi_{gi}(t) \cdot a_{p(k,p)} \cdot z_{(gi,k)} + e_{nat_p}(t) \right) \geq emin \cdot p_{rilum_p}$	Rilum1(p).. (sum((k,gc),OO(gc)*F(gc)*a(k,p)*zgc(k,gc))+ed(p))*prilum(gc)=G=emin*prilum(gc);

$$N_{SHI} = \sum_{Ngc=1}^{NK} S(NK, Ngc) N_{ec}^{Ngc} \tag{D.1}$$

La Tabla D.2 muestra en la primera columna las variables de entrada que requiere GAMS para resolver el problema de optimización, las cuales son calculadas con ayuda de MATLAB. Mientras la segunda y tercera columnas describen la notación definida para expresar estas variables dentro de la programación en GAMS y su naturaleza, respectivamente.

Tabla D.2 Variables de entrada del script para la solución del problema de optimización en GAMS

Salida de MATLAB	Entrada a GAMS	Tipo de variable	
$emin$	Emin	Escalar	
$a_p$ y $b_p$	aP y bP	Escalar	
$e_D(p, t)$	ed(p)	Elemento del vector	$ED_{1 \times NP} = [e_{D_{p=1}}, \dots, e_{D_{p=NP}}]$
$a_{p(k,p)}$	a(k,p)	Elemento de la matriz	$A_{pT\_NK \times NP} = \begin{pmatrix} a_{p(1,1)} & a_{p(1,2)} & \dots & a_{p(1,18)} \\ a_{p(2,1)} & a_{p(2,2)} & \dots & a_{p(2,18)} \\ a_{p(3,1)} & a_{p(3,2)} & \dots & a_{p(3,18)} \\ a_{p(4,1)} & a_{p(4,2)} & \dots & a_{p(4,18)} \end{pmatrix}$
$p_{rA_{gi}}$	prA(gc)	Elemento del vector	$P_{rA_{1 \times Ngc}} = [p_{rA_{gi=1}}, \dots, p_{rA_{gi=Ngc}}]$
$p_{rB_{gi}}$	prB(gc)	Elemento del vector	$P_{rB_{1 \times Ngc}} = [p_{rB_{gi=1}}, \dots, p_{rB_{gi=Ngc}}]$
$OO_{gi}(t - 1)$	oopreA(gc) oopreC(gc)	Elemento del vector	$OOpreA_{1 \times Ngc} = [oopreA_{gi=1}, \dots, oopreA_{gi=Ngc}]$
$p_{rC_{gi}}$	prC(gc)	Elemento del vector	$P_{rC_{1 \times Ngc}} = [p_{rC_{gi=1}}, \dots, p_{rC_{gi=Ngc}}]$
$p_{rD_{gi}}$	prD(gc)	Elemento del vector	$P_{rD_{1 \times Ngc}} = [p_{rD_{gi=1}}, \dots, p_{rD_{gi=Ngc}}]$
$z_{(gi,k)}$	*zgc(k,gc)	Elemento del vector	$Z_{Ngc \times NK} = \begin{pmatrix} z_{(1,1)} & z_{(1,2)} & \dots & z_{(1,18)} \\ z_{(2,1)} & z_{(2,2)} & \dots & z_{(2,18)} \\ z_{(3,1)} & z_{(3,2)} & \dots & z_{(3,18)} \\ z_{(4,1)} & z_{(4,2)} & \dots & z_{(4,18)} \end{pmatrix}$
$p_{rilum_p}$	prilum(gc)	Elemento del vector	$P_{rilum_{p_1 \times NP}} = [p_{rilum_{p=1}}, \dots, p_{rilum_{p=NP}}]$

NP=Número de puntos del recinto, 18; Ngc=Número de grupos de control, 4

Con el fin de explicar la naturaleza y origen de las variables de entrada a GAMS una vez son calculadas en MATLAB, se ha propuesto la Figura D.2 que describe solo las entradas  $p_{rA_{gi}}$ ,  $OO_{gi}(t-1)$ ,  $p_{rB_{gi}}$ ,  $p_{rD_{gi}}$ ,  $z_{(gi,k)}$  para la solución particular del problema de optimización dado por la alternativa de control del ejemplo planteado. Las entradas  $a_p$  y  $b_p$ ,  $e_D(p,t)$  y  $a_{p(k,p)}$  son previamente determinadas como resultado de la aplicación de los modelos de iluminancia natural, iluminancia artificial y potencia de la luminaria (descritos en el Capítulo 5) programados en MATLAB.

El origen y la naturaleza de las variables  $p_{rA_{gi}}$ ,  $p_{rB_{gi}}$ ,  $p_{rD_{gi}}$ ,  $z_{(gi,k)}$  es proporcionado por la matriz de alternativas de control  $\mathbf{Ac}_{NSIH \times 2NK}$  de la Figura D.2. Cada fila de esta matriz representa la configuración (grupos de control y estrategias de control) de cada una de las posibles alternativas de control para el recinto, incluida la alternativa del ejemplo, denotada como la fila correspondiente a la alternativa de control  $n$ . Las primeras cuatro columnas de la matriz, de color verde (enumeradas del 1-4 simbolizan el orden en que se identifican las luminarias en el recinto), contienen la información de qué luminaria pertenece a cada grupo de control según la alternativa de control. En ese sentido, de acuerdo al ejemplo, los cuatro primeros elementos de la *alternativa de control n* son entonces, [1,2,1,3], es decir que la luminaria L1 y L3 pertenecen al grupo de control 1,  $g_{i=1}$ , la luminaria L2 al grupo de control 2,  $g_{i=2}$ , y la luminaria L4 al grupo de control 3,  $g_{i=3}$ . De este arreglo de elementos son obtenidos los elementos  $z_{(gi,k)}$  de la matriz de pertinencia  $\mathbf{Z}_{N_{gc} \times NK}$  como se muestra en la parte 1 de la Figura D.2, cuyas filas indican que luminarias pertenecen a cada grupo de control que conforma la *alternativa de control n*

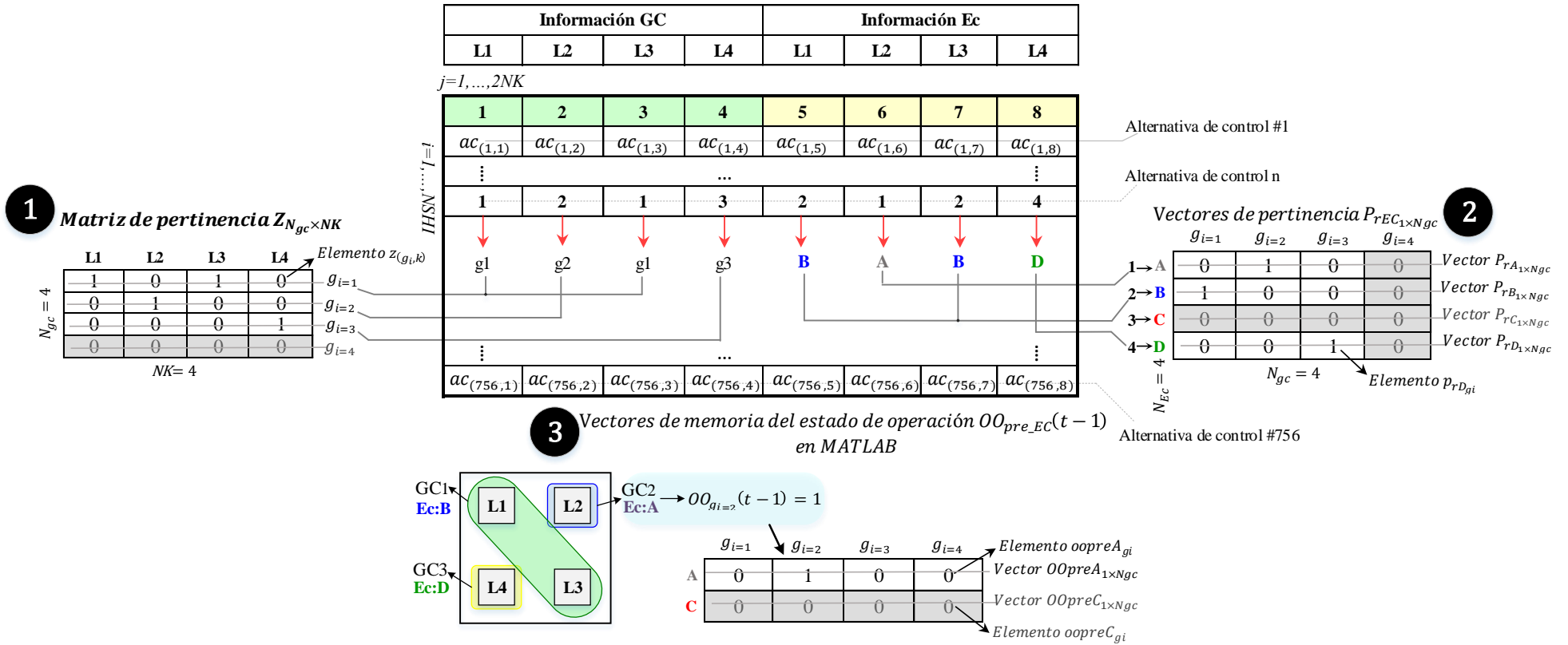
Asimismo, las cuatro últimas columnas, color amarillo (enumeradas del 5-8, simboliza el orden en que son identificadas las luminarias en el recinto), indican qué luminaria se encuentra bajo la operación de las estrategias de control que conforman cada alternativa de control. Según el ejemplo, los últimos cuatro elementos de la alternativa de control  $n$  están dados por [2,1,2,4], lo cual significa

que la luminaria L1 y L3 tienen asociada la estrategia de control B, identificada con el número 2, la luminaria L2 le corresponde la estrategia A, identificada con el número 1 y la luminaria L4 pertenece a la estrategia D representada por el número 4. A partir de este arreglo de elementos son determinados los elementos  $p_{rA_{gi}}$ ,  $p_{rB_{gi}}$ ,  $p_{rD_{gi}}$  de los vectores de pertinencia  $P_{rEC_{1 \times Ngc}}$ , tal como se presenta en la parte 2 de la Figura D.2. Estos vectores indican qué grupos de control operan bajo cada estrategia de control.

Por otra parte, la variable  $OO_{gi}(t-1)$  es obtenida a partir de los vectores de memoria  $OO_{pre\_EC}(t-1)$ , los cuales almacenan el estado de operación  $OO_{gi}$  para cada grupo de control que opera bajo las estrategias de control A y C. Según el ejemplo, parte 3 de la Figura D.2, los elementos  $oopreA_{gi}$  del vector  $OO_{preA_{1 \times Ngc}}$ , son  $[0,1,0,0]$ , donde el elemento  $oopreA_{gi=2}=1$ , lo que indica que el grupo de control 2,  $g_{i=2}$  es el único que pertenece a la estrategia de control A y que la variable  $OO_{g2}(t-1) = 1$  para este grupo de control. Cada vez que GAMS obtiene los valores de  $OO_{gi}(t)$ , estos son almacenados en los vectores de memoria  $OO_{pre\_EC}(t-1)$  en MATLAB.

