



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Evaluación e implementación de un sistema de gestión de iluminación
que optimice el recurso energético en espacios disponibles en un
establecimiento educacional. Caso Colonia Árabe.**

POR

Matías Andrés Aguayo Muñoz

Memoria de Título presentada a la Facultad de ingeniería de la Universidad
de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Eléctrico.

Profesores Guía:

Dr. Luis García Santander

Dra. Andrea Martínez Arias

Concepción, agosto de 2025

© 2025 Matías Andrés Aguayo Muñoz.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por siempre creer en mí y brindarme su apoyo incondicional durante todas las etapas de mi vida, a mi pareja por su ayuda en los momentos difíciles y a la profesora Andrea por guiarme durante este periodo.

Agradecimientos al proyecto Fondecyt iniciación 11240683 Classroom Retrofit, financiado por ANID.

Resumen

El presente estudio aborda la problemática de la ineficiencia energética y las deficiencias en calidad de iluminación en aulas de escuelas públicas chilenas, particularmente aquellas construidas en las décadas de 1960 y 1970. A partir de un diagnóstico detallado en la Escuela Colonia Árabe, ubicada en Los Ángeles, Región del Biobío, se diseña, implementa y evalúa un sistema de control de iluminación basado en luz natural. Este sistema emplea luminarias LED, sensores de iluminancia y un controlador de bajo costo (ESP32), permitiendo ajustar de manera automática los niveles de iluminación artificial según la disponibilidad de luz natural.

Se realizan simulaciones lumínicas con el software DIALux 13.0 versión gratuita y se construyen prototipos funcionales para validar el desempeño en condiciones reales. El sistema de control demuestra ser capaz de cumplir con los estándares normativos nacionales e internacionales (UNE-EN 12464 y RIC N°10), mejorando la uniformidad e intensidad de iluminación, reduciendo el deslumbramiento y logrando un ahorro energético estimado de un 15,4% anual.

La implementación se realiza con tecnologías de bajo costo, garantizando la viabilidad técnica y económica del sistema, lo que lo hace replicable en otros establecimientos educacionales con recursos limitados. Este trabajo contribuye al proyecto de investigación Fondecyt iniciación 11240683 Classroom Retrofit financiado por ANID, incentivando a ambientes escolares más confortables, eficientes y sostenibles.

Abstract

The present study addresses the issue of energy inefficiency and deficiencies in lighting quality in classrooms of Chilean public schools, particularly those built in the 1960s and 1970s. Based on a detailed diagnosis conducted at the Escuela Colonia Árabe, located in Los Ángeles, Biobío Region, a lighting control system based on natural light is designed, implemented, and evaluated. This system employs LED luminaires, illuminance sensors, and a low-cost controller (ESP32), enabling the automatic adjustment of artificial lighting levels according to the availability of natural light.

Lighting simulations are carried out using the free version of DIALux 13.0 software, and functional prototypes are built to validate performance under real conditions. The control system proves capable of meeting national and international regulatory standards (UNE-EN 12464 and RIC No. 10), improving lighting uniformity and intensity, reducing glare, and achieving an estimated annual energy saving of 15.4%.

The implementation is carried out with low-cost technologies, ensuring the technical and economic feasibility of the system, making it replicable in other educational institutions with limited resources. This work contributes to the Fondecyt Initiation Research Project No. 11240683 *Classroom Retrofit*, funded by ANID, promoting more comfortable, efficient, and sustainable school environments.

Tabla de contenidos

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
ALCANCES	2
LIMITACIONES	3
MARCO TEÓRICO	4
FUNDAMENTOS DE LA ILUMINACIÓN	4
NORMATIVAS DE ILUMINACIÓN	9
TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN	10
SISTEMAS DE CONTROL DE ILUMINACIÓN	12
ANTECEDENTES	14
METODOLOGÍA	17
CASO DE ESTUDIO	17
PROCESO DE INVESTIGACIÓN	18
RECOLECCIÓN DE DATOS	21
SISTEMA DE CONTROL	24
SISTEMA DE COMUNICACIÓN	25
DISEÑO DE SENSORES	26
RESULTADOS	28
SITUACIÓN ACTUAL DE ILUMINACIÓN	28
SIMULACIONES LUMÍNICAS	31
DESARROLLO DE PROTOTIPOS	34
CALIBRACIÓN DE SENSORES	37
DISEÑO CARCASA DE SENSORES	39
IMPLEMENTACIÓN EN ESCUELA COLONIA ÁRABE	39
DISCUSIONES	46
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	52
REFERENCIAS	53
ANEXO A. PLANIMETRÍA, MEDICIONES Y DOCUMENTACIÓN ESCUELA COLONIA ÁRABE.	59
ANEXO B. RESULTADOS DE SIMULACIÓN	75
ANEXO C. ESQUEMAS DE CONEXIÓN Y DOCUMENTOS DE SISTEMA DE ILUMINACIÓN	81
ANEXO D: CÓDIGOS	85
ANEXO E: MATERIALES Y COSTOS	103

