



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE SENSORES DE
PRESENCIA Y ANÁLISIS DE INDICADORES
DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE
ILUMINACIÓN INTELIGENTE PARA
MEJORAR LA EFICIENCIA Y REDUCIR EL
CONSUMO ELÉCTRICO EN EL BLOQUE H
DEL CAMPUS SUR DE LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: JUAN SEBASTIÁN IGLLÓN CISNEROS
TUTOR: LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA

Quito -Ecuador
2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Sebastián Iglón Cisneros con documento de identificación N° 1726871443 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 12 de marzo del año 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'S' followed by 'Iglón' and 'Cisneros' written in a cursive script. Below the signature is a horizontal dashed line.

Juan Sebastián Iglón Cisneros
1726871443

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Juan Sebastián Iglón Cisneros con documento de identificación No. 1726871443, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Ubicación óptima de sensores de presencia y análisis de indicadores de energía eléctrica en sistemas de iluminación inteligente para mejorar la eficiencia y reducir el consumo eléctrico en el bloque H del Campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de marzo del año 2026

Atentamente,



Juan Sebastián Iglón Cisneros
1726871443

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara con documento de identificación N° 1717329005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: UBICACIÓN ÓPTIMA DE SENSORES DE PRESENCIA Y ANÁLISIS DE INDICADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE ILUMINACIÓN INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA Y REDUCIR EL CONSUMO ELÉCTRICO EN EL BLOQUE H DEL CAMPUS SUR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, realizado por Juan Sebastián Iglón Cisneros con documento de identificación N° 1726871443, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de marzo del año 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis Fernando Tipán Vergara', is written over a horizontal dashed line. The signature is stylized and cursive.

Ing. Luis Fernando Tipán Vergara, MSc.
1717329005

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I.....	3
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivo Principal	6
1.4. Objetivos específicos.....	6
CAPÍTULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Bases teóricas	7
2.1.1. Eficiencia energética	7
2.1.2. Iluminación inteligente.....	8
2.1.3. Sensores de presencia.....	8
2.1.4. Indicadores de energía eléctrica	10
2.1.5. Diagramas de Voronoi	12
2.1.6. Algoritmos genéticos.....	13
2.2. Antecedentes de investigaciones relacionadas	15
2.2.1. Sistema de iluminación inteligente	15
2.2.2. Tecnología para sensores y obtención de datos	16
2.2.3. Metodologías de ubicación óptima de sensores	17
2.2.4. Indicadores energéticos y métricas	17
2.2.5. Estrategias de control y arquitectura	18
CAPÍTULO III	19
3. MARCO METODOLÓGICO	19
3.1. Tipo de investigación	19
3.2. Enfoque de investigación	19
3.3. Diseño de investigación	20
3.4. Área de estudio.....	20
3.5. Población y muestra	21
3.6. Técnicas e instrumentos	21
3.7. Sensor propuesto	21
3.8. Procedimiento general.....	22
3.9. Metodología basada en diagramas de Voronoi	24

3.10. Metodología basada en Algoritmos Genéticos.....	25
3.10.1. Función objetivo multicriterio con criterio energético.....	27
3.11. Indicadores energéticos.....	29
3.11.1. Consumo energético actual.....	29
3.11.2. Consumo energético con sensores.....	30
3.11.3. Ahorro energético (%).....	30
3.11.4. Densidad de potencia por área.....	30
3.11.5. Índice de potencia por persona.....	30
3.11.6. Consumo energético por área.....	30
3.12. Parámetros técnicos y reproducibilidad.....	31
3.12.1. Resolución temporal de simulación.....	31
3.12.2. Parámetros del sistema de detección.....	31
3.12.3. Reglas de control del sistema de iluminación.....	31
3.12.4. Modelo de ocupación.....	32
3.12.5. Supuestos y limitaciones.....	32
3.13. Simulación dinámica del sistema de iluminación con control de presencia.....	32
3.13.1. Horizonte temporal y resolución de simulación.....	32
3.13.2. Modelo de ocupación del aula.....	33
3.13.3. Modelo del sistema de control de presencia.....	33
3.13.4. Cálculo del factor dinámico de operación.....	34
3.14. Variables de estudio.....	34
CAPÍTULO IV.....	36
4. DESARROLLO.....	36
4.1. Caracterización general del caso de estudio, Bloque H.....	36
4.2. Selección de aulas y descripción espacial.....	37
4.3. Preparación de planos para análisis geométrico.....	40
4.3.1. Importación del plano.....	41
4.3.2. Escala real del plano.....	41
4.3.3. Delimitación del área útil del plano.....	42
4.3.4. Ubicación preliminar de sensores, basado en la geometría del espacio.....	43
4.4. Diagramas de Voronoi.....	44
4.4.1. Diagrama de Voronoi en un aula seleccionada.....	44
4.4.2. Limitación del área de estudio considerando el espacio útil.....	45
4.4.3. Análisis de regiones de influencia.....	46
4.4.4. Identificación óptima preliminar del sensor.....	46
4.5. Optimización en la ubicación de sensores mediante Algoritmo Genético.....	48

4.5.1. Objetivo de la optimización	48
4.5.2. Representación del problema y espacio	48
4.5.3. Codificación del algoritmo.....	49
4.5.4. Función aptitud.....	49
4.5.5. Parámetros del AG	50
4.5.6. Implementación de Algoritmo Genético	50
4.5.7. Resultados de la optimización.....	56
4.5.8. Extrapolación del modelo al resto de aulas del Bloque H.....	58
4.5.9. Validación de normativa de la calidad de iluminación	61
4.6. Resultados de la simulación dinámica del sistema de iluminación.....	62
4.6.1. Implementación de simulación dinámica.....	62
4.6.2. Obtención de la reducción de operación	63
4.6.3. Comparación con el sistema de control.....	64
4.7. Análisis energético en sistemas de iluminación.....	65
4.7.1. Indicadores energéticos	65
4.7.2. Consumo energético actual	67
4.7.3. Consumo energético con sensores.....	69
4.7.4. Ahorro energético.....	71
4.7.5. Densidad de potencia por área	73
4.7.6. Índice de potencia por persona.....	75
4.7.7. Consumo energético por área	77
CAPÍTULO V	1
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	1
5.1. Análisis de resultados de densidad de potencia instalada	1
5.2. Análisis de resultados de índice de potencia por persona	2
5.3. Análisis de resultado del consumo energético por área sin sensores	4
5.4. Análisis de resultados del consumo energético por área con sensores	4
5.5. Ahorro energético por escenario	6
5.6. Limitaciones del análisis lumínico y trabajos futuros.....	7
5.7. Validación del Algoritmo Genético	7
5.8. Alcance de control de los sensores de presencia.....	8
5.9. Análisis de resultados global.....	9
CAPÍTULO VI.....	10
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	10
6.1. CONCLUSIONES	10
6.2. RECOMENDACIONES	12

CAPÍTULO VII.....	13
7. REFERENCIAS.....	13
CAPÍTULO VIII.....	17
8. ANEXOS.....	17
1. CÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO INICIO DEL CÓDIGO.....	17
2. CÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO FUNCIÓN OBJETIVO (FITNESS).....	17
3. CÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.....	18
4. SIMULACIÓN DINÁMICA PARA JORNADA DE 12 HORAS, 97 PRIMEROS MINUTOS.....	19
5. SIMULACIÓN DINÁMICA PARA JORNADA DE 10 HORAS, 97 PRIMEROS MINUTOS.....	21
6. NUMERACIÓN DEL TOTAL DE AULAS EXISTENTES.....	23
7. NUMERACIÓN DEL TOTAL DE AULAS EXISTENTES: AULA 11.....	23
8. AULA REPRESENTATIVA DEL CASO DE ESTUDIO.....	23
9. AULA CON LUMINARIAS LED 60W.....	24
10. AULA CON LUMINARIAS LED 18W.....	24
11. AULA CON LUMINARIAS LED 60W.....	25
12. RESULTADO DE OPTIMIZACIÓN EN UNA SEGUNDA SIMULACIÓN.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología	23
Figura 2 Proceso del algoritmo genético	27
Figura 3 Plano base del caso de estudio	37
Figura 4 Importación del plano en GeoGebra	41
Figura 5 Escala del plano en el aula	42
Figura 6 Delimitación del polígono.....	43
Figura 7 Ubicación de sensores de manera preliminar.....	43
Figura 8 Diagrama de Voronoi en caso de estudio.....	45
Figura 9 Limitación del caso de estudio	45
Figura 10 Análisis de regiones de influencia en área seleccionada.....	46
Figura 11 Ubicación óptima preliminar del sensor	47
Figura 12 Representación del espacio	49
Figura 13 Diagrama de flujo del algoritmo genético.....	53
Figura 14 Espacio de búsqueda para el sensor	54
Figura 15 Seudocódigo del algoritmo genético.....	55
Figura 16 Ubicación óptima del sensor en caso de estudio.....	56
Figura 17 Densidad de potencia instalada en los distintos escenarios	2
Figura 18 Índice de potencia por persona en cada escenario	3
Figura 19 Consumo energético por área con sensores y sin sensores	5
Figura 20 Ahorro energético del sistema de iluminación.....	6

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de sensores en sistemas inteligentes	10
Tabla 2 Características de las aulas	39
Tabla 3 Parámetros de algoritmo genético	50
Tabla 4 Parámetros del algoritmo genético considerando energía	50
Tabla 5 Pasos para la codificación del algoritmo genético	51
Tabla 6 Resultados óptimos del algoritmo genético.....	58
Tabla 7 Tabla resumen de extrapolación.....	60
Tabla 8 Requisitos normativos de iluminación para aulas educativas (UNE 12464-1) .	62
Tabla 9 Resumen de la simulación dinámica	63
Tabla 10 Características de las luminarias	66
Tabla 11 Consumo energético actual.....	68
Tabla 12 Consumo energético con sensores.....	70
Tabla 13 Ahorro energético.....	72
Tabla 14 Densidad de potencia por área.....	74
Tabla 15 Resumen del índice de potencia por persona	76
Tabla 16 Resumen del consumo energético por área sin sensores	78
Tabla 17 Resumen del consumo energético por área con sensores.....	79

RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo determinar la ubicación óptima de sensores de presencia y analizar indicadores de consumo de energía eléctrica en sistemas de iluminación inteligente, con el propósito de mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo eléctrico en el bloque H del Campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito.

Para el desarrollo del estudio se recopiló información del sistema de iluminación existente, considerando parámetros como el número de luminarias, su potencia, horarios de funcionamiento y las condiciones de ocupación de los espacios. Con estos datos se calcularon indicadores de eficiencia energética que permitieron evaluar el consumo eléctrico inicial y establecer una línea base para el análisis.

Posteriormente, se aplicó un modelo de simulación basado en diagramas de Voronoi, el cual permitió dividir el espacio en zonas de cobertura y determinar ubicaciones óptimas para los sensores de presencia. Esta metodología permitió garantizar una cobertura adecuada, reducir redundancias y mejorar la detección en áreas con mayor uso.

Finalmente, se realizó una comparación entre el sistema actual y la propuesta de optimización. Los resultados mostraron que la implementación teórica de un sistema de iluminación inteligente podría reducir el consumo energético, dependiendo de la ocupación de los espacios y del tipo de luminarias utilizadas, validando el uso de estas herramientas para la planificación eficiente de sistemas de iluminación.

Palabras clave: Algoritmos genéticos, consumo de energía eléctrica, eficiencia energética, sensores de presencia.

ABSTRACT

This work aimed to determine the optimal location of presence sensor and analyze electrical energy consumption indicators in smart lighting systems in order to improve energy efficiency and reduce electricity consumption in Block H of the South Campus of the Universidad Politécnica Salesiana in Quito.

To carry out the study, information about the existing lighting system was collected, including parameters such as the number of luminaires, their power rating, operating schedules, and occupancy conditions of the different spaces. Using this data, energy efficiency indicators were calculated to evaluate the initial electrical consumption and establish a baseline for the analysis.

Subsequently, a simulation model based on Voronoi diagrams was applied to divide the space into coverage zones and determine optimal locations for presence sensor. This methodology allowed the identification of strategic points for sensors placement, ensuring adequate coverage, reducing redundancies, and improving detection in areas with higher occupancy levels.

Finally, a comparison between the current lighting system and the proposed optimization was conducted. The results showed that the theoretical implementation of a smart lighting system could reduce energy consumption depending on space occupancy and the type of luminaires used. These findings validate the use of optimization techniques as effective tools for planning efficient smart lighting systems and improving energy management in educational facilities.

Key words: Genetic algorithms, electrical energy consumption, energy efficiency, occupancy sensors.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la eficiencia energética ha sido un punto clave para el desarrollo sostenible en edificaciones modernas, especialmente en el ámbito educativo, en donde el consumo eléctrico que se tiene asociado a iluminación representa un porcentaje alto dentro de los gastos totales. Al mismo tiempo en el que las instituciones crecen en su infraestructura y uso de nuevos espacios, la demanda de iluminación se ve perjudicada en dos aspectos principales, el cual es el uso de iluminación artificial y un impacto en el consumo de energía anual, lo cual representa costos operativos elevados. Conociendo este contexto, las estrategias para optimizar el uso de energía eléctrica se han vuelto una parte fundamental para el mejoramiento de sostenibilidad, reducción del impacto ambiental y la concientización.

Diversos estudios que se han realizado han demostrado que la optimización y ubicación óptima de sensores de presencia logra un ahorro energético del 24 % y hasta un 31 % en lugares como oficinas y salas de reuniones, permitiendo tener una comodidad visual con base en estándares internacionales. Para sistemas avanzados, se logró tener una reducción de al menos un 45% en oficinas y, para espacios más controlados como lo son laboratorios o pasillos, se llega a un porcentaje del 75%.

En países como Malasia, Singapur e India se ha realizado la implementación óptima de sensores en diferentes universidades para distintos espacios, los cuales han generado resultados positivos, ya que se ha logrado ahorros energéticos significativos sin necesidad de verse afectado el confort visual.

Para países como Alemania y España, la utilización de sensores y algoritmos basados en inteligencia artificial ha sido un avance significativo para las energías renovables, ya que estos sensores permiten enlazarse a la red de manera óptima, facilitando así el mantenimiento y la reducción de costos operativos, lo cual genera una mayor confiabilidad en el suministro eléctrico.

En el presente documento se detalla una breve historia de cómo la optimización del uso de energía eléctrica genera un impacto positivo en distintos escenarios a lo largo de la vida cotidiana.

Capítulo I, se describe la problemática en conjunto con su justificación y los objetivos que estos conllevan para la realización del proyecto.

Capítulo II: Se aborda de manera más extensa conceptos fundamentales para la elaboración del proyecto, así como una revisión al estado del arte en donde se justifica de manera teórica la propuesta basada en estudios previos.

Capítulo III: Presenta la metodología que se usará para la optimización, así como los criterios que servirán para el desarrollo del proyecto; esto se abordará de una manera teórica en forma detallada.

Capítulo IV: Se presenta el desarrollo de la metodología para optimizar la ubicación de sensores y su respectivo análisis de indicadores, los cuales nos permitirán obtener resultados.

Capítulo V: Se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología que se utilizó.

Capítulo VI: Finalmente, las conclusiones y recomendaciones, las cuales se enfocaron en el cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto.

1.1. Planteamiento del problema

La ineficiencia en la energía eléctrica en los sistemas de iluminación tradicionales es una problemática la cual a lo largo del tiempo no ha podido ser solucionada de manera óptima debido a la falta de monitoreo en los sistemas lo que provoca un impacto negativo social, económico y ambiental en donde la mayor parte de afectaciones ocurre en regiones urbanas las cuales cuentan con un gran número de habitantes.

El consumo excesivo de energía eléctrica ocurre por la falta de indicadores energéticos los cuales al ser inexistentes no pueden medir el consumo, lo que dificulta identificar áreas donde se puede mejorar la problemática. El consumo de energía también ocurre debido a la ineficiencia en la obra civil y diseño donde no se toman en cuenta métricas de rendimiento las cuales puedan ser evidenciadas en escenarios reales.

1.2. Justificación

En El presente trabajo tiene como objetivo definir y establecer indicadores clave de energía eléctrica asociados a iluminación inteligente. A través de los indicadores, se busca reconocer áreas con alto consumo eléctrico e identificar la ubicación óptima para la colocación de sensores de presencia e iluminación. A través de la optimización en la distribución de sensores lo que se busca es mejorar la eficiencia de la energía eléctrica sin necesidad de comprometer la calidad de iluminación por lo cual permite un aprovechamiento de luz natural y reducción en el consumo eléctrico favoreciendo al uso sostenible de energía en el sistema de iluminación inteligente.

El sistema definido debe validar un modelo de simulación de energía eléctrica mediante un esquema de ubicación de sensores lo cual permite evaluar resultados en términos de consumo energético y mejora en la distribución de la iluminación. En este contexto, al realizar el modelo de simulación se obtendrá el comportamiento del sistema de iluminación inteligente en función de parámetros, tales como la ubicación de sensores, intensidad de luz y el comportamiento del usuario en el espacio. Este enfoque permitirá observar cómo las distintas configuraciones de los sensores tienen un impacto en la uniformidad, aprovechamiento de luz y ahorro de energía eléctrica.

La metodología de trabajo a utilizar se basa en un algoritmo de optimización eléctrica basado en Algoritmos Genéticos y diagramas de Voronoi los cuales permiten encontrar una distribución óptima de sensores para maximizar la cobertura y minimizar el consumo de energía. Se define una función objetivo que evalúa la eficiencia de cada configuración, considerando restricciones como nivel mínimo de iluminancia, superposición de sensores y un límite máximo de dispositivos. El diagrama de Voronoi lo cual permite es la segmentación del espacio en un número de regiones óptimas mientras que el algoritmo genético permite ajustar de forma iterativa la ubicación de sensores a través de un proceso de evaluación, selección, cruce y mutación, hasta encontrar la óptima ubicación de sensores.

1.3. Objetivo Principal

- Ubicar de manera óptima sensores de presencia en sistemas inteligentes de iluminación, mediante el análisis de indicadores energéticos relacionados al consumo y uso eficiente de luz, teniendo en cuenta factores como el diseño del espacio y patrones de ocupación.

1.4. Objetivos específicos

- Definir y establecer indicadores clave de eficiencia en energía eléctrica asociados al sistema de iluminación inteligente, con el fin de evaluar el desempeño del sistema en términos de consumo, eficiencia energética, aprovechamiento lumínico y control de energía eléctrica.
- Implementar un modelo de simulación en un entorno controlado, evaluando los resultados en términos de reducción del consumo de energía eléctrica y mejora en la distribución de iluminación.
- Desarrollar y evaluar el algoritmo de optimización eléctrica basado en algoritmos genéticos y diagramas de Voronoi el cual permite determinar la ubicación óptima de sensores de presencia e iluminación, considerando la segmentación del espacio, maximización de cobertura y minimización del consumo de energía eléctrica.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas

2.1.1. Eficiencia energética

Cuando se habla de eficiencia energética, se refiere a la capacidad en la que un sistema hace uso de energía en menor cantidad sin necesidad de ver afectado su rendimiento. En el contexto de edificios y específicamente en el sistema de iluminación, la eficiencia energética procura reducir el consumo eléctrico manteniendo un confort visual idóneo. Es por ello que se plantean estrategias de optimización, las cuales permiten la conversión de energía eléctrica en iluminación útil, reducir pérdidas y aplicar nuevas tecnologías, las cuales permiten hacer un uso razonable y automatizado de dicho recurso.

Al momento en el que se habla del entorno educativo, el contexto cambia drásticamente, esto debido a que la iluminación representa un mayor consumo total, específicamente en aulas las cuales permanecen ocupadas múltiples horas debido a las jornadas largas de estudio. Para ello se debe realizar una integración de luminarias eficientes, controles automáticos y estrategias de uso, las cuales permiten disminuir el desperdicio de energía debido a conductas inadecuadas.

Conociendo el contexto de iluminación que se encuentra en el ámbito educativo, el consumo que este significa en edificios representa entre un 14 y un 48% de energía utilizada, siendo esta una parte de energía primaria que puede alcanzar una cifra del 76% en ciertas instalaciones eléctricas [1]. Para poder llegar a conocer estas cifras, se ha tomado en cuenta 10 casos de estudios en diferentes partes del mundo en las cuales se demostró que, al momento de realizar intervenciones en la iluminación, se obtuvo un ahorro energético que ronda entre un 15% y 77.78%, y su eficacia se basa en el tipo de intervención, así como la exhaustividad de su implementación, más que en la ubicación de iluminación. La iluminación LED es un gran elemento para reducir el consumo eléctrico, teniendo así reducciones del 25% al 66.67% [2].

2.1.2. Iluminación inteligente

El sistema de iluminación comprende un conjunto de elementos como luminarias, dispositivos de control, y fuentes de luz; estos permiten iluminar diferentes espacios de una manera funcional y segura. Tradicionalmente, la iluminación de este tipo de sistemas se la hacía de forma manual, con lámparas fluorescentes o incandescentes, sin ningún tipo de automatización. Sin embargo, los recursos tecnológicos han sido un gran aliado para este tipo de sistemas, lo cual ha permitido soluciones eficientes y adaptables.

En la actualidad, los sistemas de iluminación modernos han dado un paso agigantado haciendo uso de luminarias LED, controladores electrónicos, sensores de ocupación, fotoceldas, atenuadores y gestión distintas; dichas tecnologías lo que permiten es ajustar los niveles de luz a las condiciones necesarias del espacio, logrando así una optimización en la energía eléctrica y una mejora en el ámbito visual.

Cuando se habla de sistemas de iluminación inteligente, el enfoque va más allá de conocer las tecnologías utilizadas en este tipo de sistemas, sino que también se necesita entender los diferentes protocolos de comunicación y control inteligente que tiene cada uno de estos dispositivos.

Para ello se hace uso de protocolos abiertos de comunicación de forma cableada e inalámbrica. El recurso inalámbrico ofrece que la comunicación se realice a una escala grande en edificios terminados, aunque la metodología tiene algunas limitantes como las interferencias y retrasos. Los sistemas híbridos son mucho mejores, ya que combinan algunos criterios como estabilidad y expansión al momento de hacer uso de iluminación inteligente [3].

Para que los sistemas de iluminación lleguen a incrementar el ahorro energético y una comodidad visual, se debe hacer uso de algoritmos de optimización, los cuales permiten adaptarse en tiempo real a las condiciones de uso y la elección del usuario [4], [5].

2.1.3. Sensores de presencia

Los sensores de presencia son dispositivos que permiten detectar ciertos patrones de ocupación dentro de un espacio determinado, para lo cual se utilizan técnicas como (PIR), ultrasonido o microondas, lo cual permite una autorregulación de manera automática al momento en que se detecta movimiento o permanencia de personas, siendo así un recurso beneficioso debido a que este permite reducir el costo energético asociado a cargas innecesarias.