Figura D.2. Matriz de configuraciones de las NSIH alternativas de control posibles para un SIH

**Matriz de alternativas de control  $Ac_{NSIH \times 2NK}$  en MATLAB**



# Anexo E. Descripción del uso de MATLAB y GAMS

---

Con el fin de estimar el consumo de energía anual de los SIH de los dos recintos analizados (Sala de reuniones y aula IE305), se hizo uso de MATLAB y GAMS. MATLAB (MATrix LABoratory) es una herramienta de software matemático con un entorno y lenguaje propio<sup>68</sup>, que permite el análisis matemático de problemas de ingeniería. Por otro lado, GAMS (*General Algebraic Modeling System*) es una herramienta para el modelado y solución de diversos tipos de problemas de optimización, especialmente problemas de optimización lineal, no lineal y entera-mixta<sup>69</sup>. Permite la integración de potentes solvers (programas para la solución de problemas) como CPLEX (LP<sup>70</sup> y MIP<sup>71</sup>), CONOPT (NLP<sup>72</sup>) y BARON (MINLP<sup>73</sup>), entre otros.

## E.1 Uso de MATLAB

Se desarrollaron un conjunto de scripts en MATLAB para realizar los cálculos relacionados con el modelado de iluminancia y gestionar la creación de los

---

<sup>68</sup> Tomado de <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (Junio de 2017)

<sup>69</sup> Tomado de <https://www.gams.com/products/introduction/> (Junio de 2017)

<sup>70</sup> LP: *Linear Programming*.

<sup>71</sup> MIP: *Mixed-integer programming*.

<sup>72</sup> NLP: *Nonlinear programming*.

<sup>73</sup> MINLP: *Mixed-integer nonlinear programming*.

problemas de optimización de la potencia consumida, estimar la energía consumida y el valor presente neto.

Los scripts relacionados a las etapas número 17 y 20 fueron desarrollados en el marco de la investigación adelantada por Osma. Estos scripts se debieron adaptar para su aplicación en este trabajo; tal adaptación consistió en alimentar parte de estos scripts con la información descrita en los capítulos 3, 4 y sección 5.2. Los scripts relacionados con las etapas 20, 22, 24, 25 30 y 31 son de autoría propia y permite determinar el valor presente neto de las alternativas de control y seleccionar aquella de menor costo financiero.

## E.2 Uso de GAMS

Como ya se mencionó, el consumo de potencia por el SIH se modeló como un problema de optimización en función de las variables  $OO_{gi}$  y  $\varphi_{gi}$  para cada alternativa de control a analizar. Dado que el problema se modela desde el enfoque de programación no lineal entera-mixta (MINLP), se desarrolló un script en GAMS para darle solución. La Figura E.1 muestra el esquema de entradas y salidas. La Tabla E.2 presenta el tipo y la descripción de las entradas.

Figura E.1. Esquema de entradas y salidas del script de optimización desarrollado en GAMS.

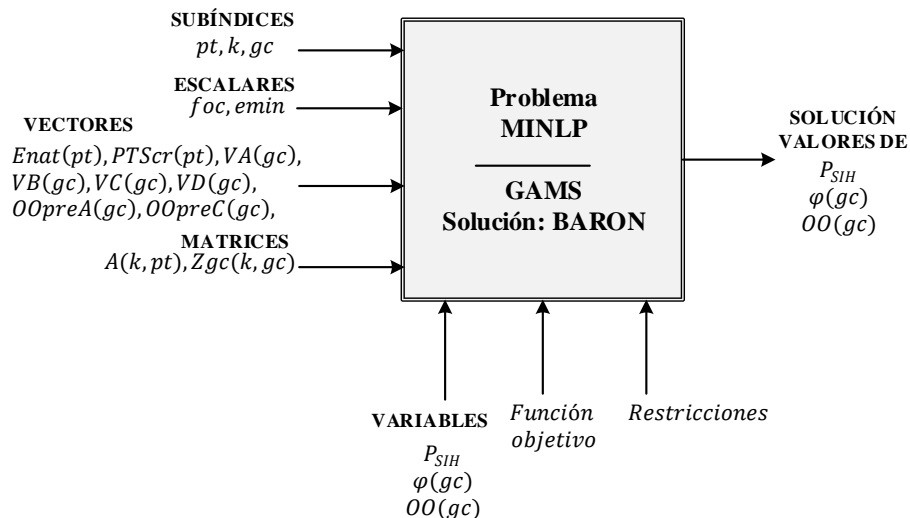


Tabla E.2. Descripción de las entradas del script de optimización desarrollado en GAMS.

Elemento	Tipo	Descripción
$pt$	Subíndice	Puntos que representan la superficie de trabajo $\rightarrow [1, \dots, NP]$
$k$	Subíndice	Luminarias $\rightarrow [1, \dots, NK]$
$gc$	Subíndice	Grupos de control $[1, \dots, N_{gc}]$
$emin$	Escalar	Iluminancia mínima que se debe garantizar sobre la superficie de trabajo o sobre la sección crítica (conjunto de puntos críticos). Puede ser 400 lux (Según RETILAP).
$foc$	Escalar	Factor de atenuación por ocupación, que tiene en cuenta la obstrucción de las personas sobre la iluminancia natural interior estimada sobre la superficie de trabajo.
$Enat(pt)$	Vector	Vector de iluminancia natural sobre la superficie de trabajo.
$PTScr(pt)$	Vector	Vector de 1 y 0 que clasifica los puntos de la superficie de trabajo; donde 1 o 0 indican si es o no un punto crítico.
$VA(gc)$	Vector	Vector de 1 y 0 que relaciona los grupos de control aplican la estrategia de control A; donde 1 o 0 indican la aplicación o no de la estrategia de control A en el grupo de control, respectivamente.
$VB(gc)$	Vector	Vector de 1 y 0 que relaciona los grupos de control aplican la estrategia de control B; donde 1 o 0 indican la aplicación o no de la estrategia de control A en el grupo de control, respectivamente.
$VC(gc)$	Vector	Vector de 1 y 0 que relaciona los grupos de control aplican la estrategia de control C; donde 1 o 0 indican la aplicación o no de la estrategia de control A en el grupo de control, respectivamente.
$VD(gc)$	Vector	Vector de 1 y 0 que relaciona los grupos de control aplican la estrategia de control D; donde 1 o 0 indican la aplicación o no de la estrategia de control A en el grupo de control, respectivamente.
$OOpreA(gc)$	Vector	Vector de 1 y 0 que relaciona el estado de operación anterior (On/Off) de los grupos de control con estrategia de control A; donde 1 o 0 indican el encendido o apagado, respectivamente.
$OOpreC(gc)$	Vector	Vector de 1 y 0 que relaciona el estado de operación anterior (On/Off) de los grupos de control con estrategia de control C; donde 1 o 0 indican el encendido o apagado, respectivamente.
$A(k, pt)$	Matriz	Matriz de aportes de iluminancias de cada luminaria $k$ sobre cada punto $pt$ de la superficie de trabajo. Se calculan con la expresión $f_x \cdot Elx(r_k) + f_y \cdot Ely(r_k)$
$Zgc(k, gc)$	Matriz	Matriz de 1 y 0 que relaciona la pertenencia de las luminarias a los grupos de control; donde 1 o 0 indican la pertenencia o no de la luminaria $k$ al grupo de control $gc$ , respectivamente.

### E.3 Integración de MATLAB y GAMS

Con el fin de estimar el consumo diario de energía eléctrica para una alternativa de control específica, se debe determinar la potencia consumida por el SIH para cada uno de los instantes de tiempo  $t_i$  de  $N_t = N_{ht}/\Delta_t$ . Si se considera un paso de tiempo de  $\Delta_t=15$  minutos, entonces se deben analizar 64 instantes de tiempo entre 6 a.m. y 10 p.m. ( $N_{ht} = 16$  horas de servicio). No obstante, este número puede ser significativamente menor (e.g. <40) debido al régimen de ocupación del recinto, puesto que no hay consumo de energía cuando no hay ocupación.

Ahora bien, la determinación del consumo energético anual de todas las alternativas de control implica la solución de  $N_{\#opt}$  número de variantes del problema de minimización de la potencia consumida, que puede ser calculado por la expresión (E.1), donde  $N_{SIH}$  es el número de alternativas de control,  $Ntd$  es el número total de tipo de día y  $Nt$  es el número de intervalos de tiempo a ser analizados (cuando hay ocupación e iluminación natural).

$$N_{\#opt} = N_{SIH} \cdot Ntd \cdot Nt \quad (E.1)$$

Si se considera un espacio de 4 luminarias ( $N_{SIH} = 756$ ), 9 tipos de día y 30 intervalos de tiempo, se tiene que en GAMS deben ser resueltas 204.120 variantes del problema de optimización.

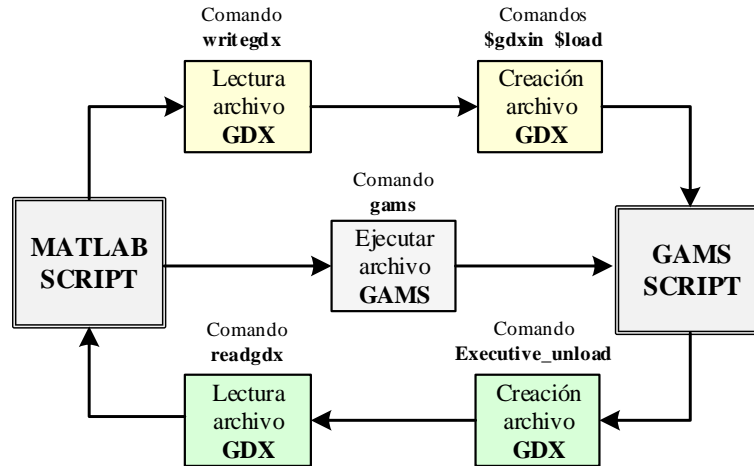
Tal uso intensivo de GAMS requirió su ejecución de forma automática desde MATLAB. Esta integración es una opción potente para el análisis de problemas de ingeniería que demanden procesos intensivos de optimización. Se recomienda que la integración sea llevada a cabo con versiones 24.x.x de GAMS y 2016 MATLAB o más recientes; específicamente, se debe realizar la instalación de GAMS en modo avanzado (*Use advanced installation mode*). Se hace notar que realizar la integración con versiones anteriores de GAMS (23.x.x) implica una mayor complejidad e inclusive en algunos casos no es posible lograrla.

Cada ejecución de GAMS desde MATLAB permite la obtención de los valores de la potencia consumida, el estado de operación de los grupos de control y el porcentaje de flujo luminoso de operación de las luminarias por grupo de control. Para el propósito de este estudio solo se hace uso de la potencia consumida.