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de eficacia de cada tipo de luminaria. Elaboración propia.	11
Tabla 2: Comparativa de consumo eléctrico de sistema LED con sistema fluorescente. Elaboración propia.....	44

Índice de figuras

Fig. 1: Espectro electromagnético. Fuente (UC Davis, 2025).	4
Fig. 2: Curva fotométrica de panel led 600x600 40W Evolux. Fuente (EVOLUX, s. f.).....	6
Fig. 3: Diferentes temperaturas del color de luminarias, cálidas (izquierda) a frías (derecha). Fuente (lighting, 2025).....	7
Fig. 4 : Diferentes niveles de representación cromática. Fuente (northerncult, 2025).	7
Fig. 5: a) ubicación de Los Ángeles, Chile b) vista de los pasillos del pabellón escolar. Fuente (Martínez et al., 2021).	17
Fig. 6: a) sensor de iluminancia b) medidor de iluminancia. Elaboración propia.....	21
Fig. 7: ESP32 WROM 38 PIN. Fuente (andre adrian, 2019).....	22
Fig. 8: a) modulo AC dimmer b) sensor de iluminancia BH1750. Fuentes a) (robotdyn, s. f.) b) (naylampmechatronics, 2020).....	23
Fig. 9: Diagrama de bloques de funcionamiento de sistema de control basado en luz natural. Elaboración propia.	24
Fig. 10: Placa ESP32-C3-SuperMini. Fuente (espboards, 2025).....	26
Fig. 11: a) sistema de iluminación fluorescente b) consumo de una luminaria completa. Elaboración propia.....	28
Fig. 12: Gráfica de degradación de flujo luminoso para un tubo fluorescente PHILIPS serie TL-D. Fuente (PHILIPS, 2023).....	29
Fig. 13: Iluminación promedio del aula en los meses agosto a noviembre. Elaboración propia basados en mediciones realizadas en Proyecto Fondecyt Iniciación 11240683.	30
Fig. 14: Iluminación promedio del aula en los meses de agosto a noviembre. Elaboración propia basados en mediciones realizadas en Proyecto Fondecyt Iniciación 11240683.	31
Fig. 15: Modelo de escuela Colonia Árabe, vista lateral. Elaboración propia.	32
Fig. 16: Zonas de actuación de control de iluminación. Elaboración propia.	32

Fig. 17: Distribución de luminarias. Elaboración propia.	33
Fig. 18: Prototipo 2 panel LED 60 x 60 cm. Elaboración propia.....	35
Fig. 19: Gráfica de funcionamiento de sistema de control, fecha 09-06. Elaboración propia.	36
Fig. 20: Gráfica de funcionamiento de sistema de control, fecha 06-06. Elaboración propia.	36
Fig. 21: Ubicación de sensores para calibración. Elaboración propia.	37
Fig. 22 : Gráfica comparativa de medición de sensores de iluminancia sin calibrar. Elaboración propia.....	38
Fig. 23: Error de sensores según nivel iluminancia medida. Elaboración propia.	38
Fig. 24: Gráfica comparativa de medición de sensores de iluminancia calibrados por software. Elaboración propia.	38
Fig. 25: a) carcasa de sensores b) ubicación en luminaria. Elaboración propia.....	39
Fig. 26: Tablero de Alumbrado y control con selector y dimmer manuales. Elaboración propia. ...	41
Fig. 27: a) suplemento para carcasa de sensores b) resultado final de carcasa de sensores. Elaboración propia.	42
Fig. 28: a) instalación de driver regulable b) instalación de sensor de iluminancia. Elaboración propia.....	42
Fig. 29: a) palanca selectora con inscripción de modo manual y ahorro b) resultado final de sistema de iluminación. Elaboración propia.	43

Abreviaciones

Mayúsculas

A	: Ampere.
AC	: Corriente alterna, del inglés Alternating Current.
CRI	: Índice de reproducción cromática, del inglés Color Rendering Index.
DC	: Corriente Continua, del inglés Direct Current.
FP	: Factor de Potencia.
Hz	: Hertz.
IESNA	: La Sociedad de Ingeniería de Iluminación de América del Norte, del inglés Illuminating Engineering Society of North America.
LED	: Diodo emisor de luz, del inglés Light-Emitting Diode.
PI	: Proporcional e Integral.
SEC	: Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
UGRL	: Índice de deslumbramiento unificado, del inglés Unified Glare Rating.
V	: Voltaje.
VA	: Volt Ampere.
W	: Watt.