El sensor que se utiliza en lugares como edificios es el PIR, esto debido a que detecta puntos de radiación, los cuales son hallados por el calor del cuerpo humano. Los sensores de ultrasonido, en cambio, detectan ondas, las cuales rebotan en el área donde se encuentra localizado el sensor; por ende, detecta movimiento. Por otro lado, el sensor de microondas detecta señales electromagnéticas, las cuales son más sensibles a los cambios de frecuencia, siendo este sensor uno de los más utilizados en zonas con demasiados obstáculos [6].

Al realizar la implementación de este tipo de sensores de presencia en espacios académicos, se logra una optimización en el uso de iluminación durante las horas en donde no se encuentren ocupadas las aulas o en cambios de hora. La integración de este tipo de sensores garantiza una respuesta rápida y adaptativa a patrones de uso reales, aportando un ahorro energético significativo y sostenibilidad energética [7].

La precisión de los sensores es un aspecto fundamental a la hora de detectar los patrones de ocupación, ya que esto permite una mejor gestión energética y un mejor confort visual. Como se había mencionado anteriormente, existen diferentes tipos de tecnologías, las cuales cada una de ellas cuenta con sus ventajas y limitaciones cuando nos referimos a precisión, costo y privacidad. La comparativa de estos sensores permite destacar la fusión de datos y mejorar la exactitud de los mismos.

A continuación, se muestra una tabla comparativa en la cual se indica la precisión de cada uno de los tipos de sensores.

Tabla 1 Tipos de sensores en sistemas inteligentes

Tipo de sensor	Precisión (%)	Ventajas	Limitantes
Visión artificial	97-99	- Conteo exacto	- Privacidad
PIR	80-97	- Bajo costo	- Dificultad con ocupantes estáticos
Sensores ambientales	66-95	- Detecta ocupantes estáticos	- Precisión inestable
Sensor fusión	94-99	- Máxima precisión	- Complejo
Wifi/ Bluetooth	60-90	- Uso de infraestructura existente	- Precisión depende del dispositivo
Térmicos	99	- Alta precisión	- Resolución limitada

Para tener una mayor precisión al momento de hacer uso de algún tipo de sensores, lo que se realiza es una fusión en los sensores, así como la utilización de algoritmos avanzados, subsiguientes con cámara y, finalmente, el uso de sensores PIR. En cambio, para los sensores ambientales y de red se tiene diversas soluciones, las cuales sean menos intrusivas, pero con una precisión que llega a ser inestable o variable [8], [9]. Para hacer la elección de un sensor, se deben tener en cuenta algunos puntos importantes como precisión, costo, privacidad y el contexto en el que se va a utilizar.

2.1.4. Indicadores de energía eléctrica

Los indicadores de energía eléctrica son un pilar importante al momento de evaluar la eficiencia de un sistema de iluminación; estos indicadores se encuentran en términos de consumo eléctrico, calidad lumínica y aprovechamiento de la energía. Estos parámetros permiten medir de manera más sencilla si la iluminación dentro de un espacio se encuentra de manera adecuada y eficiente de acuerdo con las necesidades de uso. Además, dichos indicadores son de suma importancia, ya que nos permiten realizar comparaciones del antes y después de realizar las implementaciones tecnológicas, como instalación de sensores de presencia o sistemas de control inteligente.

Los indicadores que son mayormente utilizados se encuentra la iluminancia (lux), la cual mide la cantidad de luz que se encuentra en una superficie determinada y permite verificar si los niveles lumínicos son adecuados para las actividades que se realicen en este espacio.

Por otro lado, tenemos el consumo energético (kWh), el cual muestra el consumo total de energía por parte de las luminarias y es un indicador clave, ya que este permite el análisis del impacto económico y operativo del sistema.

Un indicador, el cual es muy relevante, es la densidad de potencia lumínica (W/m^2), la cual es utilizada para medir la potencia consumida por cada área en metros. Otro indicador clave es la eficiencia lumínica (lm/W), la cual relaciona el flujo luminoso con la potencia de consumo; con este indicador se puede medir la eficiencia de las luminarias.

Otro aspecto para tomar en consideración cuando se habla de los indicadores es la innovación tecnológica que ha cambiado en los últimos tiempos, debido a que en la actualidad, mediante simulaciones paramétricas y métricas dinámicas, se puede verificar el tipo de luz en función de las condiciones de uso y el espacio, teniendo así un diseño más óptimo y reduciendo el consumo energético [10], [11].

Estos son algunos indicadores clave, los cuales ayudan a tener un diagnóstico técnico en los sistemas de iluminación y permiten realizar continuas mejoras. Además, la integración de modelos que sean automáticos en el aprendizaje permite llevar los niveles de lux en tiempo real [12].

2.1.4.1. Comparativa de métodos para medir calidad lumínica

En los últimos tiempos, la medición de calidad lumínica en interiores ha ido evolucionando mediante la combinación de métodos objetivos y subjetivos, explorando diversas formas de optimizar, ya sea a nivel visual como en eficiencia.

En la actualidad existe una serie de métodos, los cuales nos permiten evaluar el tipo de método más efectivo a la hora de priorizar el confort visual del usuario y la eficiencia energética.

A continuación, se muestra la característica de cada uno de los métodos para medir calidad lumínica en interiores junto a sus descripciones.

- **Medición objetiva:** Este método se utiliza para medir luminancia, distribución, deslumbramiento y temperatura de color. Generalmente, se lo utiliza en simulaciones de tipo computación y HDR [13], [14].
- **Evaluación subjetiva:** Dicho método permite realizar encuestas, escalas de confort y análisis sensorial [15], [16].
- **Métodos integrados:** Los métodos integrados son un método más sofisticado, ya que permiten medir índices visuales como el VQI y análisis de modelos jerárquicos, los cuales cuentan con diferentes parámetros [15], [17].
- **Simulación y realidad virtual:** Para este método se realiza modelado en 3D, simulación de escenarios lumínicos, los cuales se complementan con realidad virtual, lo cual permite una evaluación de apreciación [18], [19].

Un enfoque integral y el uso de múltiples parámetros son un factor clave al momento de realizar un diseño lumínico sostenible y en donde el usuario final sea el beneficiario.

2.1.5. Diagramas de Voronoi

Los diagramas de Voronoi son formas geométricas las cuales permiten dividir un espacio en distintas regiones y toman en consideración la distancia mínima que existe en un conjunto de puntos nombrados como sitios. Cada espacio contiene una serie de puntos, los cuales están cerca de un sitio determinado, por lo que estos diagramas resultan ser una técnica muy eficaz al momento de analizar y optimizar distribución espacial.

Los diagramas de Voronoi son una herramienta muy utilizada en el ámbito de la ingeniería, ciencias de la computación y análisis de territorio, esto debido a su fácil segmentación del espacio, permitiendo evaluar de forma eficaz áreas de influencia. Voronoi es importante al momento de colocar sensores, esto debido a que los diagramas permiten identificar zonas de manera precisa, las cuales serán ocupadas por cada sensor, evitando así superposiciones de dispositivos y áreas en las cuales no se tenga el control para monitorear.

En iluminación inteligente, Voronoi es una herramienta útil, ya que permite modelar el caso de estudio como un grupo en el cual cada grupo representa la influencia de cada sensor. Esto permite determinar cuántos sensores se va a necesitar en todo nuestro modelo de estudio; además, se conoce la distribución espacial y las áreas en las cuales el sensor no tiene alcance.

Toca tomar en cuenta que, al hablar de optimización, es importante mencionar la mejora de cobertura, ya que este es uno de los principales desafíos al momento de manejar sensores inalámbricos, y para este tipo de casos lo que se busca es maximizar el área que se monitorea con la menor cantidad de sensores y una reducción en el consumo energético. Es por lo que los diagramas de Voronoi son una herramienta indispensable para este tipo de problemas, permitiendo el ajuste de los sensores de manera óptima.

Algunas aplicaciones y ventajas de este tipo de diagramas son los siguientes:

- Optimización en cobertura y conectividad: El hacer uso de diagramas de Voronoi permite identificar de manera exitosa un agujero de cobertura y reubicar los sensores en otra posición eficiente respecto al área que ocupa el sensor, sin que la conectividad se vea [20].
- Despliegue en ambientes complejos: Con los diagramas de Voronoi se han realizado algoritmos, en los cuales sirven para ambientes interiores en 3D, áreas subacuáticas y lugares con obstáculos; esto permite que los modelos sean más adaptativos, facilitando la mejora de eficiencia y robustez [21], [22].
- Reducción de energía y balance de carga: Al hacer uso de Voronoi en clúster heads y distribución equitativa entre nodos, el aporte que tiene esto es permitir que la vida útil de la red se extienda y se reduzca el consumo eléctrico [23], [24].
- Soporte de técnicas avanzadas: El uso de Voronoi tiene una gran ventaja, ya que se integra de manera sencilla con algoritmos de optimización, lo cual es válido para sensores móviles o escenarios dinámicos [20], [25].

2.1.6. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son una manera en la cual ayudan a la búsqueda y optimización, teniendo como principio la evolución biológica. El funcionamiento de este algoritmo maneja conceptos como selección natural, cruce, mutación y adaptación, el principal objetivo de dicho algoritmo es encontrar soluciones óptimas para problemas complejos. La técnica inicia con un grupo poblacional de solución candidata, la cual sigue evolucionando mientras siguen pasando las generaciones, a medida que las generaciones siguen pasando, mejora de manera progresiva su calidad.

El algoritmo genético tiene varias etapas. Primero, se produce un número de poblaciones aleatorias con posibles soluciones. Luego, cada individuo se evalúa de forma individual con una función de aptitud, la cual permite conocer si el individuo es apto para resolver problemas. Una vez obtenida esta evaluación, se selecciona a los individuos más aptos, los cuales serán combinados mediante operadores de cruce, y en ocasiones se realizan mutaciones aleatorias, permitiendo tener variabilidad. Este proceso se repite indefinidas veces hasta llegar a cumplir un criterio de convergencia.

En el ámbito de la ingeniería, este algoritmo se utiliza para resolver problemas de optimización en donde existe un gran número de variables de forma independiente, como ubicación óptima de sensores, asignación de recursos de manera eficiente. Este algoritmo tiene la capacidad de gestionar numerosas soluciones, por lo que se convierte en una herramienta excelente para problemas de optimización avanzada.

Conociendo el principal uso de este algoritmo, se deben mencionar los principales enfoques y avances que se tienen al momento de realizar optimización en sensores.

- El uso de algoritmos genéticos lo que permite es reducir zonas en las que no existe cobertura, permitiendo una mejora en la red basándonos en el aumento de generaciones, por lo que estos cambios se observan en planos y redes inalámbricas.
- A partir de este método se han desarrollado múltiples variantes como codificación decimal, operadores de mutación forzada y codificación triple estructura, teniendo un gran impacto en la convergencia, reducción de duplicado de genes y optimización continua.

- En lo estructural, los algoritmos genéticos tienen ciertas combinaciones con criterios de energía modal y criterio de aseguramiento modal, lo cual permite encontrar ubicaciones óptimas, las cuales maximizan información dinámica y modal.
- Al hacer uso de enfoques multicriterio, se pueden garantizar múltiples criterios y configuraciones óptimas ante eventos o cambios abruptos.

2.1.6.1. Algoritmo genético en redes de sensores

El uso de algoritmos genéticos en redes con sensores tiene una gran ventaja respecto a otro tipo de métodos metaheurísticos, siendo así de gran ayuda para la optimización de redes con sensores, logrando cubrir más el área en la cual se van a colocar cada uno de los sensores, además de reducir el solapamiento y utilizar el recurso de todos los nodos propuestos [26].

2.1.6.2. Algoritmos híbridos en optimización de sensores

Para tener una mejor optimización en redes con sensores, no siempre se deben basar en un solo algoritmo para su trabajo, sino que existe la combinación de algoritmos, denominados también como algoritmos evolutivos híbridos, los cuales han tenido una mejora significativa en la cobertura, eficiencia energética y robustez para redes con sensores. Algunas combinaciones de algoritmos híbridos son las siguientes: algoritmo genético+PSO, híbridos multiobjetivo (AG+DE+PSO) y, finalmente, WOA-GA [27], [28], [29].

2.2. Antecedentes de investigaciones relacionadas

En este apartado se presentan investigaciones relacionadas con el tema principal, el cual permite conocer de manera más científica los resultados que se han obtenido en diferentes contextos académicos.

2.2.1. Sistema de iluminación inteligente

En los últimos tiempos, los sistemas inteligentes juegan un papel fundamental dentro de las técnicas de eficacia energética en distintos espacios de circulación de personas. Los mencionados sistemas se distinguen por poseer sensores, dispositivos de comunicación y algoritmos, los cuales funcionan mediante la adaptación del nivel de iluminación artificial, dependiendo así de variables como ocupación, disponibilidad de luz natural y adaptación al usuario [30].

Diferentes estudios asemejan que la iluminación representa una parte del consumo eléctrico en edificios, excepcionalmente en instituciones educativas y áreas de oficina. Conociendo este contexto, se dice que la automatización mediante sensores es una buena opción para reducir el despilfarro energético en luminarias que se encuentran encendidas y en espacios desocupados. La literatura presenta una gran variedad de beneficios alcanzados en sistemas de iluminación que cuentan con arquitecturas de control y sistemas de gestión energética [30].

2.2.2. Tecnología para sensores y obtención de datos

Para sistemas de iluminación inteligente se emplea una gran variedad de sensores; los sensores más comunes son de iluminación, ocupación y movimiento. Los sensores de iluminación se utilizan para aprovechar la luz natural, pudiendo efectuar ajustes en los niveles de iluminación artificial. Por otro lado, los sensores de ocupación se basan en tecnología infrarroja pasiva (PIR), detectando la presencia de personas [6].

Varios estudios reportan dificultad en los sensores PIR, ya que estos sensores tienen limitaciones al momento de detectar ocupantes estáticos. Para disminuir este problema, lo que se ha propuesto son soluciones híbridas, las cuales permiten combinar varios sensores con el sensor PIR, mejorando la factibilidad del sistema. Adicionalmente, las últimas investigaciones realizadas incorporan sensores aptos para medir corriente, voltaje, potencia activa y consumo, logrando evaluar de manera precisa los indicadores energéticos asociados al sistema [6].

Acerca de la comunicación, las soluciones que se utilizan son inalámbricas, basadas en protocolos como ZigBee, Lora y Lot, estas soluciones se las toma en cuenta debido al bajo consumo energético que generan y la facilidad en su instalación. Las tecnologías

mencionadas son una ventaja al momento de realizar la instalación, ya que permiten reducir costos e invasión de lugares de difícil acceso [31], [32].

2.2.3. Metodologías de ubicación óptima de sensores

La ubicación óptima de sensores es un tema crítico, el cual busca un mejor desempeño en el tema energético y funcional en los sistemas de iluminación. La literatura científica aborda tres puntos importantes para abordar la problemática: métodos analíticos y determinísticos, técnicas de optimización y enfoque basado en IA [33].

Los métodos de análisis tienen un fundamento matemático de distribución, tomando en consideración geometría del espacio, posición de luminaria y dimensiones de la superficie. Dichos enfoques permiten colocar ubicaciones preliminares de los sensores, aunque la precisión del sensor no suele ser correcta debido a las limitantes del entorno [34].

Según la literatura reciente, los enfoques basados en optimización suelen ser idóneos para este tipo de casos de estudio. Algoritmos como PSO, genéticos, programación lineal y metaheurística avanzada permiten encontrar de manera óptima la ubicación del sensor, teniendo restricciones de iluminancia mínima, uniformidad y confort visual. Los resultados que se obtienen al hacer uso de estos algoritmos muestran una superioridad respecto a las configuraciones recomendadas por el fabricante [35].

Para finalizar, los enfoques basados en datos y aprendizaje han sobresalido en los últimos tiempos. Dichos métodos hacen uso de modelos predictivos y sensores virtuales, los cuales hacen uso de un número reducido de sensores físicos, llegando a reducir costos y complejidad del sistema [33], [35].

2.2.4. Indicadores energéticos y métricas

El desempeño en sistemas inteligentes se ejecuta mediante indicadores energéticos y métricas de desempeño. Entre los indicadores más comunes y utilizados se tienen el consumo de energía eléctrica, potencia activa y perfiles de demanda; estos indicadores, por lo general, vienen expresados en términos absolutos o normalizados por área. Los

indicadores que se mencionan anteriormente lo que permiten es cuantificar las estrategias de control [36].

Asimismo, se hace uso de métricas en el sistema de iluminación; algunas de estas métricas son niveles de luminancia, uniformidad lumínica y eficiencia del aprovechamiento de luz natural. En casos de estudio, dichas métricas se evalúan mediante normativa; una norma muy usada es la UNE 12464-1. Dicha normativa lo que permite es conseguir un ahorro energético sin necesidad de afectar el confort visual de los usuarios [36], [37].

Los indicadores claves de desempeño (KPIs) permiten comparar diferentes configuraciones de sensores y estrategias. Sin embargo, en trabajos publicados señalan inconformidad entre el ahorro energético evaluado y valores medidos de forma experimental, lo que implica realizar otras evaluaciones de manera estandarizada [37].

2.2.5. Estrategias de control y arquitectura

Las estrategias que se emplean en los sistemas de iluminación son necesarias, ya que estas influyen en la manera en que los niveles de ahorro energético se alcanzan. El planteamiento se basa en reglas simples, como el encendido o apagado mediante un interruptor en función de la ocupación. Dichos métodos se consideran fáciles en la implementación, pero sufren limitaciones grandes frente a condiciones variables y patrones de uso cambiantes [6].

Al contrario, los sistemas de control adaptativo y distribuido han dado como resultado un mejor desempeño de energía. La arquitectura dispersada permite que cada nodo tome decisiones de manera individual sin afectar el sistema en general. De igual manera, el uso de estrategias mixtas, las cuales combinen detección de ocupación y aprovechamiento de luz natural, reporta un ahorro energético que va del 70-95% en comparación con otros sistemas [38].

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo aplicado, ya que tiene como finalidad resolver un caso de estudio real en el cual se aborda un tema importante en relación con la optimización del consumo de energía eléctrica mediante la ubicación óptima de sensores de presencia en aulas del Bloque H de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito. De igual manera, la investigación se considera de tipo descriptivo, debido a que se analizan en detalle las características físicas, espaciales y de energía en el entorno sin que se alteren los espacios en donde se va a colocar cada uno de los sensores. El enfoque es cuantitativo, esto debido a que el estudio que se realiza se sustenta en recolección y análisis de datos numéricos como dimensiones del espacio, distancias geométricas y valores energéticos. Finalmente, el trabajo responde a un diseño no experimental y transversal, puesto que no se va a maniobrar variables, pero la información se obtiene en un tiempo determinado.

3.2. Enfoque de investigación

El enfoque es cuantitativo, debido a la obtención, procesamiento y análisis de información medible. Esta información permite caracterizar el comportamiento del sistema de iluminación. Para ello, se emplean herramientas de simulación geométrica y cálculos energéticos, los cuales se relacionan objetivamente entre sí, tanto en la distribución de sensores como en el consumo de energía.

Este enfoque permite obtener resultados reproducibles y verificables asociados al desempeño del sistema de control de iluminación, orientados a la optimización del consumo energético mediante el uso de sensores de presencia. Es importante mencionar que el estudio no contempla el rediseño del sistema de iluminación ni la evaluación fotométrica detallada de los espacios analizados. Las luminarias existentes, su disposición y potencia instalada se mantienen constantes durante el análisis.

Conociendo este contexto, la investigación se centra en la optimización de control del sistema de iluminación y la evaluación del impacto energético, asegurando que las condiciones de la calidad de iluminación y confort visual previamente establecidas se mantengan sin ningún tipo de alteración, de acuerdo con la normativa aplicable.

3.3. Diseño de investigación

Para el apartado del diseño adoptado, la investigación se clasifica como no experimental, dado que no se modifican ni manipulan las condiciones del ambiente, sino que tendrá un análisis basado en datos reales. Además, se clasifica como tipo descriptivo debido a que se detalla la distribución geométrica del espacio y el área que cubren los sensores en conjunto con sus indicadores energéticos.

A su vez, tiene un enfoque transversal, esto debido a que se recoge un cierto número de datos en un único periodo para la elaboración del modelo. Para finalizar, la investigación presenta un carácter aplicado, orientado a resolver un problema mediante técnicas de optimización.

3.4. Área de estudio

El área en donde se va a realizar el estudio corresponde al Bloque H del Campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana, la cual tiene áreas destinadas a actividades docentes. Dicho bloque cuenta con aulas de tamaños medianos, pasillos de circulación y áreas en las que se requiere una gestión de iluminación adecuada, con el fin de garantizar condiciones adecuadas de uso y eficiencia energética. Para el análisis se utilizará el plano arquitectónico y eléctrico proporcionado por la universidad, el cual cuenta con las dimensiones, distribución integral y elementos para modelar geoméricamente.

La elección del Bloque H se hizo debido al uso frecuente dentro de actividades académicas, generando así un gran consumo energético debido al sistema de iluminación. El entorno del bloque H es un excelente espacio para evaluar la aplicación de sensores de presencia y validar la metodología basada en diagramas de Voronoi, permitiendo una optimización en sistemas de iluminación mediante el Algoritmo Genético.

3.5. Población y muestra

La población elegida para nuestro caso de estudio está conformada por los espacios con los que cuenta el Bloque H, en los cuales se incluyen aulas, corredores, entre otros. Para evaluar el estudio, la muestra se constituye por las aulas, las cuales permiten la aplicación del modelo de optimización, esto debido a que son zonas utilizadas por la comunidad universitaria y permiten evaluar de manera peculiar la eficiencia del sistema de sensores de presencia. La muestra se elige de manera deliberada, considerando que esta zona es uno de los puntos con mayor consumo energético del Bloque H.

3.6. Técnicas e instrumentos

El uso de herramientas que se utilizará para dicha investigación se basa en técnicas de análisis geométrico, simulaciones y evaluación de recursos energéticos. Entre los instrumentos utilizados tenemos el plano arquitectónico y eléctrico del Bloque H proporcionado por la institución, software para la simulación y construcción de diagramas de Voronoi y algoritmo de optimización, y hojas de cálculo en Excel, las cuales nos permitirán realizar el análisis de indicadores energéticos. Además, se hace uso de métodos para medir distancias del plano, lo cual facilita tener una representación exacta de cada uno de los espacios.

3.7. Sensor propuesto

Para desarrollar la metodología propuesta, se toma en consideración sensores de presencia con tecnología wifi; dichos sensores permiten detectar la presencia de personas a partir de señales inalámbricas generadas por el movimiento. La detección de este sensor es muy efectiva, ya que permite identificar la ocupación de un espacio sin necesidad de contacto ni líneas de visión, por lo que la implementación de este sensor lo hace idóneo en entornos educativos [39], [40].