Las acciones de comunicación que pueden darse entre MATLAB y GAMS son: crear de un archivo GDX, leer de un archivo GDX y ejecutar un archivo GAMS. La Figura E.2 muestra la dinámica de comunicación entre MATLAB y GAMS, específicamente, las acciones y los comandos requeridos. Con base en la experiencia de la integración de estos software, se hace resalta que la parte más sensible de la

comunicación es la creación del archivo GDX en MATLAB que suministra los datos de entrada a GAMS.

Figura E.2. Descripción de la comunicación MATLAB-GAMS.



Las tablas E.3 y E.4 describen los comandos empleados en MATLAB y GAMS para lograr su interacción.

Tabla E.3. Descripción de comandos empleados en MATLAB.

Comando /Utilidad	Estructura
<b>writegd x:</b> Permite la creación de un archivo GDX con los datos de entrada que requiere el modelo creado en GAMS.	writegd x('A','B1','B2',B3,'C1','C2',C3,...); <b>A:</b> Nombre del archivo GDX creado en MATLAB <b>B1:</b> Tipo o naturaleza de la entrada B <b>B2:</b> Nombre o etiqueta con la que se reconocerá la entrada B en GAMS <b>B3:</b> Nombre o etiqueta dado a la entrada B en MATLAB <i>Ejemplo</i> → writegd x('DATA_Ejer_18pts.gdx','parameter','emin',emin,...);
<b>gams:</b> Permite ejecutar un archivo en GAMS desde MATLAB, donde el argumento A es el nombre del archivo	gams('A.gms'); <b>A:</b> Nombre del archivo GMS que se desea ejecutar <i>Ejemplo</i> → gams('Ejer_18pts.gms');
<b>readgdx:</b> Permite leer un archivo GDX en MATLAB el cual fue creado en GAMS. Es útil para obtener los valores de la solución (función objetivo y variables)	Pcons=readgdx('A.gdx','B','C',...); <b>A:</b> Nombre del archivo GDX <b>B:</b> Variable 1 de la cual se desea conocer su valor. <b>C:</b> Variable 2 de la cual se desea conocer su valor. <i>Ejemplo</i> → Pcons=readgdx('Sol_18pts.gdx','Pcons');

Tabla E.4. Descripción de comandos empleados en GAMS.

Comando /Utilidad	Estructura
<b>\$gdxin:</b> Permite la lectura de un archivo GDX creado en MATLAB, el cual contiene los datos de entrada del problema de optimización.	\$gdxin A <b>A:</b> Ruta y nombre de archivo GDX <i>Ejemplo</i> → \$gdxin D:\Proyecto\Optimización\DATA_Ejer_18pts.gdx

Comando /Utilidad	Estructura
<b>\$load:</b> Permite cargar un elemento (escalar, vector o matriz) contenido en un archivo GDX	\$load A=B <b>A:</b> Nombre o etiqueta del elemento asignado en el archivo GDX <b>B:</b> Nombre o etiqueta que se asigna al elemento para su trabajo en GAMS <i>Ejemplo</i> → \$load emin=emin
<b>Execute_unload:</b> Permite crear un archivo GDX con los valores de la solución del problema.	Execute_unload 'A',B,C,...; <b>A:</b> Nombre del archivo GDX que se crea <b>B:</b> Valor de variable <b>C:</b> Valor de variable <i>Ejemplo</i> → Execute_unload 'Sol_18pts.gdx',Pcons,OO,F;

Es importante indicar que se debe modificar la designación de los datos de entrada cuando son suministrados desde MATLAB con respecto al caso de suministro de directo en GAMS. En GAMS existen diversos comandos para la designación de los datos de entrada, tales como: SCALAR (para escalares), PARAMETER (para vectores) o TABLE (para matrices). No obstante, la inclusión de los escalares, vectores y matrices en el archivo GDX (creado en MATLAB) se realiza empleando solamente la etiqueta PARAMETER.

Por otro lado, la presentación de vectores y matrices implica la inclusión por escrito de la posición de sus elementos con respecto a la(s) dimensión(es) que los conforman, tal como se muestra la Tabla E.5. El escalar no requiere variación en su presentación.

Tabla E.5. Ejemplo de presentación de un vector y una matriz en MATLAB.

Tipo	Datos originales	Presentación para inclusión en archivo GDX en MATLAB
Vector	$v = \begin{bmatrix} 1 \\ 5 \\ 9 \end{bmatrix}$	$v = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 5 \\ 3 & 9 \end{bmatrix}$
Matriz	$M = \begin{bmatrix} 9 & 13 \\ 3 & 24 \end{bmatrix}$	$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 9 \\ 1 & 2 & 13 \\ 2 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 24 \end{bmatrix}$

# Anexo F. Aplicación de la cuantificación de componentes del SIH

---

En este anexo se presenta la aplicación de las expresiones planteadas en la sección 5.3 del capítulo 5 para cuantificar los componentes del SIH para dos diferentes casos que presentan distintas alternativas de control a implementar partiendo de dos escenarios, cada uno con dos versiones a y b: i) Un sistema de iluminación eléctrico existente según RETILAP, ii) Un SIH que se desee modernizar o mejorar. Las tablas F.1 y F.2 muestran los cálculos realizados para obtener las cinco cantidades asociadas a cada uno de los componentes: existentes ( $N_{ex}$ ), requeridas ( $N_{rq}$ ), adicionales ( $\Delta N$ ), no reusadas ( $N_{nr}$ ) y reusadas ( $N_{ru}$ ).

## F.1 Consideraciones sobre la cuantificación

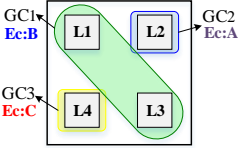
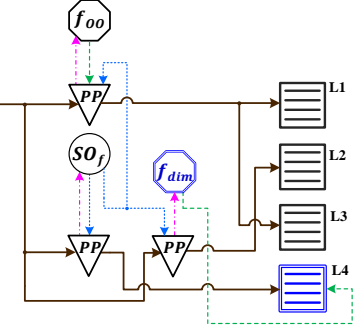
- El SO con fotocelda incluida de la estrategia A predomina sobre los demás SO de las otras estrategias de control que componen la alternativa de control del SIH. Dado que aun cuando haya un sensor de ocupación existente este no puede ser utilizado ya que la alternativa de control a implementar contiene la estrategia de control A que requiere un sensor de ocupación con foto celda incluida.
- Se podrá usar la controladora existente siempre y cuando su tecnología sea compatible con el resto de elementos que se deben adquirir como adicionales, y que además ésta tenga el número de entradas y salidas mínimas requeridas.

- En los ejemplos de aplicación de este anexo y en general se debe cumplir las condiciones (F.1) y (F.2).

$$N_{ru} + \Delta N = N_{rq} \quad (\text{F.1})$$

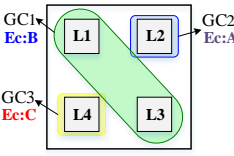
$$N_{ru} + N_{nr} = N_{ex} \quad (\text{F.2})$$

Tabla F.1. Cuantificación de los componentes de un SIH a partir de la alternativa de control del caso I