Minúsculas

cd	: candela.
lm	: lumen.
lx	: lux.
m	: metro.
triac	: triodo de corriente alterna.

Introducción

La iluminación en los espacios educacionales desempeña un rol fundamental a la hora de poner en marcha el sistema de enseñanza-aprendizaje. Tanto alumnos como docentes se ven afectados por la exposición a la iluminación, otorgando tantos beneficios como malestares según la calidad de ésta. Diversas investigaciones han detallado que algunas características de la iluminación pueden ser beneficiosas, como una alta temperatura del color la cual puede afectar positivamente al estado de alerta y la concentración (Li, 2024). También la intensidad de iluminación muestra gran mejora en el estado de ánimo de los estudiantes (Askaripoor, 2021), esto ayuda a la resolución de problemas, memoria y concentración (Knes, 1995).

En Chile, el pliego técnico normativo RIC N°10 (SEC, 2020), e internacionalmente normativas como la UNE-EN 12464-1 (AENOR, 2022) establecen estándares mínimos para garantizar condiciones lumínicas adecuadas en establecimientos educacionales. Sin embargo, pese a la existencia de estas regulaciones, muchas escuelas públicas en Chile, especialmente las construidas durante las décadas de 1960 y 1970 bajo modelos prefabricados, no cumplen con dichas exigencias (Martínez et al., 2021). Estas escuelas suelen contar con luminarias basadas en tubos fluorescentes, con baja eficiencia energética, alto nivel de deterioro y escasa adaptabilidad a las condiciones de luz natural. Estudios recientes como (Martínez A. et al., 2024) identifican problemas como deslumbramiento excesivo, zonas con iluminación deficiente, y variabilidad estacional significativa en los niveles de iluminancia, afectando la experiencia educativa y el uso de la energía.

Frente a este escenario, el presente trabajo de memoria de título propone el diseño, implementación y evaluación de un sistema de control de iluminación para aulas escolares. Este sistema cuenta con luminarias tipo LED, sensores de luz ambiental y un sistema de control que permite ajustar automáticamente los niveles de iluminación artificial en función de la luz natural. Este conjunto de soluciones permite garantizar el cumplimiento normativo, reducir el consumo eléctrico y se espera que mejore el confort visual de estudiantes y docentes.

La propuesta es aplicada y validada en una sala de clases de la Escuela Colonia Árabe, ubicada en la ciudad de Los Ángeles, Región del Biobío. Se utilizan simulaciones del software DIALux para modelar escenarios de iluminación. Se desarrolla un prototipo funcional para evaluar su desempeño en

condiciones reales, aplicando técnicas de control junto con sensores de iluminancia. Con ello, se espera demostrar que es posible implementar soluciones técnicas de bajo costo y alta efectividad, que contribuyan al mejoramiento de la infraestructura escolar y al cumplimiento de los objetivos del Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022–2026 del Gobierno de Chile (Ministerio de Energía, 2021).

Esta investigación se desarrolla bajo el proyecto de investigación Classroom Retrofit (ANID Fondecyt Iniciación #11240683), lo que ha permitido la financiación necesaria para la implementación de este proyecto y beneficiar a estudiantes y docentes de la escuela Colonia Árabe.

Objetivo general

- Mejorar los niveles de iluminación de salas de clases de establecimientos educacionales, otorgando mayor eficiencia energética mediante un sistema de control basado en luz natural. Caso Escuela Colonia Árabe.

Objetivos específicos

- Asegurar niveles de iluminación conforme con las normativas nacionales e internacionales.
- Implementar un sistema de control basado en luz natural.
- Optimizar el recurso energético utilizado en iluminación.

Alcances

El presente trabajo tiene un alcance experimental centrado en la optimización del uso de la energía eléctrica en iluminación. El principal objetivo es generar mayor eficiencia energética y disminuir los costos asociados a la luz artificial, asegurando el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales vigentes en cuanto a intensidad lumínica, uniformidad de la iluminación e índice de deslumbramiento uniforme.

La relevancia de la integración de tecnologías de bajo costo es vital para el desarrollo de este proyecto. Se evalúa la factibilidad técnica y económica de la implementación en establecimientos educacionales. Esta decisión busca demostrar que es posible obtener resultados significativos en eficiencia energética utilizando componentes accesibles, promoviendo así la replicabilidad del sistema en contextos de recursos limitados.