Los sensores mencionados tienen muchas ventajas a diferencia de los sensores convencionales; algunas de estas ventajas son la facilidad de instalación, la comodidad de poder enlazarse con sistemas inteligentes y escalar a niveles grandes. Además, el tipo

de sensores tiene la ventaja de utilizar varias tecnologías de control, como plataformas, domótica e interacción mediante comandos de voz, permitiendo convertir edificaciones sencillas en inteligentes [40], [41].

Para el presente caso de estudio, el sensor se considera como un componente de control, lo cual permite encender y apagar la iluminación en función de la ocupación del aula, mejorando la reducción de energía y el uso de electricidad, sin necesidad de afectar las actividades académicas.

3.8. Procedimiento general

Con la finalidad de sintetizar y facilitar el proceso metodológico aplicado en el caso de estudio, se presenta un flujograma en el cual se resumen las principales etapas seguidas desde la recopilación de información hasta la evaluación de indicadores energéticos y, finalmente, la obtención de resultados.

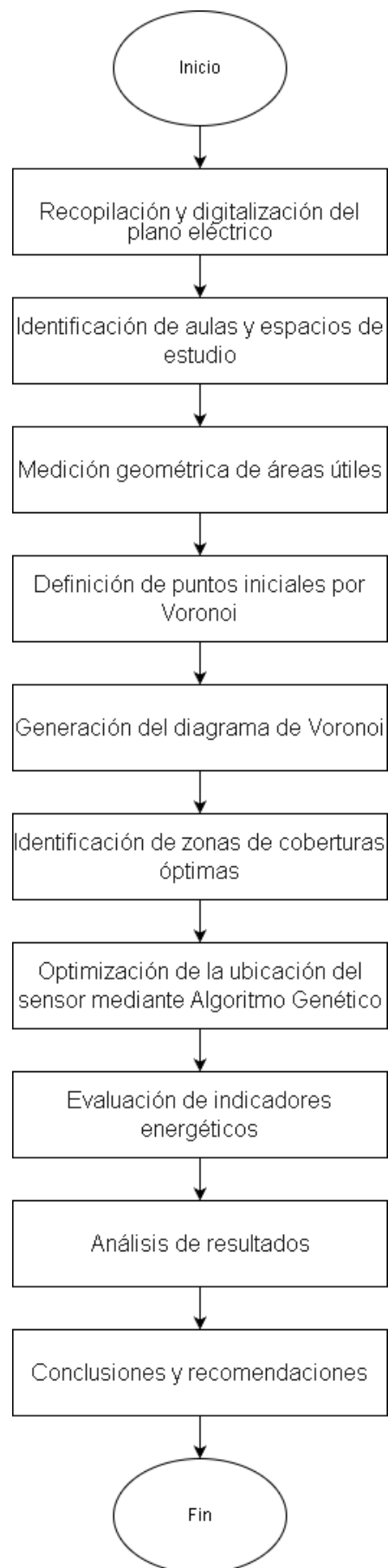


Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología

El diagrama de flujo muestra de manera resumida y secuencial el procedimiento metodológico seguido en el estudio, evidenciando la integración de herramientas geométricas, algoritmos de optimización y análisis energético, el cual permite la evaluación del sistema de iluminación.

3.9. Metodología basada en diagramas de Voronoi

La metodología principal, la cual se va a utilizar en este caso de estudio, se basa en diagramas de Voronoi, siendo una herramienta geométrica que permite dividir los distintos espacios dependiendo de sus distancias mínimas, las cuales generan un conjunto de puntos. Dado un conjunto como se muestra en la ecuación (1).

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (1)$$

En el cual cada punto p_i se define como una celda de Voronoi.

$$V(p_i) = \{x \in R^2: d(x, p_i) < d(x, p_j), \forall j \neq i\} \quad (2)$$

Donde la distancia euclidiana se define como:

$$d(x, p_i) = \sqrt{(x_x - p_{ix})^2 + (x_y - p_{iy})^2} \quad (3)$$

Para este estudio, p_i lo que representa es la ubicación de los sensores. La división que se tiene permite identificar zonas en las cuales no puede llegar el sensor y su respectivo análisis de cobertura espacial.

Para poder seleccionar la ubicación óptima de los sensores, se aplica criterios geométricos, como se muestra a continuación.

- Minimización de distancia entre usuarios y sensores.

$$\min\left(\frac{1}{A}\int_A d(x, p_i)dx\right) \quad (4)$$

- Maximización de cobertura dentro del rango del sensor.

$$\max(\text{Area}(V(p_o) \cap Z_i)) \quad (5)$$

Donde Z_i es la detección del sensor i

Sabiendo un poco del funcionamiento de este algoritmo, se sabe que al colocar un punto dentro de nuestro diagrama representa una ubicación potencial de un sensor, y las celdas de Voronoi lo que permiten es definir la zona en donde el sensor tendría una mayor incidencia en el área establecida.

El hacer la aplicación del método de Voronoi en las instalaciones del Bloque H nos permite realizar una evaluación de manera más exacta de la distribución espacial e identificar las zonas en donde los sensores no lleguen a tener suficiente cobertura o coincidan en el mismo punto. Por ello, se utiliza un software que ayuda a generar celdas en función de las medidas reales del plano.

El uso de esta metodología simplifica la toma de decisiones al momento de ubicar de manera óptima sensores de presencia dentro de las instalaciones, basándose en criterios geométricos objetivos, mejorando la eficiencia en sistemas de iluminación.

3.10. Metodología basada en Algoritmos Genéticos

El método de algoritmos genéticos consiste en una técnica de optimización, la cual tiene como inspiración procesos evolutivos, siendo de gran utilidad en problemas de búsqueda y distribución espacial. En donde existe una población inicial, la cual genera varias

soluciones; dichas soluciones van evolucionando mediante operadores de selección, cruce y mutación.

A continuación, se muestra la ecuación de la población.

$$p^{t+1} = Mutacion(Cruce(Seleccion(P^t))) \quad (6)$$

Para el caso de estudio en el cual es la ubicación de sensores, se plantea una función auxiliar de distancia, la cual permite cuantificar la cercanía entre la posición del sensor y un punto de referencia dentro del aula. Dicha función se utiliza como uno de los componentes geométricos dentro de la función objetivo multicriterio del algoritmo genético. La siguiente fórmula se expresa de la siguiente manera.

$$f(x, y) = -\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad (7)$$

Donde:

- $f(x, y)$ = Función de posición del sensor.
- (x, y) = Coordenadas del sensor.
- X_c, Y_c = Coordenadas del punto de referencia.

Aunque su aplicación puede ser de gran utilidad al momento de realizar una comparativa de configuraciones o mejorar la ubicación de sensores. Su incorporación obedece a la necesidad de mantener coherencia con la propuesta inicial del proyecto, permitiendo el desarrollo y evaluación dentro del análisis de resultados.

Para culminar con esta sección, se presentan los procesos en la **Figura 2** por los cuales pasa el algoritmo genético hasta encontrar la ubicación óptima dentro del área a analizar.

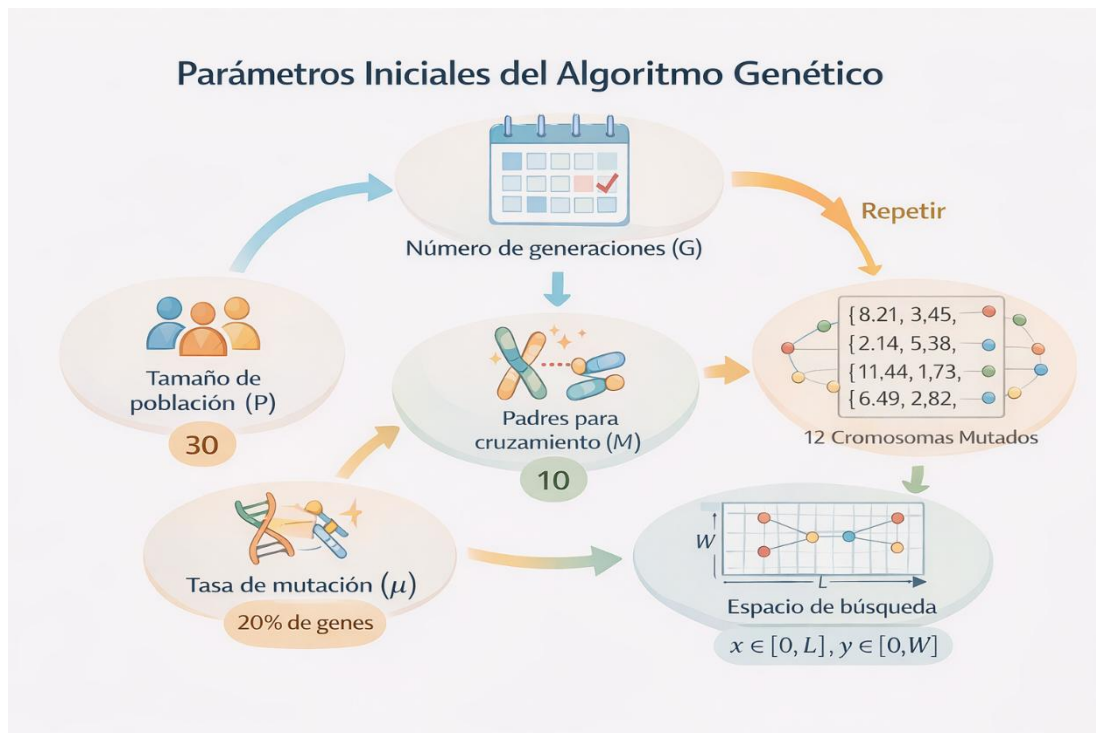


Figura 2 Proceso del algoritmo genético

3.10.1. Función objetivo multicriterio con criterio energético

La función objetivo para el algoritmo genético se formuló como un problema de optimización multicriterio, en donde se prioriza la cobertura espacial del aula por parte del sensor de presencia. Además de criterios geométricos, se hizo la incorporación de un criterio energético indirecto (proxy), con la finalidad de relacionar la ubicación del sensor con el desempeño energético del sistema.

La cobertura se define como la fracción de punto de muestreo del aula, la cual se encuentra en un radio efectivo de detección, fijado en $R=6$ m. Una mayor cobertura implica zonas las cuales el sensor no pueda detectar presencia y, por lo tanto, una reducción del tiempo innecesario de encendido del sistema de iluminación bajo criterios de control.

El radio efectivo de detección se fijó en $R=6$ m, valor representativo del alcance típico de sensores de presencia basados en tecnologías inalámbricas Wifi en ambientes interiores. Este valor se seleccionó de manera conservadora y coherente con las dimensiones geométricas del aula analizada, permitiendo modelar la capacidad de detección del sensor

sin asumir una cobertura total irreal del espacio. El parámetro R se emplea exclusivamente para la evaluación geométrica de cobertura dentro del proceso de optimización y no corresponde a una medición experimental directa.

Sabiendo este contexto, el criterio energético se presentó mediante un indicador proxy proporcional a la fracción no cubierta (1-Cobertura). De esta manera, zonas no cubiertas por el sensor se asocian a un mayor tiempo esperado de encendido de las luminarias y, por tanto, a un mayor consumo energético estimado.

La función aptitud se expresa de la siguiente manera:

$$Fitness(x, y) = W_{conv} * Cobertura + W_{dist} * f_{dist} - W_{eng} * (1 - Cobertura) \quad (8)$$

Donde:

- W_{conv} = Peso para priorizar cobertura espacial.
- $f(dist)$ = Distancia promedio a los puntos de muestreo.
- W_{eng} = Criterio energético indirecto.

Los pesos fueron asociados a la función aptitud fueron definidos con base a la prioridad de los criterios del problema de optimización. Se asignó un mayor peso a la cobertura espacial W_{conv} , dado que la correcta detección de presencia en las zonas de ocupación constituye el objetivo principal de estudio.

El criterio geométrico de distancia promedio se incorporó con un peso intermedio W_{dist} con la finalidad de regularizar la solución y evitar ubicaciones extremas del sensor dentro del espacio.

Finalmente, el criterio energético indirecto se ponderó con un peso menor W_{eng} , debido a que representa un indicador proxy y no un cálculo directo del consumo energético en

unidades de energía. Su función principal es penalizar zonas no cubiertas, las cuales podrían generar encendidos innecesarios del sistema de iluminación.

La selección de estos pesos corresponde a un criterio de diseño del modelo y busca garantizar la convergencia del algoritmo hacia soluciones físicamente coherentes y consistentes con los objetivos planteados.

Cabe señalar que la función objetivo implementada en el algoritmo no calcula de manera directa el consumo energético del sistema en unidades de energía (kWh). Sin embargo, al optimizar la cobertura óptima del sensor de presencia, variable que influye directamente en el tiempo real de encendido de las luminarias Ton. Dicho tiempo posteriormente es empleado en la simulación dinámica para el cálculo del consumo energético con sensores, estableciendo una relación entre el proceso de optimización geométrica y el análisis energético.

En consecuencia, el algoritmo genético maximiza la cobertura espacial con el objetivo de minimizar el tiempo esperado de operación del sistema de iluminación, estableciendo una relación directa entre la optimización geométrica y el análisis energético desarrollado en el capítulo de análisis de resultados.

3.11. Indicadores energéticos

Para el análisis energético se toma en consideración indicadores energéticos como el consumo eléctrico en kWh, densidad de potencia por metro cuadrado, patrones de uso y reducción al utilizar sensores de presencia. Dichos indicadores se calculan mediante hojas de Excel y valores de referencia establecidos según normativa de eficiencia energética.

Las expresiones matemáticas de dichos indicadores se basan en literatura científica y referencias técnicas reconocidas en el entorno de la eficiencia energética en sistemas de iluminación [42].

3.11.1. Consumo energético actual

$$E_{actual} = \frac{P_{inst} * t_{uso}}{1000} \quad (9)$$

3.11.2. Consumo energético con sensores

$$E_{propuesto} = \frac{P_{inst} * t_{opt}}{1000} \quad (10)$$

3.11.3. Ahorro energético (%)

$$\%A = \left(\frac{E_{actual} - E_{propuesto}}{E_{actual}} \right) * 100 \quad (11)$$

3.11.4. Densidad de potencia por área

$$DPA = \frac{P_{inst}}{Area} \quad (12)$$

3.11.5. Índice de potencia por persona

$$Ip_p = \frac{Pot_{instalada}}{No_{personas}} \quad (13)$$

3.11.6. Consumo energético por área

$$CE = \frac{E_{mensual}}{Area} \quad (14)$$

Una vez obtenidos los resultados del análisis, se realiza una comparativa entre la situación actual y la mejorada para determinar el impacto del diseño en términos de ahorro energético y mejora del sistema de iluminación.

3.12. Parámetros técnicos y reproducibilidad

Con la finalidad de garantizar la reproducibilidad técnica en el estudio, se establece de manera explícita los parámetros y criterios utilizados en la simulación dinámica del sistema de iluminación. Dichos parámetros permiten que el modelo pueda ser replicado en condiciones similares y que los resultados sean comparables.

3.12.1. Resolución temporal de simulación

- Paso temporal: 1 minuto.
- Horizonte de simulación: Jornadas de 10 y 12 horas, de acuerdo con tiempos de uso para cada escenario.

3.12.2. Parámetros del sistema de detección

- Tipo de sensor: sistema de detección de presencia basado en conectividad Wifi.
- Modo de operación: detección binaria de presencia (ocupado/no ocupado).
- Fuente de detección: identificación de dispositivos activos dentro del aula.
- Alcance efectivo: limitado al área física del aula analizada $R=6$.
- Tiempo de retardo para apagado automático: 5 minutos.

3.12.3. Reglas de control del sistema de iluminación

- Encendido rápido de las luminarias cuando el sistema detecta presencia en el aula.

- Mantenimiento del estado encendido durante el tiempo de retardo en ausencia de presencia detectada.
- Apagado automático de las luminarias una vez transcurrido el tiempo de retardo sin detección activa.

3.12.4. Modelo de ocupación

- Representación binaria de la ocupación (1 ocupado, 0 desocupado).
- Patrones de ocupación definidos a partir de horarios académicos.
- Consideración de pausas intermedias entre periodos de clase.

3.12.5. Supuestos y limitaciones

- El sistema de iluminación opera bajo un esquema de encendido y apagado total.
- La detección por wifi se modela como una señal binaria equivalente a la presencia física del aula.
- No se consideran variaciones estocásticas en el número de dispositivos detectados, sino únicamente la condición de presencia o ausencia.

3.13. Simulación dinámica del sistema de iluminación con control de presencia

La finalidad de la simulación es evaluar la reducción del consumo energético que atribuye el sistema de control por presencia, para lo cual se desarrolló una simulación dinámica del sistema basada en patrones de ocupación típicos de las aulas del Bloque H, permitiendo que la disminución del consumo sea consecuencia directa del comportamiento del sistema de control.

3.13.1. Horizonte temporal y resolución de simulación

Para la simulación se considera una resolución temporal de un minuto, lo que permite modelar de mejor manera el comportamiento del sistema de iluminación. Se definieron dos horizontes de simulación, correspondiente a las jornadas de uso identificadas.

- Jornada de 10 horas (600 minutos).
- Jornada de 12 horas (720 minutos).

Los tiempos que se ha tomado se basan en el uso diario del espacio, garantizando coherencia entre el modelo dinámico y los escenarios energéticos a evaluar.

3.13.2. Modelo de ocupación del aula

La ocupación del aula se modeló mediante una variable binaria, en donde el valor “1” representa la presencia de personas y el valor “0” indica que no hay ocupación. Los patrones de ocupación se definieron a partir de los horarios académicos, tomando en consideración periodos de clase y pausas a lo largo del día, lo que permite representar de manera realista el uso del espacio a lo largo de la jornada.

El enfoque del modelo permite evaluar el impacto del uso del aula sobre el comportamiento del sistema de control, sin recurrir a un supuesto constante de operación.

3.13.3. Modelo del sistema de control de presencia

El sistema de control se hizo mediante un modelo de sistema de encendido y apagado automático basado en el sensor de presencia. El comportamiento del sensor se basa en las siguientes reglas.

- Las luminarias se encienden automáticamente al detectar ocupación en el aula.
- En ausencia de ocupación, las luminarias permanecen encendidas durante un tiempo de retardo establecido.
- Una vez superado el tiempo de retardo, las luminarias se apagan automáticamente.

El tiempo de retardo se fijó en un valor de 5 minutos; dicho valor es utilizado en sistemas comerciales de control de presencia, y se mantuvo durante toda la simulación.

3.13.4. Cálculo del factor dinámico de operación

A partir del estado dinámico de las luminarias (encendido/apagado) obtenido en la simulación, se determinó el tiempo efectivo de funcionamiento del sistema. Con dicha información se definió el factor dinámico de operación, expresado como:

$$F_{din} = \frac{T_{on}}{T_{uso}} \quad (15)$$

Donde:

- Ton es el tiempo total de las luminarias encendidas.
- Tuso es el tiempo total de la jornada simulada.

El porcentaje de reducción de tiempo de operación se obtuvo como:

$$R = 1 - F_{din} \quad (16)$$

El valor obtenido a partir de esta ecuación servirá para hallar el tiempo de operación del sistema de iluminación.

3.14. Variables de estudio

Dentro de las variables de estudio contamos con dos tipos: la primera es la variable independiente, la cual responde a la ubicación de los sensores de presencia, mientras que la variable dependiente es la eficiencia energética, la cual se mide a través del consumo eléctrico. Para las variables de control se tienen las dimensiones del aula, cantidad de

luminarias existentes y el uso del espacio; dichos factores son influyentes en los hábitos de comportamiento del sistema lumínico y energético.

CAPÍTULO IV

4. DESARROLLO

4.1. Caracterización general del caso de estudio, Bloque H

Para nuestro caso de estudio, el cual se basa en la ubicación óptima de sensores dentro de las instalaciones del Bloque H de la Universidad Politécnica Salesiana, sabemos que, dicho bloque se constituye por áreas académicas con un gran flujo de tránsito y utilización dentro de la institución. El bloque, el cual será motivo de análisis, está conformado por alrededor de 11 aulas y espacios, en los cuales están destinados para actividades por parte de los docentes y estudiantes. El uso de las aulas del bloque implica que las aulas permanezcan ocupadas durante un gran lapso de tiempo en lo que dura la jornada académica; los horarios que comprenden este uso van de 07h00 hasta 21h00. Esto implica un uso excesivo en los sistemas de iluminación.

El diseño del Bloque H presenta espacios de tamaño mediano, con formas rectangulares de cada espacio y una configuración estándar en el sistema de luminarias instaladas. Cada una de las aulas cuenta con su propia iluminación en número variable, el cual depende de su superficie, por lo que con esto se puede determinar la potencia instalada y el consumo energético. En la actualidad, las luminarias operan mediante un uso manual, es decir, mediante un interruptor de encendido y apagado, lo que ocasiona que las luminarias sigan encendidas incluso en periodos donde no exista ocupación por parte de ningún usuario, generando un incremento del consumo eléctrico de manera inútil.

Mediante un análisis preliminar de las aulas, basado en el plano proporcionado por la universidad, favoreciendo la aplicación de metodologías geométricas para lograr la optimización de sensores de presencia. La igualdad de dimensiones, en conjunto con la forma y patrón de circulación, ayuda a evaluar de manera más precisa la cobertura de detección por parte de los sensores y el ahorro energético que se genera al momento de implementar sistemas de iluminación inteligente.

Es por ello que el caso de estudio en el Bloque H permite evaluar el consumo energético dentro del campus. Al considerarse un espacio académico de uso diario, cualquier

implementación de mejora en su sistema de iluminación representa un ahorro significativo de energía general. La incorporación de sensores, combinado con diagramas de Voronoi como metodología, permite el análisis de la interacción que existe en la geometría del espacio, comportamiento de usuario y consumo eléctrico.

La caracterización del Bloque H se convierte en un gran punto de partida para establecer una base de análisis. Comprender la distribución de aulas, dimensiones, el orden de las aulas, así como los patrones de uso que permitirán un modelo eficiente y fundamental. Es por esto que la metodología propuesta es clave en este caso de estudio, ya que permite evaluar el impacto que tendría al reorganizar el sistema de sensores en la eficiencia energética.