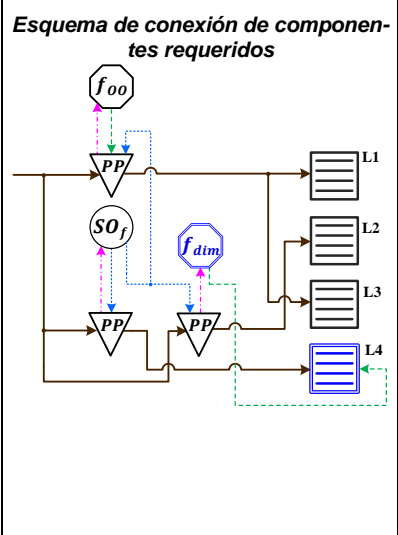
Alternativa de control a implementar- CASO I	Escenario	Cantidad componentes requeridos ( $N_{rq}$ )	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario i.a			$N_{rq}$	$N_{ex}$	$N_{ru}$	$\Delta N$	$N_{nr}$					
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec:B</b> → SO, foo, Loo  <b>Ec:A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec:C</b> → SO, fd y Ld                      Area=20 m<sup>2</sup>                      Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{foo_{rq}} \cdot 10 + N_{fd_{rq}} \cdot 30</math></p>	<b>Sistema de iluminación eléctrica existente</b>	$N_{SO_{rq}} = \max\left(N_{gc_A}, \left\lceil \frac{A+60}{60} \right\rceil^{74}\right)$ Este sensor es con fotocelda incluida	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{SO_{rq} 1} \\ &- N_{SO_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right.$	$N_{SO_{rq}}$	1	$N_{SO_{ex}}$	0	$N_{SO_{ru}}$	0	$\Delta N_{SO}$	1	$N_{SO_{nr}}$	0
		$Np_{SO_{rq}} = \max\left(1, N_{gc_A 1}\right)$	$Np_{SO_{ru}} = N_{foo_{ex} 0} \left\{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= Np_{SO_{rq} 1} \\ &- Np_{SO_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 0}$	$Np_{SO_{nr}} = 0 \left\{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \right.$	$Np_{SO_{rq}}$	1	$Np_{SO_{ex}}$	0	$Np_{SO_{ru}}$	0	$\Delta Np_{SO}$	1	$Np_{SO_{nr}}$	0
		$N_{foo_{rq}} = N_{gc_B 1}$	$N_{foo_{ru}} = N_{foo_{ex} 0} \left\{ N_{foo_{rq} 1} \geq N_{foo_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{foo_{rq} 1} \\ &- N_{foo_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{foo} = N_{foo_{rq} 1} - N_{foo_{ru} 0}$	$N_{foo_{nr}} = 0 \left\{ N_{foo_{rq} 1} \geq N_{foo_{ex} 0} \right.$	$N_{foo_{rq}}$	1	$N_{foo_{ex}}$	0	$N_{foo_{ru}}$	0	$\Delta N_{foo}$	1	$N_{foo_{nr}}$	0
		$Np_{foo_{rq}} = N_{foo_{rq}}$	$Np_{foo_{ru}} = Np_{foo_{ex} 0} \left\{ Np_{foo_{rq} 1} \geq Np_{foo_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= Np_{foo_{rq} 1} \\ &- Np_{foo_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta Np_{foo} = Np_{foo_{rq} 1} - Np_{foo_{ru} 0}$	$Np_{foo_{nr}} = 0 \left\{ Np_{foo_{rq} 1} \geq Np_{foo_{ex} 0} \right.$	$Np_{foo_{rq}}$	1	$Np_{foo_{ex}}$	0	$Np_{foo_{ru}}$	0	$\Delta Np_{foo}$	1	$Np_{foo_{nr}}$	0
		$N_{fd_{rq}} = N_{gc_C 1} + N_{gc_D 0}$	$N_{fd_{ru}} = N_{fd_{ex} 0} \left\{ N_{fd_{rq} 1} \geq N_{fd_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{fd_{rq} 1} \\ &- N_{fd_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{fd} = N_{fd_{rq} 1} - N_{fd_{ru} 0}$	$N_{fd_{nr}} = 0 \left\{ N_{fd_{rq} 1} \geq N_{fd_{ex} 0} \right.$	$N_{fd_{rq}}$	1	$N_{fd_{ex}}$	0	$N_{fd_{ru}}$	0	$\Delta N_{fd}$	1	$N_{fd_{nr}}$	0
		$Np_{fd_{rq}} = \max\left\{ \frac{1}{120} \cdot carga_{i 80} - (Np_{SO_{rq}} + Np_{foo_{rq}}) \right\}^{75}$	$Np_{fd_{ru}} = Np_{fd_{ex} 0} \left\{ Np_{fd_{rq} 1} \geq Np_{fd_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= Np_{fd_{rq} 1} \\ &- Np_{fd_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta Np_{fd} = Np_{fd_{rq} 1} - Np_{fd_{ru} 0}$	$Np_{fd_{nr}} = 0 \left\{ Np_{fd_{rq} 1} \geq Np_{fd_{ex} 0} \right.$	$Np_{fd_{rq}}$	1	$Np_{fd_{ex}}$	0	$Np_{fd_{ru}}$	0	$\Delta Np_{fd}$	1	$Np_{fd_{nr}}$	0
<b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b> 	i.a: Cuatro luminarias On/Off y un interruptor manual	$N_{CTRL_{rq}} = 0$ (No hay estrategia de control D)	$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 0} \left\{ N_{CTRL_{rq} 0} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{CTRL_{rq} 0} \\ &- N_{CTRL_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 0} - N_{CTRL_{ru} 0}$	$N_{CTRL_{nr}} = 0 \left\{ N_{CTRL_{rq} 0} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \right.$	$N_{CTRL_{rq}}$	0	$N_{CTRL_{ex}}$	0	$N_{CTRL_{ru}}$	0	$\Delta N_{CTRL}$	0	$N_{CTRL_{nr}}$	0
		$N_{Ctor_{rq}} = N_{gc_D 0}$	$N_{Ctor_{ru}} = N_{Ctor_{ex} 0} \left\{ N_{Ctor_{rq} 0} \geq N_{Ctor_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{Ctor_{rq} 0} \\ &- N_{Ctor_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{Ctor} = N_{Ctor_{rq} 0} - N_{Ctor_{ru} 0}$	$N_{Ctor_{nr}} = 0 \left\{ N_{Ctor_{rq} 0} \geq N_{Ctor_{ex} 0} \right.$	$N_{Ctor_{rq}}$	0	$N_{Ctor_{ex}}$	0	$N_{Ctor_{ru}}$	0	$\Delta N_{Ctor}$	0	$N_{Ctor_{nr}}$	0
		$N_{Loo_{rq}} = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} N_{lum_{oo_{gi}}}$ $= N_{lum_{oo_{g1}} _2 + N_{lum_{oo_{g2}} _1 + N_{lum_{oo_{g3}} _0}$	$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 3} \left\{ N_{Loo_{rq} 3} < N_{Loo_{ex} 4} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{Loo_{rq} 3} \\ &- N_{Loo_{ru} 3} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 3} - N_{Loo_{ru} 3}$	$N_{Loo_{nr}} = N_{Loo_{ex} 4} - N_{Loo_{rq} 3}$ $\left\{ N_{Loo_{rq} 3} < N_{Loo_{ex} 4} \right.$	$N_{Loo_{rq}}$	3	$N_{Loo_{ex}}$	4	$N_{Loo_{ru}}$	3	$\Delta N_{Loo}$	0	$N_{Loo_{nr}}$	1
		$N_{Ld_{rq}} = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} N_{lum_{dim_{gi}}}$ $= N_{lum_{dim_{g1}} _0 + N_{lum_{dim_{g2}} _0 + N_{lum_{dim_{g3}} _1}$	$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{ex} 0} \left\{ N_{Ld_{rq} 1} \geq N_{Ld_{ex} 0} \right.$ $\left. \begin{aligned} &= N_{Ld_{rq} 1} \\ &- N_{Ld_{ru} 0} \end{aligned} \right.$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 1} - N_{Ld_{ru} 0}$	$N_{Ld_{nr}} = 0 \left\{ N_{Ld_{rq} 1} \geq N_{Ld_{ex} 0} \right.$	$N_{Ld_{rq}}$	1	$N_{Ld_{ex}}$	0	$N_{Ld_{ru}}$	0	$\Delta N_{Ld}$	1	$N_{Ld_{nr}}$	0
<b>TOTAL</b>					<b><math>N_{rq}</math></b>	<b>10</b>	<b><math>N_{ex}</math></b>	<b>4</b>	<b><math>N_{ru}</math></b>	<b>3</b>	<b><math>\Delta N</math></b>	<b>7</b>	<b><math>N_{nr}</math></b>	<b>1</b>	

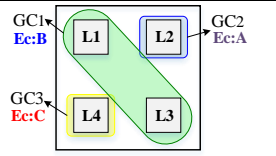
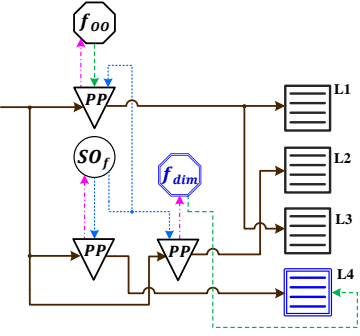
<sup>74</sup>  $\lceil n \rceil$  denota el mayor número entero contenido en n. Si  $n = 1,33$  entonces  $\lceil n \rceil = 1$ .

<sup>75</sup>  $\lfloor n \rfloor$  denota aproximación hacia infinito. Si  $n = -1,33$ , entonces  $\lfloor -1,33 \rfloor = -1$

Alternativa de control a implementar- CASO I	Escenario	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario i.b			$N_{rq}$	$N_{ex}$	$N_{ru}$	$\Delta N$	$N_{nr}$	
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec: B</b> → SO, foo, Loo  <b>Ec: A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec: C</b> → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup></p> <p>Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{foo_{rq}} \cdot 10 + N_{fd_{rq}} \cdot 30</math></p>	<p><b>Sistema de iluminación eléctrico existente</b></p>	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{SO_{rq}}$	1 $N_{SO_{ex}}$ 0	$N_{SO_{ru}}$ 0	$\Delta N_{SO}$ 1	$N_{SO_{nr}}$ 0	
		$Np_{SO_{ru}} = Np_{SO_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 0}$	$Np_{SO_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$Np_{SO_{rq}}$	1 $Np_{SO_{ex}}$ 0	$Np_{SO_{ru}}$ 0	$\Delta Np_{SO}$ 1	$Np_{SO_{nr}}$ 0	
		$N_{foo_{ru}} = N_{foo_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} N_{foo_{rq} 1} \geq N_{foo_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{foo} = N_{foo_{rq} 1} - N_{foo_{ru} 0}$	$N_{foo_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} N_{foo_{rq} 1} \geq N_{foo_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{foo_{rq}}$	1 $N_{foo_{ex}}$ 0	$N_{foo_{ru}}$ 0	$\Delta N_{foo}$ 1	$N_{foo_{nr}}$ 0	
		$Np_{foo_{ru}} = Np_{foo_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} Np_{foo_{rq} 1} \geq Np_{foo_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta Np_{foo} = Np_{foo_{rq} 1} - Np_{foo_{ru} 0}$	$Np_{foo_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} Np_{foo_{rq} 1} \geq Np_{foo_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$Np_{foo_{rq}}$	1 $Np_{foo_{ex}}$ 0	$Np_{foo_{ru}}$ 0	$\Delta Np_{foo}$ 1	$Np_{foo_{nr}}$ 0	
		$N_{fd_{ru}} = N_{fd_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} N_{fd_{rq} 1} \geq N_{fd_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{fd} = N_{fd_{rq} 1} - N_{fd_{ru} 0}$	$N_{fd_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} N_{fd_{rq} 1} \geq N_{fd_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{fd_{rq}}$	1 $N_{fd_{ex}}$ 0	$N_{fd_{ru}}$ 0	$\Delta N_{fd}$ 1	$N_{fd_{nr}}$ 0	
		$Np_{fd_{ru}} = Np_{fd_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} Np_{fd_{rq} 1} \geq Np_{fd_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta Np_{fd} = Np_{fd_{rq} 1} - Np_{fd_{ru} 0}$	$Np_{fd_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} Np_{fd_{rq} 1} \geq Np_{fd_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$Np_{fd_{rq}}$	1 $Np_{fd_{ex}}$ 0	$Np_{fd_{ru}}$ 0	$\Delta Np_{fd}$ 1	$Np_{fd_{nr}}$ 0	
		$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} N_{CTRL_{rq} 0} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 0} - N_{CTRL_{ru} 0}$	$N_{CTRL_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} N_{CTRL_{rq} 0} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{CTRL_{rq}}$	0 $N_{CTRL_{ex}}$ 0	$N_{CTRL_{ru}}$ 0	$\Delta N_{CTRL}$ 0	$N_{CTRL_{nr}}$ 0	
		$N_{Ctor_{ru}} = N_{Ctor_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} N_{Ctor_{rq} 0} \geq N_{Ctor_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{Ctor} = N_{Ctor_{rq} 0} - N_{Ctor_{ru} 0}$	$N_{Ctor_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} N_{Ctor_{rq} 0} \geq N_{Ctor_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{Ctor_{rq}}$	0 $N_{Ctor_{ex}}$ 0	$N_{Ctor_{ru}}$ 0	$\Delta N_{Ctor}$ 0	$N_{Ctor_{nr}}$ 0	
		$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 0} \left\{ \begin{matrix} N_{Loo_{rq} 3} \geq N_{Loo_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 3} - N_{Loo_{ru} 0}$	$N_{Loo_{nr}} = 0 \left\{ \begin{matrix} N_{Loo_{rq} 3} \geq N_{Loo_{ex} 0} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{Loo_{rq}}$	3 $N_{Loo_{ex}}$ 0	$N_{Loo_{ru}}$ 0	$\Delta N_{Loo}$ 3	$N_{Loo_{nr}}$ 0	
		$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{rq} 1} \left\{ \begin{matrix} N_{Ld_{rq} 1} < N_{Ld_{ex} 4} \\ \end{matrix} \right.$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 1} - N_{Ld_{ru} 1}$	$N_{Ld_{nr}} = N_{Ld_{ex} 4} - N_{Ld_{rq} 1}$ $\left\{ \begin{matrix} N_{Ld_{rq} 1} < N_{Ld_{ex} 4} \\ \end{matrix} \right.$	$N_{Ld_{rq}}$	1 $N_{Ld_{ex}}$ 4	$N_{Ld_{ru}}$ 1	$\Delta N_{Ld}$ 0	$N_{Ld_{nr}}$ 3	
					<b>TOTAL</b>	$N_{rq}$ <b>10</b>	$N_{ex}$ <b>4</b>	$N_{ru}$ <b>1</b>	$\Delta N$ <b>9</b>	$N_{nr}$ <b>3</b>

i.b: Cuatro luminarias dimerizables y un dimmer manual



Alternativa de control a implementar- CASO I	Escenario	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario ii.a			$N_{rq}$	$N_{ex}$			$N_{ru}$	$\Delta N$			$N_{nr}$		
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec:B</b> → SO, foo, Loo  <b>Ec:A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec:C</b> → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup>                      Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{f_{oo_{rq}}} \cdot 10 + N_{f_{d_{rq}}} \cdot 30</math></p> <p><b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b></p>  <p>El sensor de ocupación debe incluir fotocelda (<math>SO_f</math>), debido a la presencia de la estrategia de control A.                      El power pack del sensor de ocupación debe tener la capacidad de recibir y gestionar la señal de control proveniente de la fotocelda del <math>SO_f</math>.</p>	<p><b>SIH a modernizar o mejorar</b></p> <p>ii.a: Un solo grupo de control y la <b>estrategia de control C</b> con los siguientes componentes instalados:</p> <p><math>N_{SO} = 1</math>  <math>Np_{SO} = 1</math>  <math>N_{fd} = 1</math>  <math>Np_{fd} = 1</math>  <math>N_{Ld} = 4</math></p>	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \}$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \}$	$N_{SO_{rq}}$	1	$N_{SO_{ex}}$	0*	$N_{SO_{ru}}$	0	$\Delta N_{SO}$	1	$N_{SO_{nr}}$	0	
		$Np_{SO_{ru}} = Np_{SO_{ex} 1} \{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 1} \}$	$\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 1}$	$Np_{SO_{nr}} = 0 \{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 1} \}$	$Np_{SO_{rq}}$	1	$Np_{SO_{ex}}$	1	$Np_{SO_{ru}}$	1	$\Delta Np_{SO}$	0	$Np_{SO_{nr}}$	0	
		$N_{f_{oo_{ru}}} = N_{f_{oo_{ex} 0}} \{ N_{f_{oo_{rq} 1} \geq N_{f_{oo_{ex} 0}} \}$	$\Delta N_{f_{oo}} = N_{f_{oo_{rq} 1} - N_{f_{oo_{ru} 0}}$	$N_{f_{oo_{nr}}} = 0 \{ N_{f_{oo_{rq} 1} \geq N_{f_{oo_{ex} 0}} \}$	$N_{f_{oo_{rq}}$	1	$N_{f_{oo_{ex}}$	0	$N_{f_{oo_{ru}}$	0	$\Delta N_{f_{oo}}$	1	$N_{f_{oo_{nr}}$	0	
		$Np_{f_{oo_{ru}}} = Np_{f_{oo_{ex} 0}} \{ Np_{f_{oo_{rq} 1} \geq Np_{f_{oo_{ex} 0}} \}$	$\Delta Np_{f_{oo}} = Np_{f_{oo_{rq} 1} - Np_{f_{oo_{ru} 0}}$	$Np_{f_{oo_{nr}}} = 0 \{ Np_{f_{oo_{rq} 1} \geq Np_{f_{oo_{ex} 0}} \}$	$Np_{f_{oo_{rq}}$	1	$Np_{f_{oo_{ex}}$	0	$Np_{f_{oo_{ru}}$	0	$\Delta Np_{f_{oo}}$	1	$Np_{f_{oo_{nr}}$	0	
		$N_{f_{d_{ru}}} = N_{f_{d_{ex} 1}} \{ N_{f_{d_{rq} 1} \geq N_{f_{d_{ex} 1}} \}$	$\Delta N_{fd} = N_{f_{d_{rq} 1} - N_{f_{d_{ru} 1}}$	$N_{f_{d_{nr}}} = 0 \{ N_{f_{d_{rq} 1} \geq N_{f_{d_{ex} 1}} \}$	$N_{f_{d_{rq}}$	1	$N_{f_{d_{ex}}$	1	$N_{f_{d_{ru}}$	1	$\Delta N_{fd}$	0	$N_{f_{d_{nr}}$	0	
		$Np_{f_{d_{ru}}} = Np_{f_{d_{ex} 1}} \{ Np_{f_{d_{rq} 1} \geq Np_{f_{d_{ex} 1}} \}$	$\Delta Np_{fd} = Np_{f_{d_{rq} 1} - Np_{f_{d_{ru} 1}}$	$Np_{f_{d_{nr}}} = 0 \{ Np_{f_{d_{rq} 1} \geq Np_{f_{d_{ex} 1}} \}$	$Np_{f_{d_{rq}}$	1	$Np_{f_{d_{ex}}$	1	$Np_{f_{d_{ru}}$	1	$\Delta Np_{fd}$	0	$Np_{f_{d_{nr}}$	0	
		$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 0} \{ N_{CTRL_{rq} 0} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \}$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 0} - N_{CTRL_{ru} 0}$	$N_{CTRL_{nr}} = 0 \{ N_{CTRL_{rq} 0} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \}$	$N_{CTRL_{rq}}$	0	$N_{CTRL_{ex}}$	0	$N_{CTRL_{ru}}$	0	$\Delta N_{CTRL}$		$N_{CTRL_{nr}}$	0	
		$N_{Ctor_{ru}} = N_{Ctor_{ex} 0} \{ N_{Ctor_{rq} 0} \geq N_{Ctor_{ex} 0} \}$	$\Delta N_{Ctor} = N_{Ctor_{rq} 0} - N_{Ctor_{ru} 0}$	$N_{Ctor_{nr}} = 0 \{ N_{Ctor_{rq} 0} \geq N_{Ctor_{ex} 0} \}$	$N_{Ctor_{rq}}$	0	$N_{Ctor_{ex}}$	0	$N_{Ctor_{ru}}$	0	$\Delta N_{Ctor}$	0	$N_{Ctor_{nr}}$	0	
		$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 0} \{ N_{Loo_{rq} 3} \geq N_{Loo_{ex} 0} \}$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 3} - N_{Loo_{ru} 0}$	$N_{Loo_{nr}} = 0 \{ N_{Loo_{rq} 3} \geq N_{Loo_{ex} 0} \}$	$N_{Loo_{rq}}$	3	$N_{Loo_{ex}}$	0	$N_{Loo_{ru}}$	0	$\Delta N_{Loo}$	3	$N_{Loo_{nr}}$	0	
		$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{rq} 1} \{ N_{Ld_{rq} 1} < N_{Ld_{ex} 4} \}$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 1} - N_{Ld_{ru} 1}$	$N_{Ld_{nr}} = N_{Ld_{ex} 4} - N_{Ld_{rq} 1} \{ N_{Ld_{rq} 1} < N_{Ld_{ex} 4} \}$	$N_{Ld_{rq}}$	1	$N_{Ld_{ex}}$	4	$N_{Ld_{ru}}$	1	$\Delta N_{Ld}$	0	$N_{Ld_{nr}}$	3	
<b>TOTAL</b>			<b><math>N_{rq}</math></b>	<b>10</b>	<b><math>N_{ex}</math></b>	<b>7</b>	<b><math>N_{ru}</math></b>	<b>4</b>	<b><math>\Delta N</math></b>	<b>6</b>	<b><math>N_{nr}</math></b>	<b>3</b>			

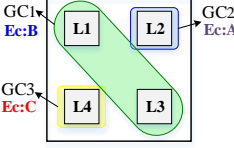
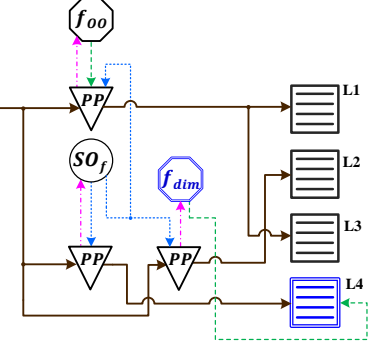
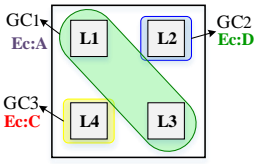
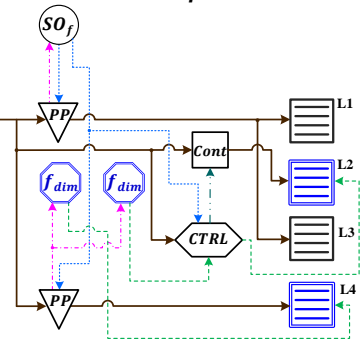
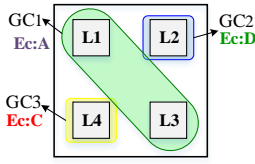
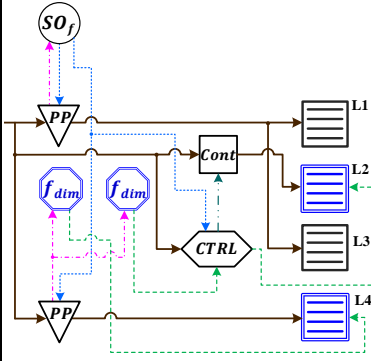
Alternativa de control a implementar- CASO I	Escenario	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario ii.a			$N_{rq}$	$N_{ex}$	$N_{ru}$	$\Delta N$	$N_{nr}$			
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec:B</b> → SO, foo, Loo  <b>Ec:A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec:C</b> → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup></p> <p>Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{foo_{rq}} \cdot 10 + N_{fd_{rq}} \cdot 30</math></p>	<b>SIH a modernizar o mejorar</b>	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex}0} \{ N_{SO_{rq}1} \geq N_{SO_{ex}0} \}$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq}1} - N_{SO_{ru}0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \{ N_{SO_{rq}1} \geq N_{SO_{ex}0} \}$	$N_{SO_{rq}}$	1	$N_{SO_{ex}}$ 0*	$N_{SO_{ru}}$ 0	$\Delta N_{SO}$ 1	$N_{SO_{nr}}$ 0		
	ii.b: Dos grupos de control distribuidos así: GC1 (L1 y 2)	$Np_{SO_{ru}} = Np_{SO_{ex}1} \{ Np_{SO_{rq}1} \geq Np_{SO_{ex}1} \}$	$\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq}1} - Np_{SO_{ru}1}$	$Np_{SO_{nr}} = 0 \{ Np_{SO_{rq}1} \geq Np_{SO_{ex}1} \}$	$Np_{SO_{rq}}$	1	$Np_{SO_{ex}}$ 1	$Np_{SO_{ru}}$ 1	$\Delta Np_{SO}$ 0	$Np_{SO_{nr}}$ 0		
<p><b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b></p>  <p>*El sensor de ocupación debe incluir fotocelda (<math>SO_f</math>), debido a la presencia de la estrategia de control A. El power pack del sensor de ocupación debe tener la capacidad de recibir y gestionar la señal de control proveniente de la fotocelda del <math>SO_f</math>.</p>	estrategia de control B GC2 (L3 y 4)	$N_{fd_{ru}} = N_{fd_{ex}1} \{ N_{fd_{rq}1} \geq N_{fd_{ex}1} \}$	$\Delta N_{fd} = N_{fd_{rq}1} - N_{fd_{ru}1}$	$N_{fd_{nr}} = 0 \{ N_{fd_{rq}1} \geq N_{fd_{ex}1} \}$	$N_{fd_{rq}}$	1	$N_{fd_{ex}}$ 1	$N_{fd_{ru}}$ 1	$\Delta N_{fd}$ 0	$N_{fd_{nr}}$ 0		
	estrategia de control D	$Np_{fd_{ru}} = Np_{fd_{ex}1} \{ Np_{fd_{rq}1} \geq Np_{fd_{ex}1} \}$	$\Delta Np_{fd} = Np_{fd_{rq}1} - Np_{fd_{ru}1}$	$Np_{fd_{nr}} = 0 \{ Np_{fd_{rq}1} \geq Np_{fd_{ex}1} \}$	$Np_{fd_{rq}}$	1	$Np_{fd_{ex}}$ 1	$Np_{fd_{ru}}$ 1	$\Delta Np_{fd}$ 0	$Np_{fd_{nr}}$ 0		
	$N_{SO}=1$ $Np_{SO}=1$ $N_{foo}=1$ $Np_{foo}=1$ $N_{fd}=1$ $N_{CTRL}=1$ $N_{ctor}=1$ $N_{Ld}=2$ $N_{Loo}=2$	$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{rq}0} \{ N_{CTRL_{rq}0} < N_{CTRL_{ex}1} \}$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq}0} - N_{CTRL_{ru}0}$	$N_{CTRL_{nr}} = N_{CTRL_{ex}1} - N_{CTRL_{rq}0} \{ N_{CTRL_{rq}0} < N_{CTRL_{ex}1} \}$	$N_{CTRL_{rq}}$	0	$N_{CTRL_{ex}}$ 1	$N_{CTRL_{ru}}$ 0	$\Delta N_{CTRL}$ 0	$N_{CTRL_{nr}}$ 1		
	$N_{ctor_{ru}} = N_{ctor_{rq}0} \{ N_{ctor_{rq}0} < N_{ctor_{ex}1} \}$	$\Delta N_{ctor} = N_{ctor_{rq}0} - N_{ctor_{ru}0}$	$N_{ctor_{nr}} = N_{ctor_{ex}1} - N_{ctor_{rq}0} \{ N_{ctor_{rq}0} < N_{ctor_{ex}1} \}$	$N_{ctor_{rq}}$	0	$N_{ctor_{ex}}$ 1	$N_{ctor_{ru}}$ 0	$\Delta N_{ctor}$ 0	$N_{ctor_{nr}}$ 1			
	$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex}2} \{ N_{Loo_{rq}3} \geq N_{Loo_{ex}2} \}$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq}3} - N_{Loo_{ru}2}$	$N_{Loo_{nr}} = 0 \{ N_{Loo_{rq}3} \geq N_{Loo_{ex}2} \}$	$N_{Loo_{rq}}$	3	$N_{Loo_{ex}}$ 2	$N_{Loo_{ru}}$ 2	$\Delta N_{Loo}$ 1	$N_{Loo_{nr}}$ 0			
	$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{rq}1} \{ N_{Ld_{rq}1} < N_{Ld_{ex}2} \}$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq}1} - N_{Ld_{ru}1}$	$N_{Ld_{nr}} = N_{Ld_{ex}2} - N_{Ld_{rq}1} \{ N_{Ld_{rq}1} < N_{Ld_{ex}2} \}$	$N_{Ld_{rq}}$	1	$N_{Ld_{ex}}$ 2	$N_{Ld_{ru}}$ 1	$\Delta N_{Ld}$ 0	$N_{Ld_{nr}}$ 1			
	<b>TOTAL</b>		$N_{rq}$	<b>10</b>	$N_{ex}$	<b>1</b>	$N_{ru}$	<b>8</b>	$\Delta N$	<b>2</b>	$N_{nr}$	<b>3</b>