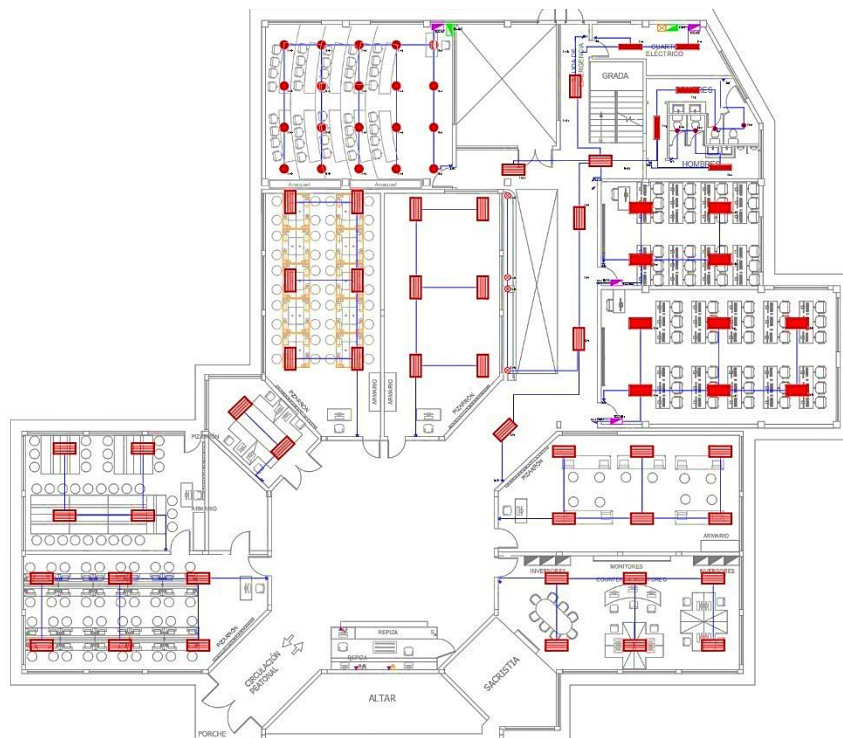


Figura 3 Plano base del caso de estudio

4.2. Selección de aulas y descripción espacial

Para el presente caso de estudio se toma en consideración el espacio del Bloque H, el cual cuenta con un total de 11 aulas en el Campus Sur. Al momento de seleccionar este espacio en donde se encuentran las aulas, se consideraron algunos criterios de representatividad, frecuencia de uso y semejanza en la configuración del sistema de iluminación,

permitiendo así una evaluación de forma general del comportamiento energético de todo el bloque.

Al seleccionar las aulas, nos hemos percatado de que cada una de ellas presenta características espaciales para su comparativa, las cuales se basan en el tipo de geométrica predominante que existe en el espacio, altura del techo similar y distribución uniforme de luminarias en la parte superior del techo. Dichas características facilitan aplicar la metodología para la optimización de la ubicación de sensores, pudiendo así realizar un análisis y comparación de los resultados entre diferentes espacios.

Con el plano eléctrico y arquitectónico proporcionado por la institución, se pudo determinar diferentes características de cada una de las aulas a analizar. Entre las características tenemos: dimensiones principales de cada aula, área útil, número de luminarias instaladas y la potencia total del sistema de iluminación. Esta información es clave para el análisis geométrico mediante diagramas de Voronoi y su respectiva evaluación de indicadores energéticos.

En la **Tabla 2** se muestra un resumen de todas las características principales de cada una de las aulas a considerar para el análisis eléctrico y espacial.

Tabla 2 Características de las aulas

Aula	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	N de luminarias	Potencia por luminaria (W)	Potencia instalada (W)	Uso
No 1	12.91	6.31	81.30	6	32	576	Reuniones
No 2	12.91	6.31	81.30	6	32	576	Enseñanza
No 3	12.96	6.2	80.35	6	32	576	Enseñanza
No 4	12.96	6.2	80.35	4	32	384	Enseñanza
No 5	4.48	3.65	16.35	2	32	192	Reuniones
No 6	12.96	6.1	79.05	6	32	360	Enseñanza
No 7	12.96	6.1	79.05	6	32	360	Enseñanza
No 8	12.60	6.55	82.53	6	60	360	Enseñanza
No 9	8.67	5.5	47.68	4	60	240	Enseñanza
No 10	9.9	8.11	80.28	20	18	360	Enseñanza
No 11	6.1	8.02	49.00	3	60	180	Reuniones

Nota: Las aulas numeradas que van desde el No 1 hasta el No 11 se encuentran en los **ANEXOS 6 y 7**. Además, las características de las luminarias con las que cuenta el Bloque H se encuentran en la **Tabla 10**.

4.3. Preparación de planos para análisis geométrico

Para comenzar con la aplicación del modelo de optimización, fue necesaria una preparación preliminar de los planos civiles y eléctricos del Bloque H del Campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana. Durante esta etapa se pudo transformar la información civil del plano en una representación geométrica, la cual resulta ser adecuada para su respectivo análisis, avalando las dimensiones reales del espacio y el modelo utilizado.

La herramienta que empleamos para realizar este estudio fue el software GeoGebra, debido a su facilidad de manipulación, capacidad de modelado y gratuidad del software. Dicha herramienta permitió la importación del plano digital para así poder realizar operaciones geométricas para un análisis espacial, escalado, delimitación de áreas y ubicación de puntos referenciales.

Como paso inicial, los planos fueron importados en el espacio de trabajo del software GeoGebra en formato de imagen, la cual nos permite reescalar la imagen en una escala real. Para esto, se utilizaron dimensiones conocidas del plano, como el largo y ancho de una de las aulas, permitiendo así que las dimensiones del plano sean iguales a la del espacio real que es objeto de análisis.

Una vez que la escala se encuentre establecida, lo que se realizó fue la delimitación del espacio que, para nuestro caso, es un aula representativa; dicho espacio se representó mediante polígonos cerrados, los cuales van definiendo el área útil. La delimitación permitió aislar cada espacio para facilitar la aplicación del método de segmentación geométrico. De igual manera, se identificó zonas relevantes dentro del aula, como áreas de circulación y posibles obstáculos, los cuales influyen en la cobertura de detección del sensor de presencia.

Seguidamente, se hace la definición de puntos iniciales de referencia en cada una de las aulas; dichos puntos se encuentran ubicados estratégicamente, basándonos en la geometría del espacio y patrones de ocupación deseados. Los puntos que se colocaron estratégicamente representan la ubicación preliminar de sensores de presencia y son la

base para realizar los diagramas de Voronoi que se utilizarán durante este estudio. Es importante resaltar que las ubicaciones preliminares no son la configuración final optimizada, sino que sirven como un preliminar para llegar al punto de optimización.

Para finalizar, una vez los planos se encuentran preparados, ya quedan listos para la aplicación neta de la metodología basada en diagramas de Voronoi y algoritmos genéticos, permitiendo un análisis geométrico preciso y reproducible.

4.3.1. Importación del plano

La importación del plano del Bloque H inicialmente se realizó en el espacio de trabajo de GeoGebra, en donde pasamos de un formato civil y eléctrico a un formato en el eje de coordenadas (X, Y).

A continuación, se muestra la imagen del plano Figura 4.

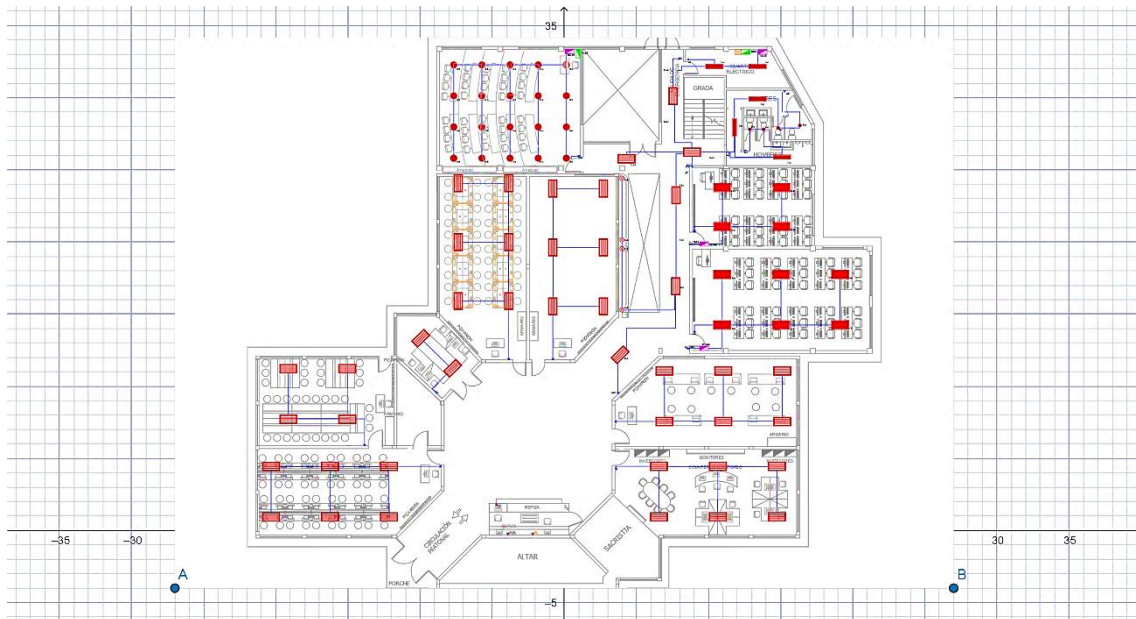


Figura 4 Importación del plano en GeoGebra

4.3.2. Escala real del plano

En este apartado, lo que hicimos fue ajustar el plano a su escala real en GeoGebra mediante dimensiones que se conocen; en este caso, tomamos una muestra del salón de profesores del Bloque H .

A continuación, se muestra la imagen del plano escalado en GeoGebra.

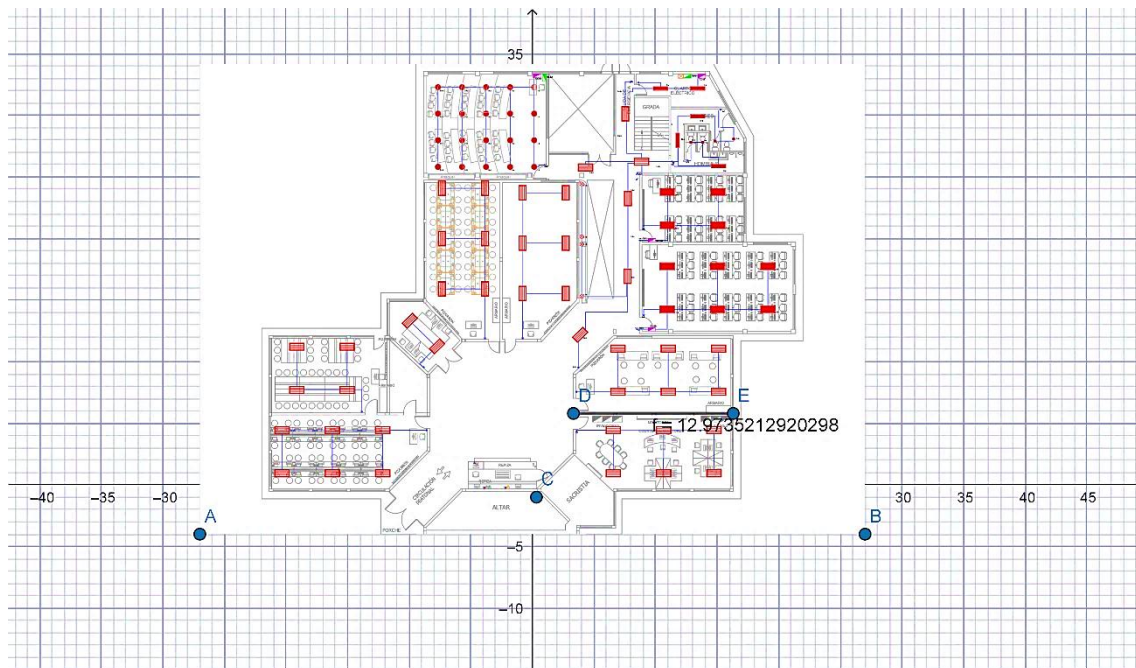


Figura 5 Escala del plano en el aula

4.3.3. Delimitación del área útil del plano

Para realizar la delimitación del área, se tomó en consideración un aula representativa del Bloque H debido a sus características de similitud geométrica y función similar al resto de aulas. Además, el análisis detallado se basará en este espacio, permitiendo que los resultados puedan extrapolarse al resto de aulas.

4.4. Diagramas de Voronoi

En este apartado haremos uso del diagrama de Voronoi, lo cual es un método geométrico que nos permite dividir espacios en distintas regiones de influencia dentro de un conjunto de puntos utilizados aleatoriamente. Conociendo este contexto para sistemas de iluminación inteligente, las áreas que se obtienen usando Voronoi permiten saber cuál sensor es el más cercano, permitiendo analizar la distribución espacial y la cobertura de cada sensor propuesto.

4.4.1. Diagrama de Voronoi en un aula seleccionada

En base a los puntos iniciales de referencia que se definieron en el aula representativa de mayor consumo, se generó el diagrama de Voronoi mediante la utilización del software GeoGebra, el cual cuenta con un listado de comandos extensos, pero en nuestro caso se hizo uso del comando de “Voronoi”. Para proceder con el diagrama, se toman en cuenta los puntos iniciales correspondientes a las posibles ubicaciones de sensores, obteniendo el área geométrica que tiene influencia en cada punto.

Es importante señalar que al hacer uso del diagrama de Voronoi se generan regiones, las cuales se extienden fuera del área de estudio y van hacia el infinito, por lo cual esto es propio al hacer uso de dicha metodología, pero la extensión de esta región no se la debe considerar como tal, ya que el análisis se centró en el polígono que encierra el aula.

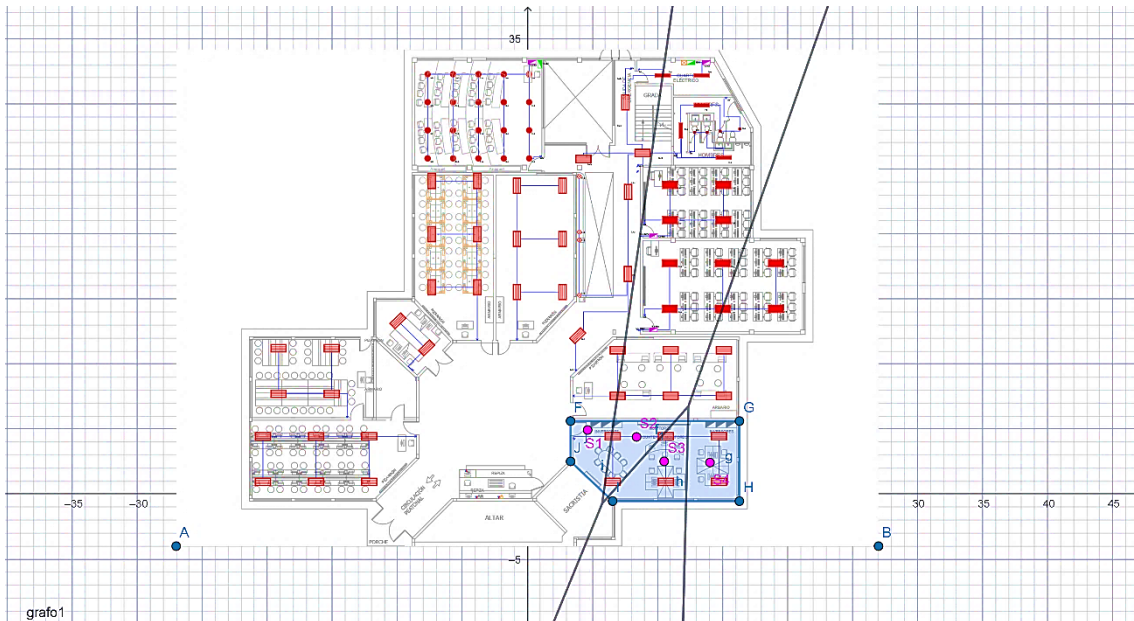


Figura 8 Diagrama de Voronoi en caso de estudio

4.4.2. Limitación del área de estudio considerando el espacio útil

Durante la aplicación del diagrama de Voronoi, se delimitó el área de estudio, que en este caso fue el polígono que define el aula. Por lo tanto, se consideraron únicamente las regiones de Voronoi que se encuentran dentro de dicho espacio, descartando las líneas externas que conforman los límites y no aportan nada en el estudio. A partir de esta limitación, se pudo evaluar de manera más minuciosa la distribución de regiones de influencia en base a la geométrica del aula.

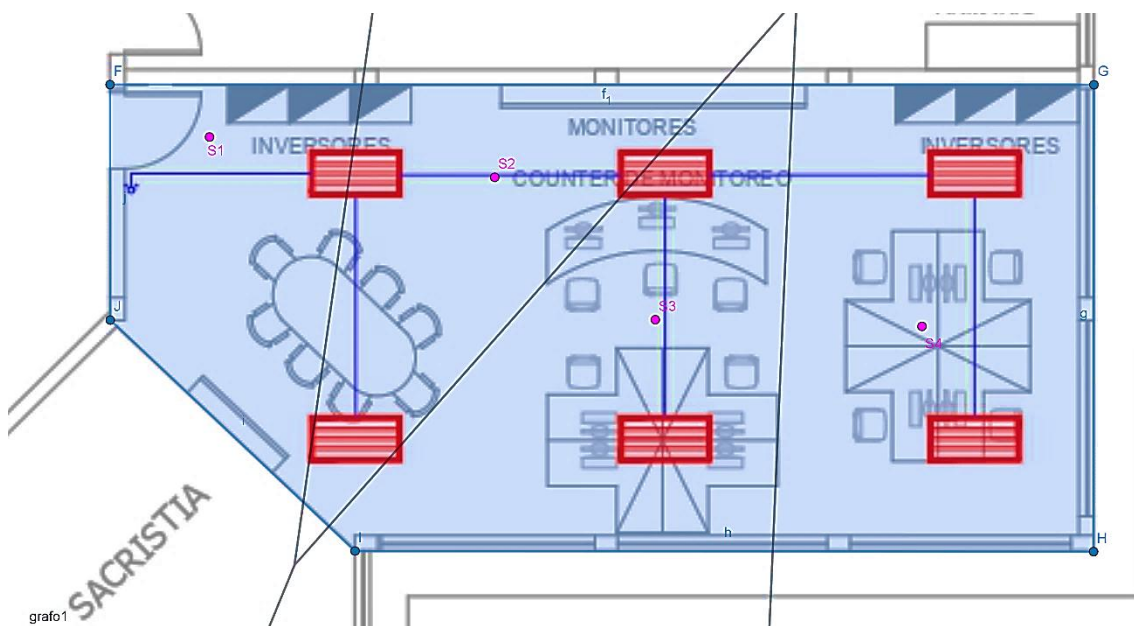


Figura 9 Limitación del caso de estudio

4.4.3. Análisis de regiones de influencia

Una vez conocida cada una de las regiones que se formaron al utilizar Voronoi, se puede realizar una comparativa de la cobertura geométrica en base a cada posible ubicación del sensor. La evaluación consistió en la uniformidad de las regiones que abarca cada posible sensor, permitiendo así identificar zonas con mayor equilibrio de espacio y zonas de baja cobertura. Para este análisis se evidenció las diferencias que existieron en las ubicaciones propuestas, precisamente en espacios como el centro del aula y sus esquinas. Dentro del análisis de las regiones, lo que se pudo observar es que el sensor 3 (S3) y sensor 4 (S4) tienen una mayor cobertura respecto al resto de sensores, siendo que estos dos puntos representan una cobertura más homogénea y equilibrada del espacio, formando así una ubicación óptima preliminar para colocar los sensores de presencia.

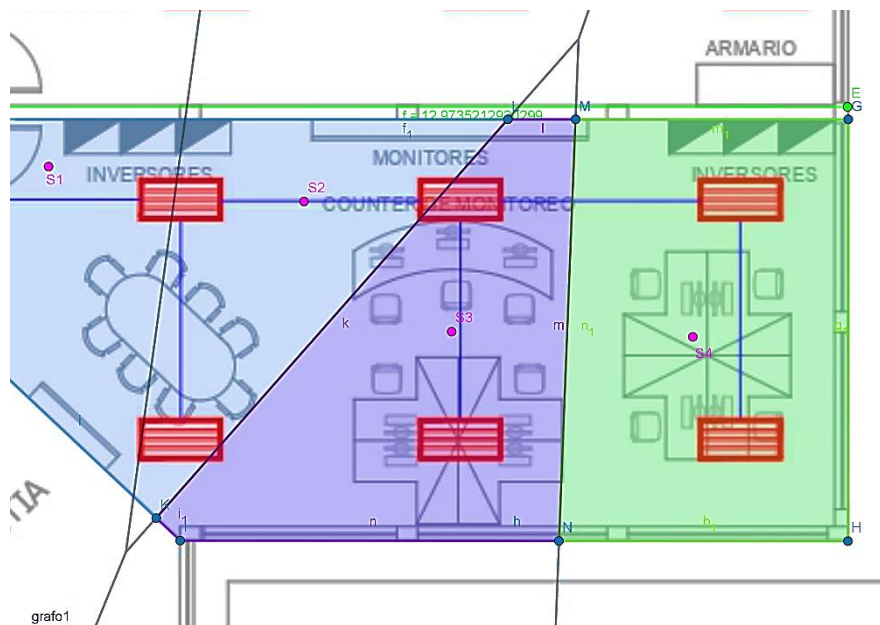


Figura 10 Análisis de regiones de influencia en área seleccionada

4.4.4. Identificación óptima preliminar del sensor

Una vez culminado el análisis comparativo entre las diferentes regiones de Voronoi y sensores, se identificó una ubicación homogénea y eficiente en dicho espacio, correspondiendo a la región más práctica dentro del caso de estudio. Esta solución se lo determino de forma preliminar, ya que servirá como punto de partida para afinar la ubicación del sensor mediante el algoritmo genético y criterios de optimización energética.

A continuación, se muestra la figura en la cual se eligió de manera preliminar el punto óptimo del sensor, pero más adelante se encontrará la ubicación de manera precisa.