Tabla F.2. Cuantificación de los componentes de un SIH a partir de la alternativa de control del caso II

Alternativa de control a implementar- CASO II	Escenario	Cantidad componentes requeridos ( $N_{rq}$ )	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario i.a				$N_{rq}$	$N_{ex}$	$N_{ru}$	$\Delta N$	$N_{nr}$				
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec:A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec:D</b> → SO, fd, ctor, CTRL y Ld  <b>Ec:C</b> → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup>                      Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{f_{oo_{rq}}} \cdot 10 + N_{f_{d_{rq}}} \cdot 30</math></p>	<b>Sistema de iluminación eléctrica existente</b>	$N_{SO_{rq}} = \max\left(N_{gcA}, \left\lceil \frac{A + 60}{60} \right\rceil 76\right)$ Este sensor es con fotocelda incluida	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right\}$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right\}$	$N_{SO_{rq}}$	1	$N_{SO_{ex}}$	0	$N_{SO_{ru}}$	0	$\Delta N_{SO}$	1	$N_{SO_{nr}}$	0
		$Np_{SO_{rq}} = \max(1, N_{gcA 1})$	$Np_{SO_{ru}} = Np_{SO_{ex} 0} \left\{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \right\}$	$\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 0}$	$Np_{SO_{nr}} = 0 \left\{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \right\}$	$Np_{SO_{rq}}$	1	$Np_{SO_{ex}}$	0	$Np_{SO_{ru}}$	0	$\Delta Np_{SO}$	1	$Np_{SO_{nr}}$	0
		$N_{f_{oo_{rq}}} = N_{gcB 0}$	$N_{f_{oo_{ru}}} = N_{f_{oo_{ex} 0}} \left\{ N_{f_{oo_{rq} 0}} \geq N_{f_{oo_{ex} 0}} \right\}$	$\Delta N_{f_{oo}} = N_{f_{oo_{rq} 0}} - N_{f_{oo_{ru} 0}}$	$N_{f_{oo_{nr}}} = 0 \left\{ N_{f_{oo_{rq} 0}} \geq N_{f_{oo_{ex} 0}} \right\}$	$N_{f_{oo_{rq}}}$	0	$N_{f_{oo_{ex}}}$	0	$N_{f_{oo_{ru}}}$	0	$\Delta N_{f_{oo}}$	0	$N_{f_{oo_{nr}}}$	0
		$Np_{f_{oo_{rq}}} = N_{f_{oo_{rq} 0}}$	$Np_{f_{oo_{ru}}} = Np_{f_{oo_{ex} 0}} \left\{ Np_{f_{oo_{rq} 0}} \geq Np_{f_{oo_{ex} 0}} \right\}$	$\Delta Np_{f_{oo}} = Np_{f_{oo_{rq} 0}} - Np_{f_{oo_{ru} 0}}$	$Np_{f_{oo_{nr}}} = 0 \left\{ Np_{f_{oo_{rq} 0}} \geq Np_{f_{oo_{ex} 0}} \right\}$	$Np_{f_{oo_{rq}}}$	0	$Np_{f_{oo_{ex}}}$	0	$Np_{f_{oo_{ru}}}$	0	$\Delta Np_{f_{oo}}$	0	$Np_{f_{oo_{nr}}}$	0
		$N_{f_{d_{rq}}} = N_{gcC 1} + N_{gcD 1}$	$N_{f_{d_{ru}}} = N_{f_{d_{ex} 0}} \left\{ N_{f_{d_{rq} 2}} \geq N_{f_{d_{ex} 0}} \right\}$	$\Delta N_{f_{d}} = N_{f_{d_{rq} 2}} - N_{f_{d_{ru} 0}}$	$N_{f_{d_{nr}}} = 0 \left\{ N_{f_{d_{rq} 2}} \geq N_{f_{d_{ex} 0}} \right\}$	$N_{f_{d_{rq}}}$	2	$N_{f_{d_{ex}}}$	0	$N_{f_{d_{ru}}}$	0	$\Delta N_{f_{d}}$	2	$N_{f_{d_{nr}}}$	0
		$Np_{f_{d_{rq}}} = \max\left\{ \frac{1}{120} \cdot carga_{a100} - (Np_{SO_{rq}} + Np_{f_{oo_{rq}}}) \right\} 77$	$Np_{f_{d_{ru}}} = Np_{f_{d_{ex} 0}} \left\{ Np_{f_{d_{rq} 1}} \geq Np_{f_{d_{ex} 0}} \right\}$	$\Delta Np_{f_{d}} = Np_{f_{d_{rq} 1}} - Np_{f_{d_{ru} 0}}$	$Np_{f_{d_{nr}}} = 0 \left\{ Np_{f_{d_{rq} 1}} \geq Np_{f_{d_{ex} 0}} \right\}$	$Np_{f_{d_{rq}}}$	1	$Np_{f_{d_{ex}}}$	0	$Np_{f_{d_{ru}}}$	0	$\Delta Np_{f_{d}}$	1	$Np_{f_{d_{nr}}}$	0
<b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b> 	i.a: Cuatro luminarias On/Off y un interruptor manual	$N_{CTRL_{rq}} = 1$ $\rightarrow N_{inputs} = 1 + N_{gcD 1} \quad N_{outputs} = 2 \cdot N_{gcD 1}$	$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 0} \left\{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \right\}$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 1} - N_{CTRL_{ru} 0}$	$N_{CTRL_{nr}} = 0 \left\{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \right\}$	$N_{CTRL_{rq}}$	1	$N_{CTRL_{ex}}$	0	$N_{CTRL_{ru}}$	0	$\Delta N_{CTRL}$	1	$N_{CTRL_{nr}}$	0
		$N_{ctor_{rq}} = N_{gcD 1}$	$N_{ctor_{ru}} = N_{ctor_{ex} 0} \left\{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 0} \right\}$	$\Delta N_{ctor} = N_{ctor_{rq} 1} - N_{ctor_{ru} 0}$	$N_{ctor_{nr}} = 0 \left\{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 0} \right\}$	$N_{ctor_{rq}}$	1	$N_{ctor_{ex}}$	0	$N_{ctor_{ru}}$	0	$\Delta N_{ctor}$	1	$N_{ctor_{nr}}$	0
		$N_{Loo_{rq}} = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} N_{lum_{oo_{gi}}}$ $= N_{lum_{oo_{g1} 2}} + N_{lum_{oo_{g2} 0}} + N_{lum_{oo_{g3} 0}}$	$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 2} \left\{ N_{Loo_{rq} 2} < N_{Loo_{ex} 4} \right\}$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 2} - N_{Loo_{ru} 2}$	$N_{Loo_{nr}} = N_{Loo_{ex} 4} - N_{Loo_{rq} 2}$ $\left\{ N_{Loo_{rq} 2} < N_{Loo_{ex} 4} \right\}$	$N_{Loo_{rq}}$	2	$N_{Loo_{ex}}$	4	$N_{Loo_{ru}}$	2	$\Delta N_{Loo}$	0	$N_{Loo_{nr}}$	2
		$N_{Ld_{rq}} = \sum_{gi=1}^{N_{gc}} N_{lum_{dim_{gi}}}$ $= N_{lum_{dim_{g1} 0}} + N_{lum_{dim_{g2} 1}} + N_{lum_{dim_{g3} 1}}$	$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{ex} 0} \left\{ N_{Ld_{rq} 2} \geq N_{Ld_{ex} 0} \right\}$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 2} - N_{Ld_{ru} 0}$	$N_{Ld_{nr}} = 0 \left\{ N_{Ld_{rq} 2} \geq N_{Ld_{ex} 0} \right\}$	$N_{Ld_{rq}}$	2	$N_{Ld_{ex}}$	0	$N_{Ld_{ru}}$	0	$\Delta N_{Ld}$	2	$N_{Ld_{nr}}$	0
<b>TOTAL</b>						$N_{rq}$	<b>11</b>	$N_{ex}$	<b>4</b>	$N_{ru}$	<b>2</b>	$\Delta N$	<b>9</b>	$N_{nr}$	<b>2</b>

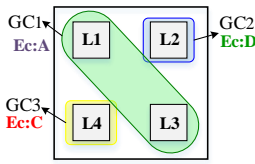
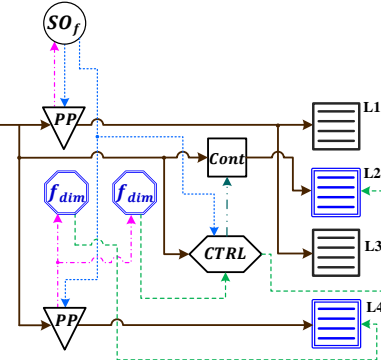
<sup>76</sup>  $\lceil n \rceil$  denota el mayor número entero contenido en  $n$ . Si  $n = 1,33$  entonces  $\lceil n \rceil = 1$ .

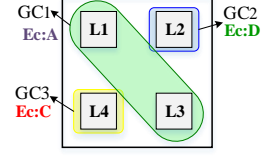
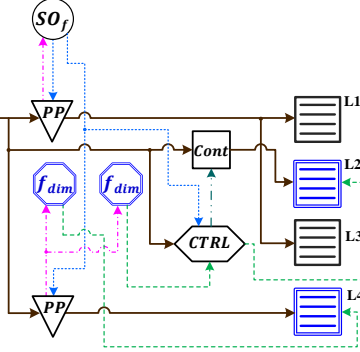
<sup>77</sup>  $\lfloor n \rfloor$  denota aproximación hacia infinito. Si  $n = -0,16$ , entonces  $\lfloor -0,16 \rfloor = 0$

Alternativa de control a implementar- CASO II	Escenario	Cantidad componentes requeridos ( $N_{rq}$ )	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario i.a			$N_{rq}$	$N_{ex}$	$N_{ru}$	$\Delta N$	$N_{nr}$					
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec:A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec:D</b> → SO, fd, ctor, CTRL y Ld  <b>Ec:C</b> → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup>                      Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{foo_{rq}} \cdot 10 + N_{fd_{rq}} \cdot 30</math></p>	<b>Sistema de iluminación eléctrico existente</b>	$N_{SO_{rq}} = \max \left( Ngc_A, \left\lceil \frac{A + 60}{60} \right\rceil 78 \right)$ Este sensor es con fotocelda incluida	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right.$ $= N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right.$	$N_{SO_{rq}}$	1	$N_{SO_{ex}}$	0	$N_{SO_{ru}}$	0	$\Delta N_{SO}$	1	$N_{SO_{nr}}$	0
		$Np_{SO_{rq}} = \max(1, Ngc_{A1})$	$Np_{SO_{ru}} = Np_{SO_{ex} 0} \left\{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \right.$ $= Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 0}$	$\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 0}$	$Np_{SO_{nr}} = 0 \left\{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 0} \right.$	$Np_{SO_{rq}}$	1	$Np_{SO_{ex}}$	0	$Np_{SO_{ru}}$	0	$\Delta Np_{SO}$	1	$Np_{SO_{nr}}$	0
		$N_{foo_{rq}} = Ngc_B 0$	$N_{foo_{ru}} = N_{foo_{ex} 0} \left\{ N_{foo_{rq} 0} \geq N_{foo_{ex} 0} \right.$ $= N_{foo_{rq} 0} - N_{foo_{ru} 0}$	$\Delta N_{foo} = N_{foo_{rq} 0} - N_{foo_{ru} 0}$	$N_{foo_{nr}} = 0 \left\{ N_{foo_{rq} 0} \geq N_{foo_{ex} 0} \right.$	$N_{foo_{rq}}$	0	$N_{foo_{ex}}$	0	$N_{foo_{ru}}$	0	$\Delta N_{foo}$	0	$N_{foo_{nr}}$	0
		$Np_{foo_{rq}} = N_{foo_{rq} 0}$	$Np_{foo_{ru}} = Np_{foo_{ex} 0} \left\{ Np_{foo_{rq} 0} \geq Np_{foo_{ex} 0} \right.$ $= Np_{foo_{rq} 0} - Np_{foo_{ru} 0}$	$\Delta Np_{foo} = Np_{foo_{rq} 0} - Np_{foo_{ru} 0}$	$Np_{foo_{nr}} = 0 \left\{ Np_{foo_{rq} 0} \geq Np_{foo_{ex} 0} \right.$ $= Np_{foo_{rq} 0} - Np_{foo_{ru} 0}$	$Np_{foo_{rq}}$	0	$Np_{foo_{ex}}$	0	$Np_{foo_{ru}}$	0	$\Delta Np_{foo}$	0	$Np_{foo_{nr}}$	0
		$N_{fd_{rq}} = Ngc_C 1 + Ngc_D 1$	$N_{fd_{ru}} = N_{fd_{ex} 0} \left\{ N_{fd_{rq} 2} \geq N_{fd_{ex} 0} \right.$ $= N_{fd_{rq} 2} - N_{fd_{ru} 0}$	$\Delta N_{fd} = N_{fd_{rq} 2} - N_{fd_{ru} 0}$	$N_{fd_{nr}} = 0 \left\{ N_{fd_{rq} 2} \geq N_{fd_{ex} 0} \right.$	$N_{fd_{rq}}$	2	$N_{fd_{ex}}$	0	$N_{fd_{ru}}$	0	$\Delta N_{fd}$	2	$N_{fd_{nr}}$	0
 <p><b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b></p>	i.a: Cuatro luminarias On/Off y un interruptor manual	$Ngc_D \geq 1 \rightarrow N_{CTRL_{rq}} = 1$ $\rightarrow N_{inputs} = 1 + Ngc_{D1} \quad N_{outputs} = 2 \cdot Ngc_{D1}$	$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 0} \left\{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \right.$ $= N_{CTRL_{rq} 1} - N_{CTRL_{ru} 0}$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 1} - N_{CTRL_{ru} 0}$	$N_{CTRL_{nr}} = 0 \left\{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \right.$	$N_{CTRL_{rq}}$	1	$N_{CTRL_{ex}}$	0	$N_{CTRL_{ru}}$	0	$\Delta N_{CTRL}$	1	$N_{CTRL_{nr}}$	0
		$N_{ctor_{rq}} = Ngc_D 1$	$N_{ctor_{ru}} = N_{ctor_{ex} 0} \left\{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 0} \right.$ $= N_{ctor_{rq} 1} - N_{ctor_{ru} 0}$	$\Delta N_{ctor} = N_{ctor_{rq} 1} - N_{ctor_{ru} 0}$	$N_{ctor_{nr}} = 0 \left\{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 0} \right.$	$N_{ctor_{rq}}$	1	$N_{ctor_{ex}}$	0	$N_{ctor_{ru}}$	0	$\Delta N_{ctor}$	1	$N_{ctor_{nr}}$	0
		$N_{Loo_{rq}} = \sum_{gi=1}^{Ngc} N_{lum\_oo\_gi}$ $= N_{lum\_oo\_g1 2} + N_{lum\_oo\_g2 0} + N_{lum\_oo\_g3 0}$	$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 2} \left\{ N_{Loo_{rq} 2} < N_{Loo_{ex} 4} \right.$ $= N_{Loo_{rq} 2} - N_{Loo_{ru} 2}$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 2} - N_{Loo_{ru} 2}$	$N_{Loo_{nr}} = N_{Loo_{ex} 4} - N_{Loo_{rq} 2}$ $\left\{ N_{Loo_{rq} 2} < N_{Loo_{ex} 4} \right.$	$N_{Loo_{rq}}$	2	$N_{Loo_{ex}}$	4	$N_{Loo_{ru}}$	2	$\Delta N_{Loo}$	0	$N_{Loo_{nr}}$	2
		$N_{Ld_{rq}} = \sum_{gi=1}^{Ngc} N_{lum\_dim\_gi}$ $= N_{lum\_dim\_g1 0} + N_{lum\_dim\_g2 1} + N_{lum\_dim\_g3 1}$	$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{ex} 0} \left\{ N_{Ld_{rq} 2} \geq N_{Ld_{ex} 0} \right.$ $= N_{Ld_{rq} 2} - N_{Ld_{ru} 0}$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 2} - N_{Ld_{ru} 0}$	$N_{Ld_{nr}} = 0 \left\{ N_{Ld_{rq} 2} \geq N_{Ld_{ex} 0} \right.$	$N_{Ld_{rq}}$	2	$N_{Ld_{ex}}$	0	$N_{Ld_{ru}}$	0	$\Delta N_{Ld}$	2	$N_{Ld_{nr}}$	0
		<b>TOTAL</b>					<b><math>N_{rq}</math></b>	<b>11</b>	<b><math>N_{ex}</math></b>	<b>4</b>	<b><math>N_{ru}</math></b>	<b>2</b>	<b><math>\Delta N</math></b>	<b>9</b>	<b><math>N_{nr}</math></b>

<sup>78</sup>  $\lceil n \rceil$  denota el mayor número entero contenido en  $n$ . Si  $n = 1,33$  entonces  $\lceil n \rceil = 1$ .