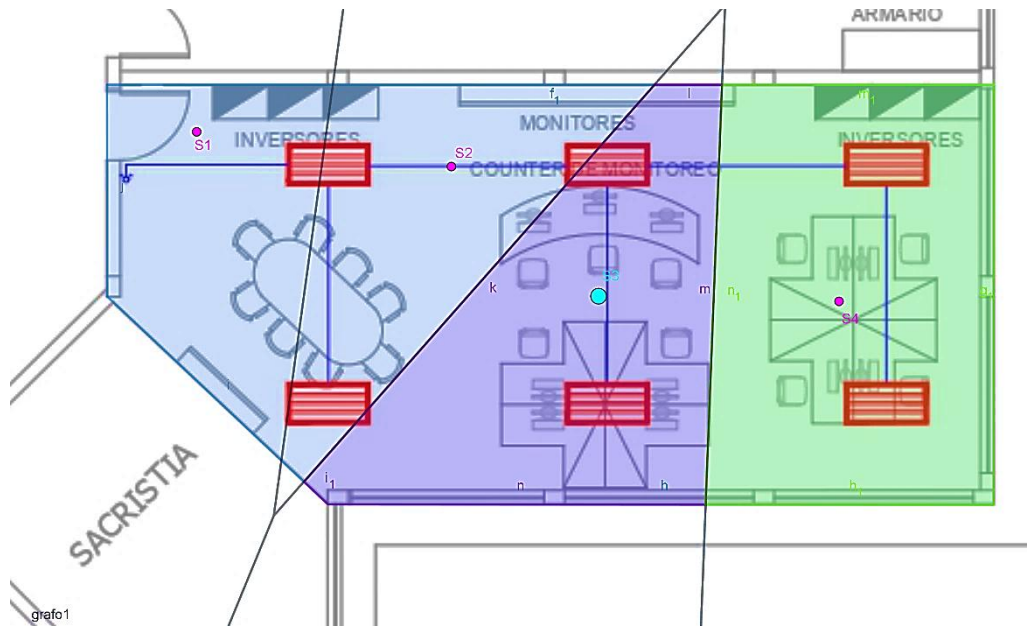


Figura 11 Ubicación óptima preliminar del sensor

4.5. Optimización en la ubicación de sensores mediante Algoritmo Genético

4.5.1. Objetivo de la optimización

En este apartado se desarrolló la optimización para encontrar la ubicación óptima de sensores dentro del área seleccionada, con el propósito de sacar provecho al espacio que se tiene y una mejora en los sistemas de iluminación. Es por esto que se ha empleado un algoritmo genético de optimización, el cual se considera como una excelente herramienta al momento de resolver problemas con un nivel de complejidad alto.

4.5.2. Representación del problema y espacio

Para este caso de estudio, se presentó en forma de plano cartesiano bidimensional, en donde los puntos significan una posible ubicación preliminar del sensor, el cual se define en forma de coordenadas (X,Y). Donde el eje X corresponde al largo y el eje Y al ancho del espacio; estos valores se obtuvieron de acuerdo con dimensiones reales que se proporcionan en los planos.

La delimitación del espacio se basa en las dimensiones físicas del aula, asegurando que las soluciones generadas sean viables dentro del entorno real. De esta manera, se establecieron restricciones geométricas que evitan generar soluciones fuera de área del estudio.

A continuación, se muestra la

Figura 12, en la cual está delimitación del área del caso de estudio en el aula representativa donde se realizará el análisis mediante algoritmo.

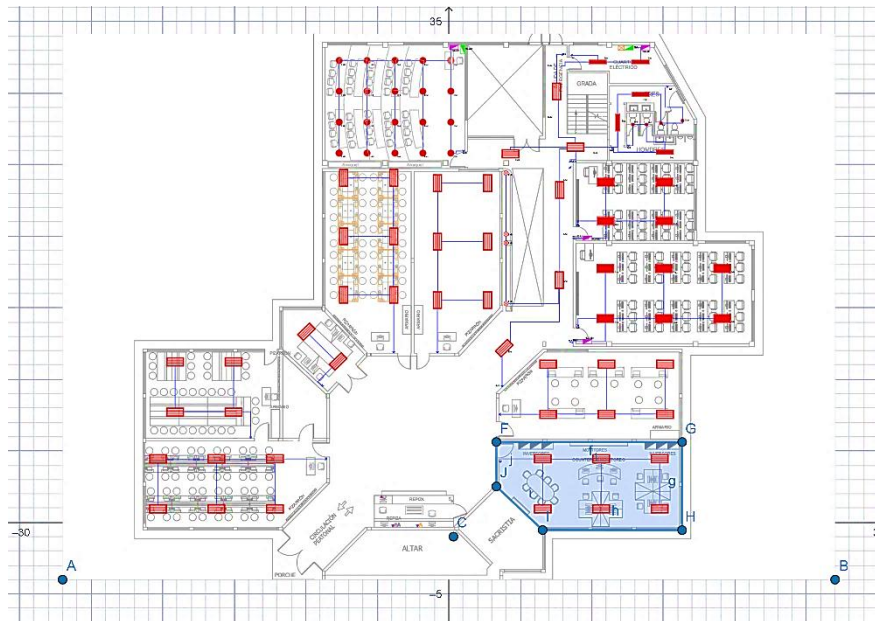


Figura 12 Representación del espacio

4.5.3. Codificación del algoritmo

Para este algoritmo, cada individuo representa una posible ubicación del sensor. La codificación se realizó mediante dos genes, que en este caso toman en cuenta las coordenadas (x, y) del sensor.

Haciendo uso de esta codificación, lo que se logró conseguir es una interpretación simple de las soluciones generadas por el algoritmo, lo cual facilita la interpretación de cada individuo en base a la ubicación espacial. La población inicial se generó de manera aleatoria dentro de la delimitación del espacio, lo cual permitió generar múltiples soluciones durante las primeras generaciones.

4.5.4. Función aptitud

La función aptitud se evaluó considerando criterios geométricos y energéticos de manera conjunta. La cobertura espacial del sensor tuvo una prioridad como criterio principal, mientras que la distancia promedio a los puntos de muestreo se utilizó como criterio secundario para evitar soluciones geométricas indeseables.

$$Fitness(x, y) = W_{conv} * Cobertura + W_{dist} * f_{dist} - W_{eng} * (1 - Cobertura) \quad (17)$$

Adicionalmente, se hizo la incorporación de un nuevo término energético indirecto (proxy), el cual se define como la fracción no cubierta del aula, la cual penaliza configuración con menor desempeño de detección y una mayor probabilidad de consumo innecesario de energía.

4.5.5. Parámetros del AG

El Algoritmo Genético tuvo un lenguaje de programación en Python, en donde se hizo uso de librerías especializadas en optimización evolutiva. Los parámetros que se usaron para este algoritmo fueron tomados en consideración a la precisión de búsqueda y tiempo de cómputo.

Algunos de los parámetros que se tomaron en consideración fueron el tamaño de población, número de generaciones, número de genes por individuo y rangos para cada gen. Los parámetros completos se muestran en la **Tabla 3** y **Tabla 4**, los cuales fueron considerados en base al problema de optimización planificado.

Tabla 3 Parámetros de algoritmo genético

Tamaño de la población	Número de generaciones	Número de genes	Rango de búsqueda gen X, gen Y
30 Individuos	100	2	0-12.91 m 0-6.31 m

Tabla 4 Parámetros del algoritmo genético considerando energía

Radio efectivo del sensor	Peso cobertura	Peso geométrico	Proxy
6 m	0.85	0.10	0.05

4.5.6. Implementación de Algoritmo Genético

En este apartado se determina la ubicación del sensor de presencia dentro de nuestra aula representativa, la cual es objeto de análisis; para ello se hizo uso del algoritmo genético como una manera de optimizar la solución de ubicación requerida dentro del trabajo. El algoritmo tiene una base de principios evolutivos de selección natural, lo que permite la

búsqueda de múltiples soluciones y elegir la solución óptima en problemas con soluciones analíticas.

Para dicho estudio, el algoritmo tuvo uso en la ubicación óptima del sensor en función de la cobertura espacial, tomando en consideración las dimensiones reales físicas del aula y la distribución de posibles puntos de ocupación. Cada solución es un posible candidato a la ubicación del sensor, la cual es representada por coordenadas en (X, Y) del plano, mientras la función aptitud evalúa la calidad de la ubicación.

Con el propósito de comprender el proceso del algoritmo de optimización, en la **Tabla 5** se presenta el algoritmo en detalle con su respectiva descripción, contenido del programa y sus respectivas ecuaciones.

Tabla 5 Pasos para la codificación del algoritmo genético

Paso	Ecuación	
1	Planteamiento del problema $\Omega = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2: 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq W\}$	(18)
2	Codificación cromosoma $s = [X_{sen}, Y_{sen}]$	(19)
	Evaluación geométrica	(20)
	$d_k(s) = \sqrt{(X_k - X_{sen})^2 + (Y_k - Y_{sen})^2}, k = 1, \dots, N,$	(21)
	$d(s) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k(s),$	(22)
3	$f(s) = \frac{1}{1 + d(s)}$	(23)
	$f(s) = \begin{cases} \frac{1}{d(s)}, & \text{si } s \in \Omega, \\ -1000, & \text{si } s \notin \Omega, \end{cases}$	(24)
	Cálculo de cobertura	(24)
4	$C(s) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N c_k(s),$	
	$c_k(s) = \begin{cases} 1, & d_k(s) \leq R \\ 0, & d_k(s) > R \end{cases}$	
	Función objetivo	(25)
5	$Fitness(x, y) = W_{conv} * C(s) + W_{dist} * \frac{1}{1 + d(s)} - W_{eng} * (1 - C(s))$	

Una vez conocidos los pasos y el procedimiento metodológico, se procede a la implementación del algoritmo. El algoritmo genético se lo realizó haciendo uso del

lenguaje de programación Python, debido a su flexibilidad, librerías especializadas para visualizar resultados. Para el algoritmo se utilizó una librería de optimización evolutiva, la cual facilitó el proceso genético sin tener que realizar programación desde cero mediante operadores de selección, cruce y mutación.

Con la finalidad de facilitar la comprensión del proceso de optimización, en la **Figura 13** se muestra de manera resumida las principales etapas del algoritmo genético.

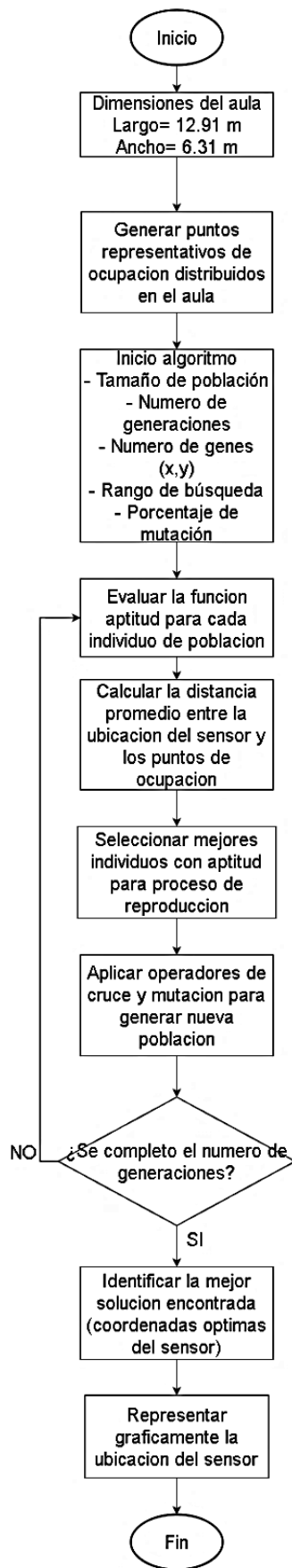


Figura 13 Diagrama de flujo del algoritmo genético

Una vez presentado el flujograma del algoritmo genético, se inicia el desarrollo de las etapas operativas de la parte de optimización. Para empezar, se precisaron las dimensiones del aula seleccionada para analizar, dando así límites de espacio de búsqueda. Posteriormente, se colocó una serie de puntos de manera pareja, los cuales indican espacios de ocupación por parte de los usuarios. Los puntos permiten valorar la cobertura que tiene el sensor y generan un aporte al momento de realizar el proceso de optimización.

En la **Figura 14** se muestra el espacio de búsqueda definido por el algoritmo genético en base a las dimensiones reales del aula que se analizó.

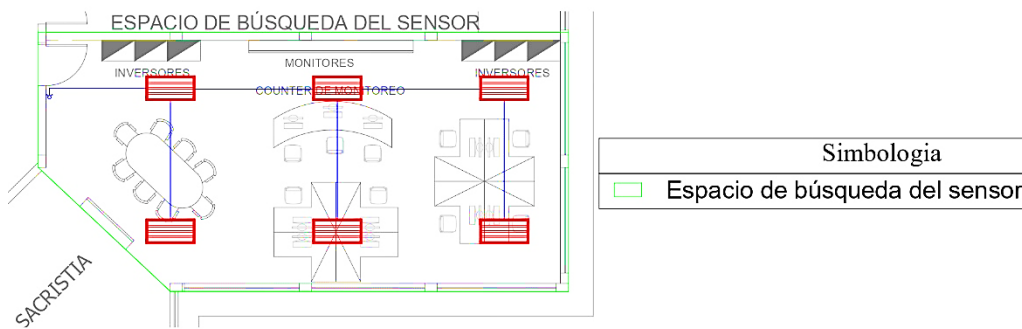


Figura 14 Espacio de búsqueda para el sensor

Continuando con la parte del algoritmo, se ha tomado una función aptitud multicriterio, la cual fue diseñada para la mejora de cobertura del sensor. Dicha función integra: la cobertura espacial del aula dentro del radio efectivo de detección, un término geométrico asociado a la distancia promedio entre el sensor y puntos de muestreo, y un criterio energético indirecto (proxy) proporcional a la fracción no cubierta. Adicionalmente, se aplica una penalización a las soluciones que excedan los límites físicos del aula.

Con el propósito de simplificar la comprensión de este proceso, en la **Figura 15** se muestra el pseudocódigo, el cual resume la lógica de evaluación de la función aptitud durante el proceso de optimización.

```
Inicio
Definir las dimensiones del aula (largo y ancho)
Definir los puntos de muestreo
Definir el radio efectivo de detección del sensor
Definir pesos de la función aptitud
Definir la ubicación candidata del sensor (x, y)
Si la ubicación del sensor está fuera de los límites del aula, entonces
    Asignar un valor de penalización a la solución
    Retornar un valor de aptitud bajo
Fin si

Calcular la distancia entre la ubicación del sensor y cada punto de
muestreo

Determinar cuántos puntos se encuentran dentro del radio de detección
del sensor

Calcular la cobertura como la fracción de puntos cubiertos

Calcular la distancia promedio entre el sensor y los puntos de muestreo

Calcular el término geométrico a partir de la distancia promedio

Calcular el criterio energético indirecto como la fracción de puntos no
cubierto

Calcular el valor de aptitud como el inverso de la distancia promedio

Retornar el valor de aptitud de la solución

Fin
```

Figura 15 Pseudocódigo del algoritmo genético

Los parámetros que se han utilizado para configurar el algoritmo genético se encuentran en la **Tabla 3**. Partiendo de una población generada de manera aleatoria, lo que hace el algoritmo es evolucionar de manera progresiva un número de soluciones mediante procesos de selección y variación genética.

Finalmente, se obtuvo como resultado el punto de la ubicación óptima del sensor, el cual se define en un par de coordenadas (x, y), el cual fue objeto de análisis dentro de nuestro

caso de estudio. La gráfica muestra la posición óptima del sensor dentro del aula, permitiendo su interpretación y validación.

A continuación, se muestra la Figura 16, donde se observa la ubicación óptima del sensor tras haber ejecutado el código del algoritmo genético.

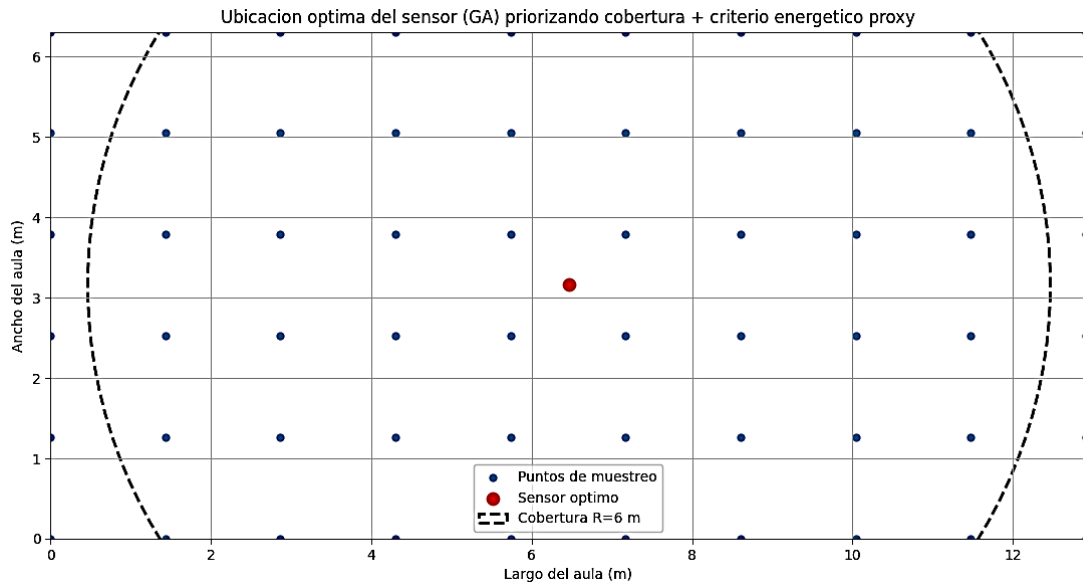


Figura 16 Ubicación óptima del sensor en caso de estudio

En esta solución gráfica se puede observar la solución óptima de la ubicación del sensor en coordenadas $x = 6.46$ m e $y = 3.15$ m, teniendo una cobertura espacial del 88% del aula, considerando un radio de detección de 6 m. Esta alta cobertura permite la reducción de zonas sin detección de presencia y aporta al desempeño energético.

El código desarrollado se lo presenta en este apartado de manera resumida ya que la versión completa se adjunta en los ANEXOS 1, 2 y 3.

4.5.7. Resultados de la optimización

La aplicación de optimización mediante algoritmos genéticos permitió encontrar de manera óptima la ubicación del sensor de presencia en un aula seleccionada para su respectivo análisis. Dicho espacio fue considerado como un lugar representativo en todo el Bloque H, esto debido a que el resto de las aulas presentan geometría, distribución de luminarias y patrones de uso semejantes.

Para la ejecución del algoritmo se consideraron las dimensiones reales del espacio o aula, en donde hay un largo de 12,91 m y un ancho de 6,31 m; así mismo se tiene una distribución uniforme de puntos de ocupación. Los puntos que permitieron fueron la evaluación espacial del sensor durante la optimización, considerando criterio de cobertura, distancia y desempeño energético indirecto.

Una vez ejecutado el algoritmo genético, se logró tener una solución óptima para la ubicación del sensor, logrando una cobertura espacial del 88% del aula, considerando un radio efectivo de detección de 6 m. La posición del sensor se encuentra en las coordenadas $x = 6.49$ m e $y = 3.17$ m, próxima al centro geométrico del espacio, lo que favorece una cobertura equilibrada de las zonas de ocupación y reduce la probabilidad de áreas sin detección de presencia.

En la Figura 16 se muestra la ubicación óptima del sensor haciendo uso del algoritmo genético, donde se puede visualizar la relación que existe entre la ubicación óptima y el espacio del aula, tanto el largo como el ancho. La imagen muestra de manera clara cómo el sensor cubre las distintas zonas del aula, evitando zonas en las que exista baja cobertura o detección de presencia.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos mediante el algoritmo genético son lógicos respecto a los resultados obtenidos de segmentación espacial mediante diagramas de Voronoi. La ubicación asociada al sensor presenta una optimización de manera equilibrada dentro del área de influencia; por lo tanto, ambas metodologías son un complemento. En tanto la metodología de Voronoi permite analizar la segmentación del espacio y áreas de cobertura teórica, el algoritmo genético es un método de optimización multicriterio que integra criterios geométricos y un criterio energético indirecto basado en el desempeño de detección.

El algoritmo genético permitió la convergencia en pocas generaciones, lo que demuestra la efectividad del modelo propuesto y su aplicación para sistemas de iluminación inteligente. Además, el resultado obtenido en esta aula representativa demuestra que no es necesario optimizar de manera individual cada espacio del bloque, ya que la similitud de geometría y el uso de los espacios permiten hacer uso de la ubicación del sensor, pero

con ajustes mínimos. Sin embargo, se ha decidido simular 3 casos extras, los cuales corroboren el criterio ya mencionado

En la **Tabla 6** se pueden verificar las coordenadas en las cuales se encuentran ubicados los sensores de manera optimizada haciendo uso del algoritmo, además de que esta tabla demuestra la veracidad de la posición óptima que se muestra en la Figura 16 y ANEXOS 12.

Tabla 6 Resultados óptimos del algoritmo genético

Aula	Posición óptima eje X	Posición óptima eje Y	Valor Fitness
No1	6.49 m	3.17 m	0.6933
No 2	6.49 m	3.17 m	0.6933
No 3	6.49 m	3.11 m	0.6933
No 4	6.49 m	3.11 m	0.6933

Nota: Las aulas numeradas que van desde la No1 hasta la No 4 se encuentran en los ANEXOS 6.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten verificar el criterio de extrapolación y conocer la posición óptima en donde se debe colocar cada uno de los sensores de presencia.

Una adecuada ubicación del sensor permite una detección de presencia más eficiente, contribuyendo a un uso racional del sistema de iluminación y una mejora en los indicadores de eficiencia energética del espacio analizado y el Bloque H en general.

4.5.8. Extrapolación del modelo al resto de aulas del Bloque H

Para el caso de estudio se seleccionó un único espacio de todo bloque, el cual permitió la aplicación del modelo respondiendo a niveles de criterio técnico y metodológico, permitiendo la extrapolación de resultados hacia las demás aulas del bloque sin perder autenticidad. Esta selección se fundamenta en la homogeneidad geométrica y funcional que presentan los espacios del bloque, permitiendo extrapolar los resultados obtenidos sin comprometer la validez del análisis.

Desde la perspectiva geométrica, las aulas del Bloque H cuentan con dimensiones similares; a su vez, tienen una distribución de luminarias similar. La uniformidad espacial responde al comportamiento del sistema de iluminación y cobertura por parte del sensor

de presencia. En consecuencia, no se esperan variaciones significativas en el desempeño del sistema de detección entre aulas con geometría equivalente.

Los espacios que fueron objeto de análisis cumplen funciones académicas similares, por lo que presentan patrones de uso similares en cuanto se refiere a horarios, número de usuarios y actividades. Es por esta razón que el sistema de control de iluminación basado en sensores de presencia se comporta de forma similar en cada aula.

En este contexto, la combinación de la metodología mediante diagramas de Voronoi y algoritmos genéticos permitió encontrar de manera óptima la ubicación del sensor, maximizando la cobertura espacial del aula, alcanzando un 88% de cobertura con un radio efectivo de detección de 6 m. Dado que las aulas comparten características geométricas y funciones similares, la configuración puede ser replicada en el resto de espacios, realizando un ajuste en la posición del sensor de acuerdo con las dimensiones específicas de cada aula, manteniendo la relación geométrica definida.