<sup>79</sup>  $\lfloor n \rfloor$  denota aproximación hacia infinito. Si  $n = -0,16$ , entonces  $\lfloor -0,16 \rfloor = 0$

Alternativa de control a implementar- CASO II	Escenario	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario ii.a			$N_{rq}$		$N_{ex}$		$N_{ru}$		$\Delta N$		$N_{nr}$									
		 <p>GC1 Ec:A → L1 L2 GC2 Ec:D GC3 Ec:C → L4 L3</p> <p><math>N_{gc} = 3</math> Ec:A → SO con fotocelda incluida y Loo Ec:D → SO, fd, ctor, CTRL y Ld Ec:C → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup> Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{f_{oorq}} \cdot 10 + N_{f_{drq}} \cdot 30</math></p> <p><b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b></p>  <p>*El sensor de ocupación debe incluir fotocelda (<math>SO_f</math>), debido a la presencia de la estrategia de control A. El power pack del sensor de ocupación debe tener la capacidad de recibir y gestionar la señal de control proveniente de la fotocelda del <math>SO_f</math>.</p>	<p><b>SIH a modernizar o mejorar</b></p> <p>ii.a: Un solo grupo de control y la <b>estrategia de control C</b> con los siguientes componentes instalados:  <math>N_{SO} = 1</math>  <math>Np_{SO} = 1</math>  <math>N_{fd} = 1</math>  <math>Np_{fd} = 1</math>  <math>N_{Ld} = 4</math></p>	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \}$ $\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$ $N_{SO_{nr}} = 0 \{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \}$	$Np_{SO_{ru}} = Np_{SO_{ex} 1} \{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 1} \}$ $\Delta Np_{SO} = Np_{SO_{rq} 1} - Np_{SO_{ru} 1}$ $Np_{SO_{nr}} = 0 \{ Np_{SO_{rq} 1} \geq Np_{SO_{ex} 1} \}$	$N_{f_{ooru}} = N_{f_{ooex} 0} \{ N_{f_{oorq} 0} \geq N_{f_{ooex} 0} \}$ $\Delta N_{f_{oo}} = N_{f_{oorq} 0} - N_{f_{ooru} 0}$ $N_{f_{oonr}} = 0 \{ N_{f_{oorq} 0} \geq N_{f_{ooex} 0} \}$	$Np_{f_{ooru}} = Np_{f_{ooex} 0} \{ Np_{f_{oorq} 0} \geq Np_{f_{ooex} 0} \}$ $\Delta Np_{f_{oo}} = Np_{f_{oorq} 0} - Np_{f_{ooru} 0}$ $Np_{f_{oonr}} = 0 \{ Np_{f_{oorq} 0} \geq Np_{f_{ooex} 0} \}$	$N_{f_{dru}} = N_{f_{dex} 1} \{ N_{f_{drq} 2} \geq N_{f_{dex} 1} \}$ $\Delta N_{fd} = N_{f_{drq} 2} - N_{f_{dru} 1}$ $N_{f_{dnr}} = 0 \{ N_{f_{drq} 2} \geq N_{f_{dex} 1} \}$	$Np_{f_{dru}} = Np_{f_{dex} 1} \{ Np_{f_{drq} 1} \geq Np_{f_{dex} 1} \}$ $\Delta Np_{fd} = Np_{f_{drq} 1} - Np_{f_{dru} 1}$ $Np_{f_{dnr}} = 0 \{ Np_{f_{drq} 1} \geq Np_{f_{dex} 1} \}$	$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 0} \{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \}$ $\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 1} - N_{CTRL_{ru} 0}$ $N_{CTRL_{nr}} = 0 \{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 0} \}$	$N_{ctor_{ru}} = N_{ctor_{ex} 0} \{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 0} \}$ $\Delta N_{ctor} = N_{ctor_{rq} 1} - N_{ctor_{ru} 0}$ $N_{ctor_{nr}} = 0 \{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 0} \}$	$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 0} \{ N_{Loo_{rq} 2} \geq N_{Loo_{ex} 0} \}$ $\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 2} - N_{Loo_{ru} 0}$ $N_{Loo_{nr}} = 0 \{ N_{Loo_{rq} 2} \geq N_{Loo_{ex} 0} \}$	$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{rq} 2} \{ N_{Ld_{rq} 2} < N_{Ld_{ex} 4} \}$ $\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 2} - N_{Ld_{ru} 2}$ $N_{Ld_{nr}} = N_{Ld_{ex} 4} - N_{Ld_{rq} 2} \{ N_{Ld_{rq} 2} < N_{Ld_{ex} 4} \}$	<p><b>TOTAL</b></p>	$N_{rq}$	<b>11</b>	$N_{ex}$	<b>7</b>	$N_{ru}$	<b>5</b>	$\Delta N$	<b>6</b>

Alternativa de control a implementar- CASO II	Escenario	Cálculos de las cantidades $N_{ru}$ , $\Delta N$ y $N_{nr}$ para el escenario ii.a			$N_{rq}$	$N_{ex}$	$N_{ru}$	$\Delta N$	$N_{nr}$					
 <p><math>N_{gc} = 3</math>  <b>Ec:A</b> → SO con fotocelda incluida y Loo  <b>Ec:D</b> → SO, fd, ctor, CTRL y Ld  <b>Ec:C</b> → SO, fd y Ld</p> <p>Area=20 m<sup>2</sup>            Carga = <math>N_{SO_{rq}} \cdot 40 + N_{f_{oorq}} \cdot 10 + N_{f_{drq}}</math>                      · 30</p>	<p><b>SIH a modernizar o mejorar</b></p>	$N_{SO_{ru}} = N_{SO_{ex} 0} \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right.$	$\Delta N_{SO} = N_{SO_{rq} 1} - N_{SO_{ru} 0}$	$N_{SO_{nr}} = 0 \left\{ N_{SO_{rq} 1} \geq N_{SO_{ex} 0} \right.$	$N_{SO_{rq}}$	1	$N_{SO_{ex}}$	0*	$N_{SO_{ru}}$	0				
<p><b>Esquema de conexión de componentes requeridos</b></p>  <p>*El sensor de ocupación debe incluir fotocelda (<math>SO_f</math>), debido a la presencia de la estrategia de control A.            El power pack del sensor de ocupación debe tener la capacidad de recibir y gestionar la señal de control proveniente de la fotocelda del <math>SO_f</math>.</p>	<p>ii.b: Dos grupos de control distribuidos así:            GC1 (L1 y L2)  <b>- estrategia de control B</b>            y            GC2 (L3 y L4)  <b>- estrategia de control D</b>            con los siguientes componentes instalados:</p> <p><math>N_{SO} = 1</math>  <math>N_{f_{oo}} = 1</math>  <math>N_{p_{f_{oo}}} = 1</math>  <math>N_{f_{d}} = 1</math>  <math>N_{p_{f_{d}}} = 1</math>  <math>N_{CTRL} = 1</math>  <math>N_{ctor} = 1</math>  <math>N_{Ld} = 2</math>  <math>N_{Loo} = 2</math></p>	$N_{p_{SO_{ru}}} = N_{p_{SO_{ex} 1}} \left\{ N_{p_{SO_{rq} 1}} \geq N_{p_{SO_{ex} 1}} \right.$	$\Delta N_{p_{SO}} = N_{p_{SO_{rq} 1}} - N_{p_{SO_{ru} 1}}$	$N_{p_{SO_{nr}}} = 0 \left\{ N_{p_{SO_{rq} 1}} \geq N_{p_{SO_{ex} 1}} \right.$	$N_{p_{SO_{rq}}}$	1	$N_{p_{SO_{ex}}}$	1	$N_{p_{SO_{ru}}}$	1				
$N_{f_{ooru}} = N_{f_{oorq} 0} \left\{ N_{f_{oorq} 0} < N_{f_{oorq} 1} \right.$	$\Delta N_{f_{oo}} = N_{f_{oorq} 0} - N_{f_{oorru} 0}$	$N_{f_{oonr}} = N_{f_{oorq} 1} - N_{f_{oorq} 0} \left\{ N_{f_{oorq} 0} < N_{f_{oorq} 1} \right.$	$N_{f_{oorq}}$	0	$N_{f_{oorq}}$	1	$N_{f_{oorru}}$	0	1					
$N_{p_{f_{ooru}}} = N_{p_{f_{oorq} 0}} \left\{ N_{p_{f_{oorq} 0}} < N_{p_{f_{oorq} 1}} \right.$	$\Delta N_{p_{f_{oo}}} = N_{p_{f_{oorq} 0}} - N_{p_{f_{oorru} 0}}$	$N_{p_{f_{ooex} 01}} - N_{p_{f_{oorq} 0}} \left\{ N_{p_{f_{oorq} 0}} < N_{p_{f_{oorq} 1}} \right.$	$N_{p_{f_{oorq}}}$	0	$N_{p_{f_{oorq}}}$	1	$N_{p_{f_{oorru}}}$	0	1					
$N_{f_{dru}} = N_{f_{dex} 1} \left\{ N_{f_{drq} 2} \geq N_{f_{dex} 1} \right.$	$\Delta N_{f_d} = N_{f_{drq} 2} - N_{f_{dru} 1}$	$N_{f_{dnr}} = 0 \left\{ N_{f_{drq} 2} \geq N_{f_{dex} 1} \right.$	$N_{f_{drq}}$	2	$N_{f_{dex}}$	1	$N_{f_{dru}}$	1	0					
$N_{p_{f_{dru}}} = N_{p_{f_{dex} 1}} \left\{ N_{p_{f_{drq} 1}} \geq N_{p_{f_{dex} 1}} \right.$	$\Delta N_{p_{f_d}} = N_{p_{f_{drq} 1}} - N_{p_{f_{dru} 1}}$	$N_{p_{f_{dnr}}} = 0 \left\{ N_{p_{f_{drq} 1}} \geq N_{p_{f_{dex} 1}} \right.$	$N_{p_{f_{drq}}}$	1	$N_{p_{f_{dex}}}$	1	$N_{p_{f_{dru}}}$	1	0					
$N_{CTRL_{ru}} = N_{CTRL_{ex} 1} \left\{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 1} \right.$	$\Delta N_{CTRL} = N_{CTRL_{rq} 1} - N_{CTRL_{ru} 1}$	$N_{CTRL_{nr}} = 0 \left\{ N_{CTRL_{rq} 1} \geq N_{CTRL_{ex} 1} \right.$	$N_{CTRL_{rq}}$	1	$N_{CTRL_{ex}}$	1	$N_{CTRL_{ru}}$	1	0					
$N_{ctor_{ru}} = N_{ctor_{ex} 1} \left\{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 1} \right.$	$\Delta N_{ctor} = N_{ctor_{rq} 1} - N_{ctor_{ru} 1}$	$N_{ctor_{nr}} = 0 \left\{ N_{ctor_{rq} 1} \geq N_{ctor_{ex} 1} \right.$	$N_{ctor_{rq}}$	1	$N_{ctor_{ex}}$	1	$N_{ctor_{ru}}$	1	0					
$N_{Loo_{ru}} = N_{Loo_{ex} 2} \left\{ N_{Loo_{rq} 2} \geq N_{Loo_{ex} 2} \right.$	$\Delta N_{Loo} = N_{Loo_{rq} 2} - N_{Loo_{ru} 2}$	$N_{Loo_{nr}} = 0 \left\{ N_{Loo_{rq} 2} \geq N_{Loo_{ex} 2} \right.$	$N_{Loo_{rq}}$	2	$N_{Loo_{ex}}$	2	$N_{Loo_{ru}}$	2	0					
$N_{Ld_{ru}} = N_{Ld_{ex} 2} \left\{ N_{Ld_{rq} 2} \geq N_{Ld_{ex} 2} \right.$	$\Delta N_{Ld} = N_{Ld_{rq} 2} - N_{Ld_{ru} 2}$	$N_{Ld_{nr}} = 0 \left\{ N_{Ld_{rq} 2} \geq N_{Ld_{ex} 2} \right.$	$N_{Ld_{rq}}$	2	$N_{Ld_{ex}}$	2	$N_{Ld_{ru}}$	2	0					
<b>TOTAL</b>					$N_{rq}$	<b>11</b>	$N_{ex}$	<b>11</b>	$N_{ru}$	<b>9</b>	$\Delta N$	<b>2</b>	$N_{nr}$	<b>2</b>