De tal manera, no es necesario ejecutar el algoritmo genético de manera individual para cada aula, siempre y cuando se conserven las condiciones geométricas y de uso consideradas en el modelo. La optimización realizada se convierte en una solución representativa y reproducible para el conjunto de aulas del Bloque H.

Para finalizar, los resultados obtenidos de la optimización geométrica y su evaluación energética mediante simulación dinámica constituyen una base sólida para futuros estudios en donde se desee realizar la implementación de sensores con un área geométrica similar en el campus de la universidad.

A continuación, se presenta una tabla resumen en la cual se observa el número de aulas que fueron objeto de estudio, el número de sensores utilizados y el criterio que se tomó en consideración para realizar la optimización.

Tabla 7 Tabla resumen de extrapolación

Aula	Área (m ²)	Sensor propuesto	Criterio de uso
No 1	81.30	1	Algoritmo genético
No 2	81.30	1	Algoritmo genético
No 3	80.35	1	Algoritmo genético
No 4	80.35	1	Algoritmo genético
No 5	16.35	1	Extrapolación
No 6	79.05	1	Extrapolación
No 7	79.05	1	Extrapolación
No 8	82.53	1	Extrapolación
No 9	47.68	1	Extrapolación
No 10	80.28	1	Extrapolación
No 11	49.00	1	Extrapolación

Nota: Las aulas numeradas que van desde el No 1 hasta el No 11 se encuentran en los ANEXOS 6 y 7.

4.5.9. Validación de normativa de la calidad de iluminación

La validación de distribución y calidad de iluminación se la realizó mediante el uso de normativa aplicable, considerando que el sistema propuesto no modifica el diseño lumínico que existe en las aulas analizadas. En particular, se utilizó como referencia la normativa UNE 12464-1, la cual establece niveles mínimos de iluminancia y criterios de confort visual requeridos para espacios educativos [43].

De acuerdo con la normativa UNE 12464-1, los niveles de iluminancia dependen principalmente del diseño del sistema de iluminación, incluyendo el tipo de luminaria, disposición y flujo luminoso instalado, y no del sistema de control empleado [43]. En el presente estudio, dichas variables permanecen constantes, dado que la intervención propuesta actúa exclusivamente sobre el tiempo de encendido de luminarias mediante la detección de presencia del sensor.

Por tanto, la implementación del sistema de control no altera la distribución espacial de iluminación ni los niveles de iluminancia previamente establecidos, respaldando que la calidad de iluminación y las condiciones de confort visual se mantengan dentro de los criterios definidos por la normativa aplicable. En consecuencia, la mejora obtenida a partir del sistema propuesto se centra en la eficiencia energética del sistema de iluminación, sin afectar de manera negativa la calidad lumínica en los diferentes espacios analizados.

En la **Tabla 8** se muestran los requisitos normativos de iluminación para espacios educativos en base a normativa

Tabla 8 Requisitos normativos de iluminación para aulas educativas (UNE 12464-1)

Parámetros evaluados	Valor mínimo recomendado por norma	Justificación de estudio
Iluminancia media mantenida (Em)	> 300 lux	Diseño lumínico existente en el Bloque H
Uniformidad de luminancia (Uo)	> 0.60	No modificar por el control propuesto
Índice de deslumbramiento (UGR)	< 19	No evaluado experimentalmente
Índice de reproducción cromática (CRI)	> 80	Propio de las luminarias instaladas

Nota: Los valores que se muestran en la **Tabla 8** corresponden a criterios normativos de referencia. En el presente estudio no se realiza un análisis fotométrico ni mediciones de iluminancia, dado que la propuesta no modifica el diseño lumínico existente, sino únicamente el tiempo de operación de iluminación.

La incorporación de los criterios normativos de iluminación tiene como finalidad contextualizar los requisitos mínimos que deben cumplir los espacios educativos. Dado que el sistema propuesto no altera la disposición, tipo de potencia de las luminarias, se asume que el diseño existente cumple con la normativa UNE 12464-1 [43]. En consecuencia, la validación lumínica se aborda desde un enfoque normativo, mientras que el análisis desarrollado en este trabajo se centra en la optimización del control y su impacto energético.

4.6. Resultados de la simulación dinámica del sistema de iluminación

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación dinámica del sistema de iluminación con control de presencia, aplicada a un aula representativa del bloque H. El objetivo de dicha simulación es determinar el impacto real del sistema de control sobre el tiempo de operación y consumo energético.

4.6.1. Implementación de simulación dinámica

La implementación de la simulación se hizo mediante una hoja de cálculo, en la cual se modeló el comportamiento del sistema minuto a minuto. Las variables a considerar para la simulación incluyen estado de ocupación del aula, estado del sensor y estado de las luminarias, permitiendo evaluar de forma dinámica el encendido y apagado de la iluminación.

La simulación se ejecutó de manera independiente en jornadas de 10 y 12 horas, manteniendo constantes las reglas de control y patrón de ocupación dentro de cada horizonte temporal.

4.6.2. Obtención de la reducción de operación

A partir de los resultados de la simulación, se determinó un total de minutos en los cuales las luminarias se encontraban encendidas durante cada periodo de simulación. Con esta información se pudo calcular la reducción de operación correspondiente.

- Reducción de tiempo de operación en 10 horas: 0.48
- Reducción de tiempo de operación en 12 horas: 0.52

Dichas reducciones representan la fracción real de tiempo en el que el sistema de iluminación reduce el tiempo de operación bajo el control automático, considerando la ocupación efectiva del aula.

Para validar la información de la simulación dinámica, se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos de dicho procedimiento para sistemas de iluminación.

Tabla 9 Resumen de la simulación dinámica

Jornada de análisis	Tiempo total de uso (min)	Tiempo total de encendido (min)	Factor dinámico $Fd = \frac{T_{on}}{T_{uso}}$	Porcentaje reducción $R = 1 - Fd$
Jornada 10 h	600	313	0.52	0.48
Jornada 12 h	720	346	0.48	0.52

Se observa en la **Tabla 9** que, para una jornada de 10 horas, las luminarias permanecen encendidas un 52% del tiempo total, mientras que para una jornada de 12 horas este valor asciende a un 48%, de acuerdo con los patrones de ocupación considerados en la simulación dinámica. En consecuencia, los porcentajes de reducción del tiempo de operación corresponden al 48% y 52%, respectivamente.

Los valores dinámicos hallados se utilizaron para sustitución de un supuesto fijo de reducción del 30%, garantizando que dentro del análisis energético se refleje el

comportamiento real del sistema bajo condiciones de ocupación. De tal manera, el ahorro energético R se deriva de la simulación temporal y no de un valor estimado.

4.6.3. Comparación con el sistema de control

A partir de los resultados obtenidos del factor dinámico, se permite realizar una comparativa del consumo energético actual sin control automático y el consumo resultante de la implementación del sistema de control por presencia. El consumo energético es consecuencia directa de la disminución real del tiempo de operación de las luminarias, determinada a partir de la simulación dinámica.

4.7. Análisis energético en sistemas de iluminación

En esta sección se abordará el impacto energético resultante de la optimización de las ubicaciones de sensores de presencia en sistemas de iluminación del Bloque H, mediante el uso de indicadores energéticos, los cuales permitieron evaluar el desempeño del sistema inteligente.

La ubicación óptima del sensor, mediante la metodología planteada, no permite la modificación de las características de las luminarias, sino que optimizará el sistema de control en sistemas de iluminación en función de la ocupación del espacio. Las estrategias tomadas en este caso de estudio lo que permitieron fue definir zonas de coberturas las cuales van asociadas a grupos de luminarias, de modo que el encendido y apagado se realizó en zonas en las cuales se detecta presencia. Conociendo este contexto, los indicadores energéticos analizados permitieron cuantificar el efecto de dichas estrategias acerca del consumo de energía en el sistema, demostrando mejoras en la eficiencia energética sin afectar el uso del espacio.

4.7.1. Indicadores energéticos




Para el cumplimiento del objetivo específico relacionado con la definición y establecimiento de indicadores claves asociados de eficiencia energética, dentro de este estudio se seleccionaron indicadores energéticos definidos en el Capítulo 3.11, los cuales permitieron evaluar de manera cuantitativa el desempeño de energía dentro del sistema de iluminación del Bloque H antes y después de la implementación del sistema de control mediante sensores de presencia.

Los indicadores definidos consideran relación entre la potencia instalada, área del aula, nivel de ocupación y consumo eléctrico, permitiendo una evaluación objetiva, comparable y reproducible de la eficiencia energética en sistemas inteligentes de iluminación.

Cabe mencionar que los valores de potencia se basan solo en luminarias; y tipo de luminarias estos datos se han tomado de la **Tabla 10**, en donde se muestran las

características de cada una de las luminarias, las cuales servirán para los posteriores cálculos referentes a los consumos de energía.

Tabla 10 Características de las luminarias

Imagen	Tipo de luminaria	Potencia (W)
	Balastro 3 tubos	32
	Led	60
	Led	18

Luego, a partir de las variables ya mencionadas, se pudo calcular los indicadores energéticos que permiten evaluar la eficiencia del sistema de iluminación inteligente de manera objetiva y comparable.

A continuación, los indicadores energéticos considerados en el presente análisis son los siguientes:

- Consumo energético actual en la ecuación (9).
- Consumo energético con sensores en la ecuación (10).
- Ahorro energético en la ecuación (11).
- Densidad de potencia por área en la ecuación (12).

- Índice de potencia por persona, ecuación (13).
- Consumo energético por área (14).

Las fórmulas matemáticas respecto a cada variable fueron presentadas en la sección del **MARCO METODOLÓGICO**; por ende, en esta sección se procede a aplicar directamente al caso de estudio.

4.7.2. Consumo energético actual

En este apartado se evalúa el consumo energético del Bloque H en su etapa actual, es decir, sin la implementación de sensores de presencia ni la metodología propuesta. El cálculo del consumo energético se basó solo en luminarias, considerando factores como la potencia instalada de las luminarias y el tiempo de funcionamiento diario, correspondiente a un horario que va en intervalos de tiempo; el primer intervalo es de 07:00 hasta las 13:00 y de 15:00 a 21:00, mientras que el segundo intervalo va de 07:00 hasta 13:00 y de 14:00 a 18:00.

El bloque H presenta diferentes configuraciones de luminarias con distintas potencias instaladas; para facilitar el análisis, lo que se realizó fue agrupar escenarios según el tipo de luminaria y el número de luminarias que existen en cada aula. Al hacer uso de esta metodología, se permitió evaluar de manera peculiar el consumo de energía sin necesidad de redundar en los análisis por individual.

A continuación, se muestran los resultados del consumo energético en el escenario actual antes de que suceda la optimización; se presentan en la **Tabla 11**, donde se resumen las potencias por escenario, horas de uso y el consumo diario.

Tabla 11 Consumo energético actual

Escenario	Tipo de luminaria	N luminarias	Potencia unitaria (W)	Potencia instalada (W)	Horas de uso (h/día)	Consumo diario(kWh)
A	Balastro 3 tubos	6	32	576	12	8.06
B	Balastro 3 tubos	4	32	384	10	5.37
C	Balastro 3 tubos	2	32	192	10	2.68
D	Led	6	60	360	10	5.04
E	Led	4	60	240	10	3.36
F	Led	20	18	360	10	5.04
G	Led	3	60	180	10	2.52

Nota: Para el consumo energético actual se consideró un horario de operación. Si se desea conocer las características de las luminarias con las que cuenta el Bloque H, se encuentran en la **Tabla 10**. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.1 Consumo energético actual

4.7.3. Consumo energético con sensores

El consumo energético al utilizar sensores provoca una reducción del tiempo en el que las luminarias se mantienen encendidas, esto debido a que se hizo utilización de la metodología, la cual se basa en diagramas de Voronoi y algoritmos genéticos permitiendo conocer la cobertura óptima para la colocación del sensor. Para este escenario, la potencia de las luminarias se sigue manteniendo; sin embargo, existe una reducción en el tiempo, ya que este es optimizado en función de periodos reales de ocupación.

Para el presente estudio se asumieron los valores correspondientes a la reducción de tiempo de operación en cada escenario calculado mediante simulación dinámica.

Los resultados del consumo energético con sensores se presentan en la **Tabla 12**, donde se expone la reducción de energía en cada uno de los escenarios de acuerdo con su tipo de luminaria.

Tabla 12 Consumo energético con sensores

Escenario	Tipo de luminaria	N luminarias	Potencia unitaria (W)	Potencia instalada (W)	Reducción del tiempo de operación (h/día)	Consumo diario (kWh)
A	Balastro 3 tubos	6	32	576	6.24	3.59
B	Balastro 3 tubos	4	32	384	4.8	1.84
C	Balastro 3 tubos	2	32	192	4.8	0.92
D	Led	6	60	360	4.8	1.73
E	Led	4	60	240	4.8	1.15
F	Led	20	18	360	4.8	1.73
G	Led	3	60	180	4.8	0.86

Nota: El consumo energético con sensores se calculó a partir de una reducción del 48% y 52% en el tiempo de operación para sistemas de iluminación. Si se desea conocer las características de las luminarias con las que cuenta el Bloque H, se debe basar la revisión en la **Tabla 10**. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.2 Consumo energético con sensores.

4.7.4. Ahorro energético

Para el ahorro energético, se tuvo que determinar mediante una comparación entre el consumo energético actual y el consumo energético con sensores. Al realizar esta comparativa, el resultado que obtenemos es el impacto que genera la implementación de sensores en los sistemas de iluminación en términos de ahorro de energía eléctrica.

El indicador se evaluó en cada uno de los escenarios de luminarias, lo cual permitió observar las zonas en donde existe una gran reducción del consumo. Los resultados obtenidos de esta evaluación se indican en la **Tabla 13**, en donde existe una comparativa de escenarios.

Tabla 13 Ahorro energético

Escenario	Tipo de luminaria	Consumo sin sensores (kWh)	Consumo con sensores (kWh)	Ahorro energético (kWh/día)	Ahorro energético (%)
A	Balastro 3 tubos	6.91	3.59	3.32	48
B	Balastro 3 tubos	3.84	1.84	2.00	52
C	Balastro 3 tubos	1.92	0.92	1.00	52
D	Led	3.60	1.73	1.87	52
E	Led	2.40	1.15	1.25	52
F	Led	3.60	1.73	1.87	52
G	Led	1.80	0.86	0.94	52

Nota: El ahorro energético se calculó como la deducción del consumo energético sin sensores y el consumo con sensores. El ahorro energético tiene una reducción del 48% y 52% en el momento en que se enciende las luces. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.3 Ahorro energético (%).

4.7.5. Densidad de potencia por área

El indicador de densidad de potencia se utiliza como un complemento, el cual permite evaluar la eficiencia del sistema de iluminación respecto al área de cada una de las aulas. Dicho indicador facilita la comparación del desempeño energético entre los diferentes escenarios de iluminación definidos, independientemente del número de luminarias o de la potencia instalada en cada caso.

Para el cálculo de densidad de potencia por área se consideró la potencia instalada de cada escenario y un área representativa de 81.45 m^2 , correspondiente al aula seleccionada como caso de estudio. Esta área fue tomada como referencia porque las aulas del Bloque H presentan dimensiones similares y una geométrica comparable, tal como se describe en el apartado de extrapolación del modelo. Por lo tanto, el uso de un área representativa permite realizar una comparación homogénea entre escenarios, sin afectar la validez relativa del indicador.

Los valores obtenidos se presentan en la **Tabla 14**, donde se puede mostrar la densidad de potencia asociada a cada escenario de iluminación.

Tabla 14 Densidad de potencia por área

Escenario	Tipo de luminaria	N luminarias	Potencia unitaria (W)	Potencia instalada (W)	Área del aula (m ²)	Densidad de potencia (W/m ²)
A	Balastro 3 tubos	6	32	576	81.45	7.07
B	Balastro 3 tubos	4	32	384	81.45	4.71
C	Balastro 3 tubos	2	32	192	81.45	2.35
D	Led	6	60	360	81.45	4.41
E	Led	4	60	240	81.45	2.94
F	Led	20	18	360	81.45	4.41
G	Led	3	60	180	81.45	2.20

Nota: El área del aula corresponde al caso de estudio en donde se seleccionó un aula representativa, con dimensiones de 12.91 m x 6.31 m. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.4 Densidad de potencia por área.

4.7.6. Índice de potencia por persona

Este indicador permite evaluar la relación que existe entre la potencia instalada en un sistema de iluminación y el número de personas que transitan por el espacio analizado. El indicador mencionado es de gran utilidad al momento de determinar la capacidad instalada de iluminación; llega a ser proporcional con la demanda real asociada a la ocupación del aula, tratando de evitar un sobredimensionamiento del sistema.

En este estudio, el indicador del cual estamos hablando se calculó a partir de la potencia instalada y la capacidad del aula representativa, logrando analizar el desempeño que tiene el sistema en condiciones reales. Los valores en donde se indica la potencia que consume por persona se muestran en la **Tabla 15**, donde se observa de mejor manera dichas variables.

Tabla 15 Resumen del índice de potencia por persona

Escenario	Tipo de luminaria	Potencia instalada (W)	Número de personas	Potencia por persona (W/persona)
A	Balastro 3 tubos	576	30	19.2
B	Balastro 3 tubos	384	30	12.8
C	Balastro 3 tubos	192	30	6.4
D	Led	360	30	12
E	Led	240	30	8
F	Led	360	30	12
G	Led	180	30	6

Nota: Para este caso de estudio hemos seleccionado un número de 30 personas, las cuales circulan por el espacio. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.5 Índice de potencia por persona.

4.7.7. Consumo energético por área

El indicador que se analiza en esta sección es el consumo energético por área, el cual relaciona el consumo eléctrico del espacio analizado, lo cual permite evaluar el desempeño óptimo de la energía en condiciones normales. La diferencia que existe con el consumo total de energía es que permite la comparación con distintos escenarios de operación, sin importar las dimensiones del espacio.

Para este trabajo, el consumo específico tomó datos del consumo energético mensual del sistema de iluminación y el área del aula representativa. Este criterio aplica para el escenario actual, el cual no cuenta con sensores, y para el escenario con sensores, logrando así una cuantificación del impacto de la optimización en el ámbito energético

A continuación, se muestran en la **Tabla 16** y la **Tabla 17** los resultados obtenidos del análisis anteriormente mencionado.

Tabla 16 Resumen del consumo energético por área sin sensores

Escenario	Tipo de luminaria	Consumo mensual (kWh/mes)	Área (m ²)	Consumo específico (kWh/mes*m ²)
A	Balastro 3 tubos	152.064	81.45	1.87
B	Balastro 3 tubos	84.48	81.45	1.04
C	Balastro 3 tubos	42.24	81.45	0.52
D	Led	79.2	81.45	0.97
E	Led	52.8	81.45	0.65
F	Led	79.2	81.45	0.97
G	Led	39.6	81.45	0.49

Nota: Para hallar el consumo mensual hemos hecho el cálculo con los datos de la **Tabla 11**. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.6 Consumo energético por área.

Tabla 17 Resumen del consumo energético por área con sensores

Escenario	Tipo de luminaria	Consumo mensual (kWh/mes)	Área (m ²)	Consumo específico (kWh/mes*m ²)
A	Balastro 3 tubos	79.07	81.45	0.97
B	Balastro 3 tubos	40.55	81.45	0.50
C	Balastro 3 tubos	20.28	81.45	0.25
D	Led	38.02	81.45	0.47
E	Led	25.34	81.45	0.31
F	Led	38.02	81.45	0.47
G	Led	19.01	81.45	0.23

Nota: Para hallar el consumo mensual hemos hecho el cálculo con los datos de la **Tabla 12**. Los resultados se obtuvieron de la expresión 3.11.6 Consumo energético por área.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se lo validó mediante los indicadores energéticos obtenidos en la sección 4.7; estos indicadores permitieron la evaluación objetiva del comportamiento en los sistemas de iluminación en cada una de las aulas del Bloque H de la Universidad Politécnica Salesiana. Para el análisis se consideró distintos escenarios de iluminación, los cuales fueron agrupados en función del tipo de luminaria y el número de luminarias instaladas, conservando el área del aula y sus patrones de ocupación.

En este contexto, el modelo de simulación permitió el análisis del impacto energético basado en estrategias de control para sensores de presencia, sin necesidad de modificar características de las luminarias existentes. Los resultados obtenidos evidencian una reducción del consumo energético del orden de 48% y 52%, equivalente a un ahorro de 38.5 kWh/mes respecto al escenario sin sensores, demostrando la efectividad del modelo de simulación en un entorno controlado y su contribución a la eficiencia de energía.

5.1. Análisis de resultados de densidad de potencia instalada

El indicador de densidad de potencia es sumamente importante, ya que permite evaluar la eficiencia del sistema de iluminación en función del área del espacio. Con los resultados obtenidos, demuestra que el escenario en donde se tiene luminarias con balastro de tres tubos presenta valores altos de densidad, llegando hasta un 7.07 W/m^2 en un escenario que contiene un gran número de luminarias. El valor reflejado por este tipo de tecnología da a conocer que existe una mayor demanda de potencia instalada al momento de cubrir las necesidades de iluminación.

Los escenarios que utilizan tecnología LED reflejan una amplia reducción en la densidad de potencia; los valores oscilan entre 2.21 W/m^2 y 4.42 W/m^2 ; estos valores dependerán del número

de luminarias y el tipo de luminaria utilizadas. Los resultados obtenidos muestran que la tecnología LED es más eficiente al momento de distribuir la potencia eléctrica en relación con el área, evitando comprometer los niveles de iluminación.

Con el fin de comparar la carga eléctrica en los diferentes escenarios analizados, se presenta a continuación una representación gráfica de la densidad de potencia instalada. Lo que permite este gráfico es visualizar de manera clara las diferencias que existen entre los tipos de luminarias y su impacto en el uso de potencia por unidad de área.

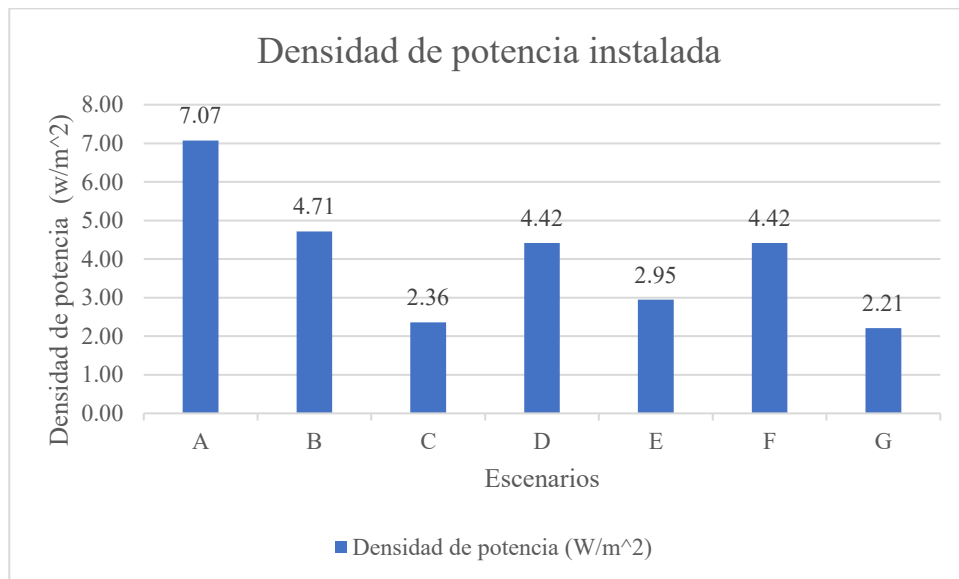


Figura 17 Densidad de potencia instalada en los distintos escenarios

A partir de la **Figura 17** se puede observar una diferencia notoria entre los distintos escenarios analizados, asociados principalmente al tipo y número de luminarias utilizadas en cada caso. Los escenarios en los cuales se utilizan luminarias tipo balastro presentan valores altos de densidad de potencia, destacando el escenario A, evidenciando una mayor carga eléctrica instalada por unidad de área. En cambio, los escenarios con tecnología LED muestran valores menores, reflejando un uso eficiente de la potencia instalada. Los resultados obtenidos confirman que el tipo de luminaria influye en la eficiencia energética del sistema de iluminación.

5.2. Análisis de resultados de índice de potencia por persona

El índice de potencia por persona permite estimar una relación entre la potencia instalada y el número de usuarios que se encuentran en el espacio; lo que se logra con este indicador es ofrecer una perspectiva real del uso del espacio.

Los resultados obtenidos muestran que las luminarias de balastro tienen un valor muy alto, alcanzando hasta 19.2 W/persona, lo que señala que existe un mayor consumo energético por cada ocupante.

Al contrario, los escenarios en donde se hace uso de luminarias LED presentan valores considerablemente menores, llegando a 6 W/persona en un caso de eficiencia. Los valores obtenidos tanto en luminarias de balastro y led evidencian una mejora de eficiencia energética en el sistema, logrando cubrir la demanda con una menor potencia por usuario. Cabe mencionar que dicho indicador muestra la ventaja del uso de tecnología LED, particularmente en lugares académicos con alta ocupación.

Para evaluar la potencia eléctrica en función de la ocupación del aula, se muestra un gráfico correspondiente al índice de potencia por persona. Dicho gráfico permite comparar la eficiencia energética en cada escenario, tomando en cuenta el número de usuarios que ocupan el espacio.

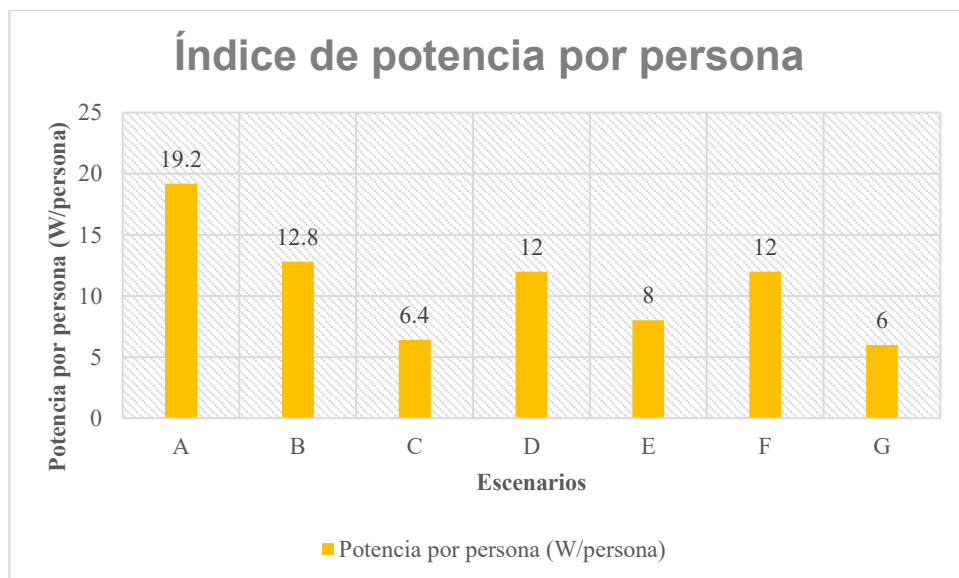


Figura 18 Índice de potencia por persona en cada escenario

La **Figura 18** muestra el índice de potencia por persona, el cual permite la evaluación de potencia eléctrica en función de la ocupación del aula. Se puede observar que los escenarios con un mayor número de luminarias y una mayor potencia instalada presentan valores altos de potencia por persona, resultando un uso ineficiente de la energía por usuario. Por el contrario, escenarios en los cuales se utiliza tecnología LED y una menor carga instalada presentan índices más bajos, evidenciando una mejora en la eficiencia energética desde la perspectiva del consumo individual. El indicador resulta ser útil para analizar el impacto del sistema de iluminación, tomando en consideración la relación energía y ocupación.

5.3. Análisis de resultado del consumo energético por área sin sensores

El consumo energético por área lo que representa es cómo se comporta el sistema de iluminación en una etapa inicial, es decir, sin el control automático mediante sensores. Los resultados obtenidos en cada escenario demuestran que las luminarias de tipo balastro tienen un mayor consumo mensual por unidad de área, excediendo el $1.87 \frac{kWh}{mes} * m^2$ siendo así un escenario desalentador.

Por otra parte, con el recurso de la tecnología LED, el consumo tiene una reducción importante, oscilando valores que varían entre $0.49 \frac{kWh}{mes} * m^2$ y $0.97 \frac{kWh}{mes} * m^2$. A pesar de que estos valores ya se consideran mejores frente a otras tecnologías, todavía se refleja el uso de iluminación sin tomar en cuenta periodos de inactividad.

5.4. Análisis de resultados del consumo energético por área con sensores

El consumo energético por área con la incorporación de sensores permite evaluar el consumo energético. Los resultados que se obtuvieron muestran una reducción significativa en el consumo mensual en cada uno de los escenarios planteados. Para el caso del tipo de luminaria balastro 3 tubos, el consumo que se tuvo fue de $0.25 \frac{kWh}{mes} * m^2$, evidenciando que tecnologías antiguas y menos eficientes pueden hacer uso de sensores de presencia para su beneficio.

En cambio, para luminarias con tecnología LED, sus resultados son mejores, ya que, al combinarse con sensores, alcanzan valores de $0.23 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} * \text{m}^2$, representando una mayor eficiencia energética en el caso de estudio. La reducción del consumo confirma que el uso de tecnologías eficientes y sistemas de control inteligente aprovechan al máximo la energía eléctrica y reducen pérdidas debido a la inactividad.

En la siguiente gráfica se hace una comparación del consumo energético por área del sistema de iluminación antes y después de la implementación de sensores de presencia. Esta comparación permite evaluar de manera directa el impacto que ocurre en el sistema de control propuesto sobre el consumo energético.

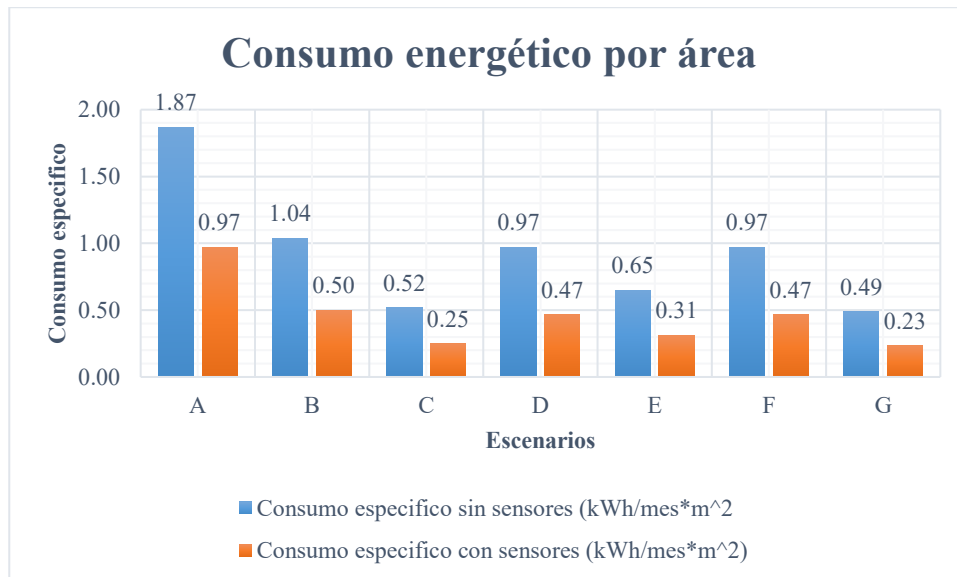


Figura 19 Consumo energético por área con sensores y sin sensores

Para la **Figura 19** se presenta una comparación de manera directa entre los escenarios, los cuales no cuentan con sensores, y los escenarios con la implementación de los mismos. En todos los casos se observa una reducción del consumo específico al momento de incorporar sistemas de control, permitiendo generar un efecto positivo en la gestión de iluminación en función de la ocupación real del espacio. La disminución es más evidente en los escenarios con un consumo inicial alto, evidenciando que la estrategia de control mediante sensores resulta ser efectiva en espacios con

una carga de iluminación alta. Los resultados validan el modelo de simulación propuesto y su contribución a la mejora de la eficiencia energética.

5.5. Ahorro energético por escenario

A partir de la gráfica de ahorro energético, se determina que en todos los escenarios analizados existe una reducción del consumo eléctrico tras la implementación de sensores de presencia. El ahorro energético se evidencia en escenarios en los cuales existe una mayor potencia instalada inicial, lo cual revela que la estrategia propuesta de control resulta ser efectiva en espacios donde existe una mayor carga de iluminación.

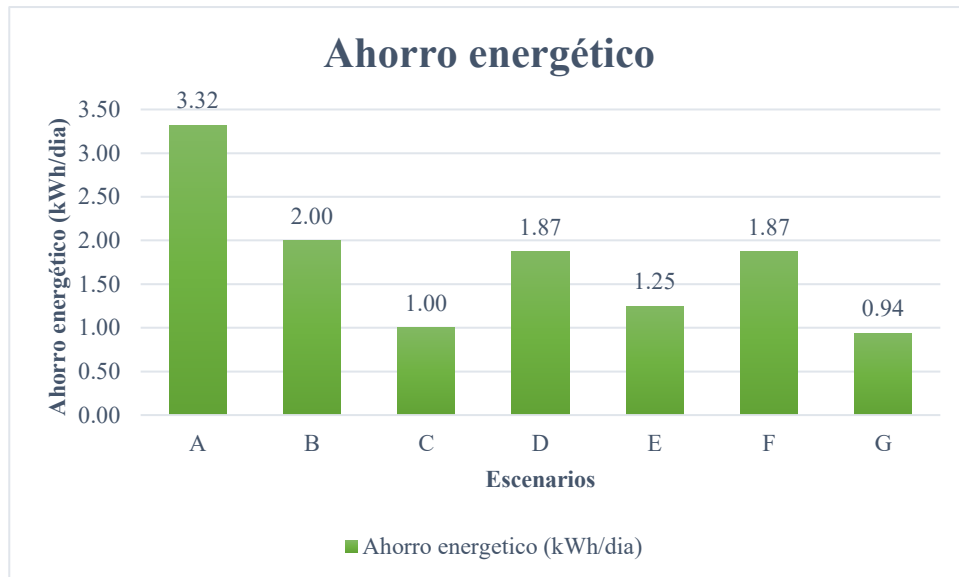


Figura 20 Ahorro energético del sistema de iluminación

La **Figura 20** muestra de manera clara la reducción del consumo eléctrico obtenido en cada uno de los escenarios analizados tras implementar un sistema de control basado en sensores de presencia. Se observa que en todos los escenarios existe un ahorro positivo, lo que evidencia la efectividad del modelo. Los niveles más altos de ahorro se presentan en los escenarios con mayor consumo inicial, demostrando que la estrategia de control es eficiente en espacios con cargas de iluminación altas. En contraste, los escenarios con menor carga presentan ahorros moderados; de igual manera

son significativos. Esto confirma que el uso de sensores de presencia contribuye a la reducción del consumo energético independientemente del tipo de luminaria utilizada.

5.6. Limitaciones del análisis lumínico y trabajos futuros

El caso de estudio no incluye simulaciones lumínicas detalladas ni mediciones experimentales de iluminancia mediante luxómetro. Esta limitación es debido a que la investigación no contempla el rediseño del sistema de iluminación existente, sino que se enfoca en la optimización del control del sistema de iluminación mediante sensores de presencia y su impacto energético. En este contexto, las luminarias, su disposición y la potencia instalada se mantienen constantes durante todo el análisis.

La validación de la calidad de iluminación se hizo mediante el uso de normativa aplicable, garantizando que la implementación del sistema de control no afecte de manera negativa las condiciones de confort visual previamente establecidas en las aulas analizadas. No obstante, una evaluación fotométrica detallada permitirá complementar los resultados obtenidos y analizar de manera cuantitativa la distribución espacial de iluminación.

Para trabajos futuros, se propone la incorporación de simulaciones lumínicas mediante software especializado o la realización de mediciones en el sitio con luxómetro, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los niveles de iluminancia establecidos por la normativa vigente y fortalecer la validación integral del sistema propuesto.

5.7. Validación del Algoritmo Genético

El algoritmo genético fue utilizado dentro de este estudio como una herramienta de metodología de carácter exploratorio; dicho algoritmo tuvo el propósito de hallar la mejor solución al momento de ubicar sensores de presencia en áreas educativas. El algoritmo es utilizado para lugares en donde la geometría es regular y se puede tener una solución efectiva, pero el algoritmo también se propone

como una metodología sencilla y fácil de utilizar en casos de estudio con un nivel de dificultad complejo [44].

El uso de este algoritmo sirvió como base para futuros trabajos en donde se consideren geometrías irregulares y restricciones complejas. Por lo tanto, la utilización de este algoritmo se justifica no solo por la solución óptima que se llegó a tener, sino por la potencia y escalabilidad que puede tener para estudios relacionados con los sistemas de iluminación inteligente [44].

5.8. Alcance de control de los sensores de presencia

Para este proyecto, la ubicación de las luminarias se mantiene sin modificaciones de ningún tipo. La optimización que se logra en este trabajo se basa en sistemas de control para luminarias, en base a la ubicación óptima del sensor y las zonas de cobertura.

El uso de las metodologías propuestas, como lo son diagramas de Voronoi y algoritmo genético para el caso de estudio propuesto se apoyó en agrupar criterios de luminarias en cada espacio del aula. De esta forma, al momento en que el sensor detecta presencia en una cierta zona, exclusivamente solo las luminarias asociadas a esa área se activan; una vez finalizado ese tiempo, si el sensor no detecta presencia, se apaga de forma automática.

Por tal motivo, el aporte del proyecto no establece una redistribución de la iluminación, tampoco en la modificación de parámetros de las luminarias, sino que su enfoque se basa en el encendido y apagado de acuerdo con la ocupación del espacio. Dicho enfoque lo que permite es reducir el consumo de energía sin necesidad de afectar el rendimiento de las actividades académicas, justo como se verifica en los resultados presentados.

Toda la información acerca de los cálculos del flujo luminoso en zonas de trabajo se encuentra en la literatura científica, la cual ha servido en este tipo de trabajos de implementación de sensores de presencia y estrategias de control de iluminación en aulas académicas [45], [46], [47].

5.9. Análisis de resultados global

El análisis de los indicadores energéticos permitió demostrar que la eficiencia en sistemas de iluminación no solo se basa en el tipo de luminaria instalada, sino que también tiene un aporte la forma en la que el sistema es operado. El cambio de luminarias tradicionales por nuevas tecnologías genera una reducción grande entre la potencia instalada y el consumo energético y, si a esto se le suma la incorporación de sensores de presencia, genera beneficios en el funcionamiento del sistema.

También, los resultados obtenidos justifican que la aplicación de un modelo de optimización mediante diagramas de Voronoi y algoritmos genéticos, permite hallar la ubicación óptima del sensor, logrando un control verdadero del sistema de iluminación.

Debido a que los espacios académicos del Bloque H tienen una geometría y patrones de uso similares, los resultados obtenidos permiten la extrapolación al resto de espacios, permitiendo que la metodología tenga validez.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se determinó una metodología para la ubicación de sensores de presencia en sistemas de iluminación inteligente, aplicada al Bloque H del Campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana. La integración de herramientas geométricas como diagramas de Voronoi y técnicas de optimización computacional mediante algoritmo genético permitió analizar el comportamiento espacial del sistema y su impacto energético bajo las condiciones del caso de estudio, cumpliendo con el objetivo general planteado.

La aplicación del algoritmo genético permitió obtener una solución de ubicación del sensor de presencia óptima respecto a la función aptitud definida, priorizando la cobertura del área y la cercanía en las zonas de ocupación. Para el aula representativa analizada, la solución alcanzó una cobertura aproximada del 88%, considerando un radio de detección de 6. Los resultados son consistentes con el análisis geométrico preliminar y permiten establecer que la metodología es aplicable a espacios con geometría similar, siempre que se mantengan en condiciones equivalentes de dimensiones, configuración del modelo y supuestos de control.

La evaluación del impacto energético en sistemas de iluminación se realizó mediante indicadores tales como densidad de potencia por área, índice de potencia por persona y consumo energético por área. A partir de estos indicadores, fue posible comparar distintos escenarios de iluminación, evidenciando diferencias significativas en el consumo energético diario y anual entre configuración con y sin control por presencia, lo que valida la utilidad de dichos indicadores como herramientas cuantitativas para espacios destinados a actividades educativas.

Asimismo, la reducción estimada del consumo energético no se fundamenta en supuestos fijos, sino en una simulación dinámica de encendido y apagado de las luminarias basada en patrones de

ocupación y reglas de control por presencia. Los resultados de la simulación muestran que, para una jornada de 10 horas, las luminarias permanecen encendidas aproximadamente 313 minutos, mientras que en una jornada de 12 horas este valor asciende a 346 minutos. Dichos valores representan reducciones de tiempo de operación del orden 48% y 52% respectivamente, en comparación con un funcionamiento continuo, lo que se traduce en una disminución proporcional del consumo energético del sistema.

6.2. RECOMENDACIONES

Es recomendable que, en trabajos futuros, la metodología propuesta se aplique de manera individual a cada espacio del Bloque H, considerando las posibles variaciones de geometría del aula, disposición del mobiliario y los patrones de ocupación. Esta aplicación específica permitirá ajustar con mayor precisión la optimización geométrica del sensor y simulación dinámica del control, mejorando la representatividad de los resultados para cada espacio analizado.

Asimismo, se sugiere complementar el estudio mediante la incorporación de mediciones reales del consumo energético, a través de sistemas de monitoreo eléctrico o registros de operación del sistema de iluminación. La incorporación entre los valores obtenidos por simulación y los datos medidos permitiría validar experimentalmente los resultados del presente trabajo y fortalece la confiabilidad del modelo propuesto.

Finalmente, se recomienda evaluar la implementación progresiva del sistema de control por presencia a nivel institucional, priorizando bloques académicos con características y uso similares al Bloque H. De acuerdo con los resultados obtenidos, la metodología presenta un potencial de reducción estimada del consumo energético asociado a la disminución del tiempo de operación de las luminarias, lo cual podría contribuir a estrategias de eficiencia energética en el campus universitario, previa evaluación técnica y económica.

CAPÍTULO VII

7. REFERENCIAS

- [1] N. S. Lopez, J. Gonzaga, and L. A. G. Lim, “Energy Audit and Analysis of the Electricity Consumption of an Educational Building in the Philippines for smart consumption,” pp. 5–8, 2017.
- [2] G. N. Patil and S. S. Tanavade, “Eco-Friendly Energy Efficient Classrooms and Sustainable Campus Strategies: A Case Study on Energy Management and Carbon Footprint Reduction,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 14, no. 3, pp. 188–197, 2024, doi: 10.32479/ijeep.15712.
- [3] G. Parise, G. Zisis, and L. Martirano, “Smart Lighting Systems, Controls, and Communication Protocols: Introducing Open Communication Protocols,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 31, no. 2, pp. 68–79, 2025, doi: 10.1109/MIAS.2024.3482882.
- [4] M. M. Saeed, R. A. Al-Hamoud, and A. Adam, “Intelligent Lighting Control System Using AI and IoT,” *Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems, ICUIS 2024*, pp. 1701–1705, 2024, doi: 10.1109/ICUIS64676.2024.10866848.
- [5] D. H. Kim, S. H. Jeon, and J. S. Sung, “Direct Illuminance-Contribution-Based Lighting Control for IoT-Based Lighting Systems in Smart Buildings,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 12, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3390/su16125054.
- [6] A. Pandharipande, D. Caicedo, and X. Wang, “Sensor-driven wireless lighting control: System solutions and services for intelligent buildings,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 12, pp. 4207–4215, 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2351775.
- [7] L. Monti *et al.*, “Edge-Based Transfer Learning for Classroom Occupancy Detection in a Smart Campus Context,” *Sensors*, vol. 22, no. 10, pp. 1–16, 2022, doi: 10.3390/s22103692.
- [8] M. R. Rafi, F. Hu, S. Li, A. Song, X. Zhang, and Z. O’Neill, “Deep Weighted Fusion Learning (DWFL)-based multi-sensor fusion model for accurate building occupancy detection,” *Energy and AI*, vol. 17, p. 100379, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.EGYAI.2024.100379.
- [9] T. H. Pedersen, K. U. Nielsen, and S. Petersen, “Method for room occupancy detection based on trajectory of indoor climate sensor data,” *Build. Environ.*, vol. 115, pp. 147–156, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2017.01.023.
- [10] H. Hu, H. Zhang, L. Wang, and Z. Ke, “Evaluation and Design of Parameterized Dynamic Daylighting for Large-Space Buildings,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 14, 2023, doi: 10.3390/su151410773.
- [11] J. Mahawan and A. Thongtha, “Experimental investigation of illumination performance of hollow light pipe for energy consumption reduction in buildings,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 2, 2021, doi: 10.3390/en14020260.

- [12] A. Ruiz, M. Á. Campano, I. Acosta, and Ó. Luque, “Partial daylight autonomy (Dap): A new lighting dynamic metric to optimize the design of windows for seasonal use spaces,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 17, 2021, doi: 10.3390/app11178228.
- [13] D. Katunský, E. Dolníková, and S. Doroudiani, “Integrated lighting efficiency analysis in large industrial buildings to enhance indoor environmental quality,” *Buildings*, vol. 7, no. 2, 2017, doi: 10.3390/buildings7020047.
- [14] S. Zanon, N. Callegaro, and R. Albatici, “A novel approach for the definition of an integrated visual quality index for residential buildings,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/app9081579.
- [15] F. Leccese, G. Salvadori, M. Rocca, C. Buratti, and E. Belloni, “A method to assess lighting quality in educational rooms using analytic hierarchy process,” *Build. Environ.*, vol. 168, p. 106501, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2019.106501.
- [16] T. S. Pitana, “Aesthetic and Cosmological Harmony in Traditional Javanese Architecture,” *ISVS e-journal*, vol. 10, no. 11, pp. 138–149, 2023, doi: 10.61275/ISVSEJ-2023-10-11-10.
- [17] Z. Dong, X. Luo, K. Zhao, J. Ge, and I. Y. S. Chan, “Comprehensive assessment method for building environmental performance: Trade-off between indoor environmental quality and life cycle carbon emissions,” *Build. Environ.*, vol. 272, p. 112598, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2025.112598.
- [18] A. Bellazzi *et al.*, “Virtual reality for assessing visual quality and lighting perception: A systematic review,” *Build. Environ.*, vol. 209, p. 108674, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108674.
- [19] F. J. Montiel-Santiago, M. J. Hermoso-Orzáez, and J. Terrados-Cepeda, “Sustainability and energy efficiency: Bim 6d. study of the bim methodology applied to hospital buildings. value of interior lighting and daylight in energy simulation,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 14, pp. 1–29, 2020, doi: 10.3390/su12145731.
- [20] S. Doodman, M. A. Mostafavi, R. Sengupta, and A. Afghantoloe, “A Novel Voronoi-Driven Optimization Approach for Point-Based Sensor Network Deployment,” *IEEE Access*, vol. 13, no. May, pp. 107244–107263, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3581846.
- [21] A. Afghantoloe and M. A. Mostafavi, “A local 3D voronoi-based optimization method for sensor network deployment in complex indoor environments,” *Sensors*, vol. 21, no. 23, 2021, doi: 10.3390/s21238011.
- [22] Y. Su, L. Guo, Z. Jin, and X. Fu, “A Voronoi-Based Optimized Depth Adjustment Deployment Scheme for Underwater Acoustic Sensor Networks,” *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 22, pp. 13849–13860, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3005685.
- [23] R. Xiong, Y. Q. Bai, W. Sun, and X. Liu, “Mobile sensor network node deployment via Central Voronoi Tessellation,” *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, ICICIP 2011*, vol. 1, no. PART 1, pp. 531–535, 2011, doi: 10.1109/ICICIP.2011.6008301.
- [24] S. Karimi-Bidhendi, J. Guo, and H. Jafarkhani, “Energy-Efficient Node Deployment in Heterogeneous Two-Tier Wireless Sensor Networks with Limited Communication Range,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 40–55, 2021, doi: 10.1109/TWC.2020.3023065.
- [25] A. Andreas, C. X. Mavromoustakis, E. Markakis, A. Bourdena, and G. Mastorakis, “Enhanced Self-Deployment in IoT Sensor Networks through Leveraging 3D-Voronoi

- Diagrams with an Advanced Genetic Algorithm,” *Proceedings - IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM*, pp. 1059–1064, 2024, doi: 10.1109/GLOBECOM52923.2024.10901679.
- [26] N. T. Hanh, H. T. T. Binh, N. X. Hoai, and M. S. Palaniswami, “An efficient genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks,” *Inf. Sci. (N Y)*, vol. 488, pp. 58–75, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.INS.2019.02.059.
- [27] B. A. Momar Ousmane, C. Thiam, and M. Mbaye, “Hybrid WOA-GA Algorithm for Coverage Optimization and Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks,” *2025 IEEE 15th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2025*, pp. 73–80, 2025, doi: 10.1109/CCWC62904.2025.10903915.
- [28] Z. Wang, L. Tian, W. Wu, L. Lin, Z. Li, and Y. Tong, “A Metaheuristic Algorithm for Coverage Enhancement of Wireless Sensor Networks,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/7732989.
- [29] Y. Xu, O. Ding, R. Qu, and K. Li, “Hybrid multi-objective evolutionary algorithms based on decomposition for wireless sensor network coverage optimization,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 68, pp. 268–282, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.ASOC.2018.03.053.
- [30] A. Casavola, G. Franzé, G. Gagliardi, and F. Tedesco, “Improving Lighting Efficiency for Traffic Road Networks: A Reputation Mechanism Based Approach,” *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1743–1753, 2022, doi: 10.1109/TCNS.2022.3182026.
- [31] A. K. Sikder, A. Acar, H. Aksu, A. S. Uluagac, K. Akkaya, and M. Conti, “IoT-enabled smart lighting systems for smart cities,” *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 639–645, 2018, doi: 10.1109/CCWC.2018.8301744.
- [32] A. Karapetyan, S. Chi-Kin Chau, K. Elbassioni, S. K. Azman, and M. Khonji, “Multisensor adaptive control system for IoT-empowered smart lighting with oblivious mobile sensors,” *ACM Trans. Sens. Netw.*, vol. 16, no. 1, 2019, doi: 10.1145/3369392.
- [33] K. R. Wagiman, M. N. Abdullah, M. Y. Hassan, and N. H. M. Radzi, “A new optimal light sensor placement method of an indoor lighting control system for improving energy performance and visual comfort,” *Journal of Building Engineering*, vol. 30, p. 101295, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101295.
- [34] M. Feyzi and H. Mojallali, “Optimal placement of light sensor for improving energy efficiency and visual comfort in smart buildings,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, p. 100681, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.PRIME.2024.100681.
- [35] J. Hu and M. Patel, “Optimized Selection and Placement of Sensors using Building Information Models (BIM),” pp. 198–202, 2014.
- [36] D. T. Delaney, G. M. P. O’Hare, and A. G. Ruzzelli, “Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks,” *BUILDSYS 2009 - Proceedings of the 1st ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, Held in Conjunction with ACM SenSys 2009*, no. November 2009, pp. 61–66, 2009, doi: 10.1145/1810279.1810293.
- [37] R. Brown, P. Schwartz, B. Norman, A. Khandekar, N. Jackson, and E. Page, “Developing Flexible , Networked Lighting Control Systems That Reliably Save Energy in California Buildings,” no. January, p. 132, 2020, [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1788002>

- [38] D. Plörer, S. Hammes, M. Hauer, V. Van Karsbergen, and R. Pfluger, “Control strategies for daylight and artificial lighting in office buildings-a bibliometrically assisted review,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 13, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/en14133852.
- [39] H. Wang, D. Zhang, Y. Wang, J. Ma, Y. Wang, and S. Li, “RT-Fall: A Real-Time and Contactless Fall Detection System with Commodity WiFi Devices,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 2, pp. 511–526, 2017, doi: 10.1109/TMC.2016.2557795.
- [40] M. Salman, L. A. Caceres-Najarro, Y. D. Seo, and Y. Noh, “WiSOM: WiFi-enabled self-adaptive system for monitoring the occupancy in smart buildings,” *Energy*, vol. 294, p. 130420, May 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.130420.
- [41] A. Stefanović and D. Gordić, “Modeling methodology of the heating energy consumption and the potential reductions due to thermal improvements of staggered block buildings,” *Energy Build.*, vol. 125, pp. 244–253, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.04.058.
- [42] J. Taco and L. Tipán, “Metodología para la determinación de indicadores de Eficiencia Eléctrica en la Zona Residencial,” *Revista Técnica “Energía,”* vol. 16, no. 2, pp. 70–90, 2020, doi: 10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.354.
- [43] Asociación Española de Normalización (UNE), “UNE 12464.1-Norma europea sobre la iluminación para interiores,” *Asociación Española de Normalización (UNE)*, pp. 1–15, 2022.
- [44] R. L. Haupt, S. E. Haupt, and A. J. Wiley, *Algorithms Second Edition*. 2004.
- [45] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene y Salud en el Trabajo, “NTP 211: Iluminación de los centros de trabajo,” *Ministerio De Trabajo Y Asuntos Sociales España*, vol. 6, p. 28, 1989, [Online]. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_211.pdf
http://balears.satse.es/content/download/10595/71046/file/ntp_211_iluminacion_centros_trabajo.pdf
- [46] Superintendencia de Riesgos de trabajo, “La iluminacion en el ambiente laboral. Guía Practica N°1,” *Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social, Presidencia de la Nación*, p. 26, 2016, [Online]. Available: <https://higieneysseguridadlaboralcvr.files.wordpress.com/2012/07/guiailuminacion.pdf>
- [47] C. Villegas, “Plan de manejo de los niveles de iluminación del área administrativa de una empresa se servicios metrológicos de Guayaquil,” p. 12, 2017.

CAPÍTULO VIII

8. ANEXOS

1. CÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO INICIO DEL CÓDIGO

```
PYTHON FINAL.py > fitness_func
1  #IMPORTACION DE LIBRERIAS
2
3  import numpy as np
4  import matplotlib.pyplot as plt
5  import pygad
6
7  #DIMENSIONES DEL AULA Y DEFINICION DE PUNTOS
8
9  Largo=12.96
10 Ancho=6.2
11
12 x_points=np.linspace(0, Largo,10)
13 y_points=np.linspace(0, Ancho,6)
14
15 points=np.array([(x,y) for x in x_points for y in y_points])
16
17 #Parametros del sensor Wi-Fi y pesos
18 R=6
19 w_cov= 0.85
20 w_dist= 0.10
21 w_eng=0.05
```

2. CÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO FUNCIÓN OBJETIVO (FITNESS)

```

23 #FUNCION FITNESS DEL ALGORITMO
24
25 def fitness_func(ga_instance, solution, solution_idx):
26     x_sen, y_sen=solution
27
28     #Penalizar
29     if not (0 <=x_sen <= Largo and 0 <= y_sen <=Ancho):
30         return -1000
31
32     #Distancia de aula
33     #centro_x= Largo/2
34     #centro_y= Ancho/2
35     distancia= np.sqrt((points[:,0]- x_sen)**2+(points[:,1]- y_sen)**2)
36
37     #Cobertura
38     coverage=np.mean(distancia<=R)
39
40     #Termino geometirco
41     mean_dist=np.mean(distancia)
42     dist_term=1/(mean_dist+1e-9)
43
44     energy_proxy=1-coverage
45
46     #Fitness
47
48     fitness=(w_cov*coverage)+(w_dist*dist_term)-(w_eng*energy_proxy)
49     return fitness

```

3. CÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO EJECUCIÓN DEL ALGORITMO

```

51 #CONFIGURACION Y EJECUCION DEL ALGORITMO GENETICO
52
53 ga_instance= pygad.GA(
54     num_generations=100,
55     num_parents_mating=10,
56     fitness_func= fitness_func,
57     sol_per_pop=30,
58     num_genes=2,
59     gene_space=[
60         {'low': 0, 'high': Largo},
61         {'low': 0, 'high': Ancho}
62     ],
63     mutation_percent_genes=25,
64     parent_selection_type="sss",
65     keep_parents=2,
66     crossover_type="single_point",
67     mutation_type="random"
68 )
69
70 ga_instance.run()
71
72 #EJECUCION Y VISUALIZACION DE RESULTADOS
73
74 solution, solution_fitness, solution_idx=ga_instance.best_solution()
75
76 best_x= solution[0]
77 best_y=solution[1]
78
79 #CALCULO DE COBERTURA
80 distancias_best=np.sqrt((points[:,0]-best_x)**2+(points[:,1]-best_y)**2)
81 coverage_best=np.mean(distancias_best<=R)

```

4. SIMULACIÓN DINÁMICA PARA JORNADA DE 12 HORAS, 97 PRIMEROS MINUTOS

Minuto	Hora	Ocupacion	Contador sin ocupacion	Estado sensor	Estado luminaria	Potencia total (W)
1	7:00	1	0	1	1	192
2	7:01	1	0	1	1	192
3	7:02	1	0	1	1	192
4	7:03	1	0	1	1	192
5	7:04	1	0	1	1	192
6	7:05	1	0	1	1	192
7	7:06	1	0	1	1	192
8	7:07	1	0	1	1	192
9	7:08	1	0	1	1	192
10	7:09	1	0	1	1	192
11	7:10	1	0	1	1	192
12	7:11	1	0	1	1	192
13	7:12	1	0	1	1	192
14	7:13	1	0	1	1	192
15	7:14	1	0	1	1	192
16	7:15	1	0	1	1	192
17	7:16	1	0	1	1	192
18	7:17	1	0	1	1	192
19	7:18	1	0	1	1	192
20	7:19	1	0	1	1	192
21	7:20	1	0	1	1	192
22	7:21	1	0	1	1	192
23	7:22	1	0	1	1	192
24	7:23	1	0	1	1	192
25	7:24	1	0	1	1	192
26	7:25	1	0	1	1	192
27	7:26	1	0	1	1	192
28	7:27	1	0	1	1	192
29	7:28	1	0	1	1	192
30	7:29	1	0	1	1	192
31	7:30	1	0	1	1	192
32	7:31	1	0	1	1	192
33	7:32	1	0	1	1	192
34	7:33	1	0	1	1	192
35	7:34	1	0	1	1	192
36	7:35	1	0	1	1	192
37	7:36	1	0	1	1	192
38	7:37	1	0	1	1	192
39	7:38	1	0	1	1	192
40	7:39	1	0	1	1	192
41	7:40	1	0	1	1	192
42	7:41	1	0	1	1	192
43	7:42	1	0	1	1	192
44	7:43	1	0	1	1	192
45	7:44	1	0	1	1	192
46	7:45	1	0	1	1	192
47	7:46	1	0	1	1	192

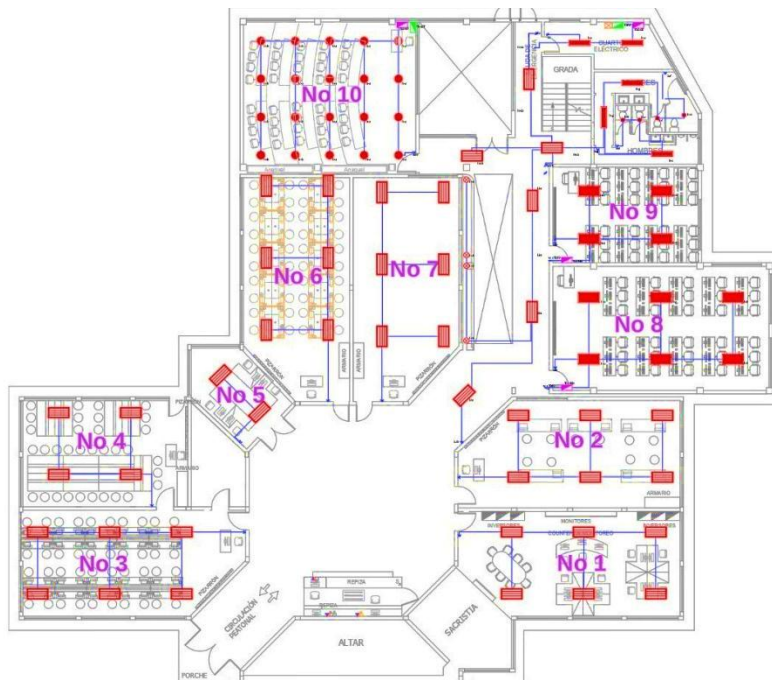
48	7:47	1	0	1	1	192
49	7:48	1	0	1	1	192
50	7:49	1	0	1	1	192
51	7:50	1	0	1	1	192
52	7:51	1	0	1	1	192
53	7:52	1	0	1	1	192
54	7:53	1	0	1	1	192
55	7:54	1	0	1	1	192
56	7:55	1	0	1	1	192
57	7:56	1	0	1	1	192
58	7:57	1	0	1	1	192
59	7:58	1	0	1	1	192
60	7:59	1	0	1	1	192
61	8:00	1	0	1	1	192
62	8:01	0	1	1	1	192
63	8:02	0	2	1	1	192
64	8:03	0	3	1	1	192
65	8:04	0	4	1	1	192
66	8:05	0	5	0	0	0
67	8:06	0	6	0	0	0
68	8:07	0	7	0	0	0
69	8:08	0	8	0	0	0
70	8:09	0	9	0	0	0
71	8:10	0	10	0	0	0
72	8:11	0	11	0	0	0
73	8:12	0	12	0	0	0
74	8:13	0	13	0	0	0
75	8:14	0	14	0	0	0
76	8:15	0	15	0	0	0
77	8:16	0	16	0	0	0
78	8:17	0	17	0	0	0
79	8:18	0	18	0	0	0
80	8:19	0	19	0	0	0
81	8:20	0	20	0	0	0
82	8:21	0	21	0	0	0
83	8:22	0	22	0	0	0
84	8:23	0	23	0	0	0
85	8:24	0	24	0	0	0
86	8:25	0	25	0	0	0
87	8:26	0	26	0	0	0
88	8:27	0	27	0	0	0
89	8:28	0	28	0	0	0
90	8:29	0	29	0	0	0
91	8:30	0	30	0	0	0
92	8:31	0	31	0	0	0
93	8:32	0	32	0	0	0
94	8:33	0	33	0	0	0
95	8:34	0	34	0	0	0
96	8:35	0	35	0	0	0
97	8:36	0	36	0	0	0

5. SIMULACIÓN DINÁMICA PARA JORNADA DE 10 HORAS, 97 PRIMEROS MINUTOS

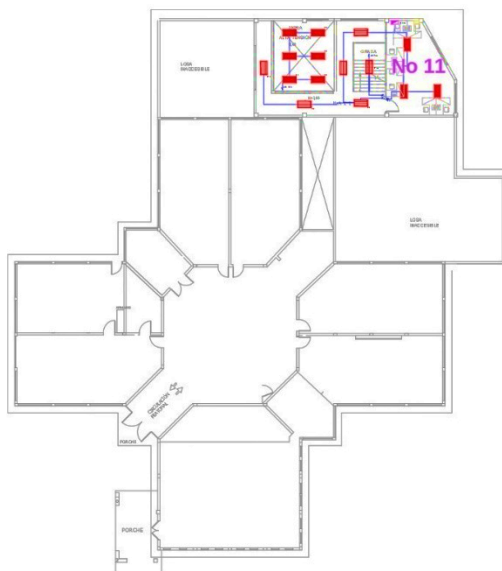
Minuto	Hora	Ocupacion	Contador sin ocupacion	Estado sensor	Estado luminaria	Potencia total (W)
1	7:00	1	0	1	1	192
2	7:01	1	0	1	1	192
3	7:02	1	0	1	1	192
4	7:03	1	0	1	1	192
5	7:04	1	0	1	1	192
6	7:05	1	0	1	1	192
7	7:06	1	0	1	1	192
8	7:07	1	0	1	1	192
9	7:08	1	0	1	1	192
10	7:09	1	0	1	1	192
11	7:10	1	0	1	1	192
12	7:11	1	0	1	1	192
13	7:12	1	0	1	1	192
14	7:13	1	0	1	1	192
15	7:14	1	0	1	1	192
16	7:15	1	0	1	1	192
17	7:16	1	0	1	1	192
18	7:17	1	0	1	1	192
19	7:18	1	0	1	1	192
20	7:19	1	0	1	1	192
21	7:20	1	0	1	1	192
22	7:21	1	0	1	1	192
23	7:22	1	0	1	1	192
24	7:23	1	0	1	1	192
25	7:24	1	0	1	1	192
26	7:25	1	0	1	1	192
27	7:26	1	0	1	1	192
28	7:27	1	0	1	1	192
29	7:28	1	0	1	1	192
30	7:29	1	0	1	1	192
31	7:30	1	0	1	1	192
32	7:31	1	0	1	1	192
33	7:32	1	0	1	1	192
34	7:33	1	0	1	1	192
35	7:34	1	0	1	1	192
36	7:35	1	0	1	1	192
37	7:36	1	0	1	1	192
38	7:37	1	0	1	1	192
39	7:38	1	0	1	1	192
40	7:39	1	0	1	1	192
41	7:40	1	0	1	1	192
42	7:41	1	0	1	1	192
43	7:42	1	0	1	1	192
44	7:43	1	0	1	1	192
45	7:44	1	0	1	1	192
46	7:45	1	0	1	1	192
47	7:46	1	0	1	1	192

48	7:47	1	0	1	1	192
49	7:48	1	0	1	1	192
50	7:49	1	0	1	1	192
51	7:50	1	0	1	1	192
52	7:51	1	0	1	1	192
53	7:52	1	0	1	1	192
54	7:53	1	0	1	1	192
55	7:54	1	0	1	1	192
56	7:55	1	0	1	1	192
57	7:56	1	0	1	1	192
58	7:57	1	0	1	1	192
59	7:58	1	0	1	1	192
60	7:59	1	0	1	1	192
61	8:00	1	0	1	1	192
62	8:01	0	1	1	1	192
63	8:02	0	2	1	1	192
64	8:03	0	3	1	1	192
65	8:04	0	4	1	1	192
66	8:05	0	5	0	0	0
67	8:06	0	6	0	0	0
68	8:07	0	7	0	0	0
69	8:08	0	8	0	0	0
70	8:09	0	9	0	0	0
71	8:10	0	10	0	0	0
72	8:11	0	11	0	0	0
73	8:12	0	12	0	0	0
74	8:13	0	13	0	0	0
75	8:14	0	14	0	0	0
76	8:15	0	15	0	0	0
77	8:16	0	16	0	0	0
78	8:17	0	17	0	0	0
79	8:18	0	18	0	0	0
80	8:19	0	19	0	0	0
81	8:20	0	20	0	0	0
82	8:21	0	21	0	0	0
83	8:22	0	22	0	0	0
84	8:23	0	23	0	0	0
85	8:24	0	24	0	0	0
86	8:25	0	25	0	0	0
87	8:26	0	26	0	0	0
88	8:27	0	27	0	0	0
89	8:28	0	28	0	0	0
90	8:29	0	29	0	0	0
91	8:30	0	30	0	0	0
92	8:31	0	31	0	0	0
93	8:32	0	32	0	0	0
94	8:33	0	33	0	0	0
95	8:34	0	34	0	0	0
96	8:35	0	35	0	0	0
97	8:36	0	36	0	0	0

6. NUMERACIÓN DEL TOTAL DE AULAS EXISTENTES



7. NUMERACIÓN DEL TOTAL DE AULAS EXISTENTES: AULA 11



8. AULA REPRESENTATIVA DEL CASO DE ESTUDIO



9. AULA CON LUMINARIAS LED 60W



10. AULA CON LUMINARIAS LED 18W



11. AULA CON LUMINARIAS LED 60W



12. RESULTADO DE OPTIMIZACIÓN EN UNA SEGUNDA SIMULACIÓN

Ubicacion optima del sensor (GA) priorizando cobertura + criterio energetico proxy