Limitaciones

Si bien el confort visual está presente en el proceso de investigación y diseño, este no se puede validar directamente por medio de este trabajo. Esto debido a que el diseño y aplicación de adecuados instrumentos de evaluación requiere mayor tiempo y recursos que los disponibles en esta etapa. Por lo tanto, si bien el confort visual ha sido considerado en el diseño del sistema, su impacto debe ser evaluado en investigaciones futuras.

Por otra parte, el financiamiento constituye una restricción significativa. El costo de sensores y equipos especializados puede ser elevado para su implementación en espacios educativos, esto cobra mayor relevancia a la hora de querer integrar estos sistemas a un mayor número de establecimientos. Por ello, este proyecto pone énfasis en el uso de hardware de bajo costo como alternativa viable, incentivando su adopción por parte de otras comunidades educativas.

El uso de componentes de bajo costo no busca únicamente facilitar la replicación del sistema, sino también promover la adopción de soluciones económicas que, además de beneficiar la economía del establecimiento, contribuyan a mejorar la calidad de vida de quienes utilizan estos espacios.

Marco teórico

Fundamentos de la iluminación

La luz como ente físico es una forma de radiación electromagnética que se propaga en forma de ondas. El espectro electromagnético, el cual es la distribución de las ondas electromagnéticas, abarca un amplio rango de longitudes de onda y frecuencias, que incluyen algunas como: ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X, etc. (Khan Academy, 2025). Como se aprecia en la figura 1 dentro del espectro electromagnético la luz visible corresponde a una fracción muy limitada, esta se encuentra en longitudes de onda entre los 380 y 750 nanómetros.

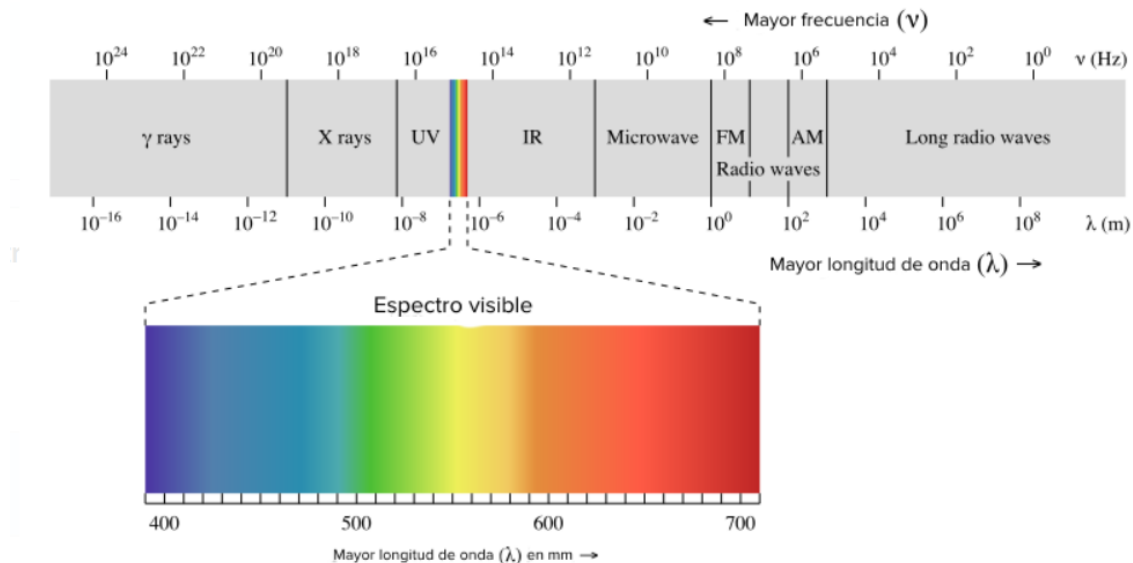


Fig. 1: Espectro electromagnético. Fuente (UC Davis, 2025).

La luz siempre ha sido parte de la vida, siendo fuente de energía, de alimento y de ayuda para todos los seres vivos del planeta. Una definición de la luz desde el punto de vista de la ingeniería puede ser la empleada por la IESNA, que la define como “energía radiante que es capaz de excitar la retina humana y crear una sensación visual.” (Rea & Illuminating Engineering Society of North America, 2000).

Esta definición quizás está un poco limitada a simplemente mostrar la capacidad que tiene la luz visible a permitirnos ver objetos con claridad, dejando un poco de lado las características psicológicas

que provoca la luz sobre nuestra percepción del mundo. Por esto una definición más enriquecedora y que usaremos en este estudio es la siguiente:

“La luz es una radiación electromagnética que puede dar lugar inmediatamente a una sensación o percepción visual en los seres humanos.”(Kling et al., 2024)

Esta definición deja abierta la puerta a la percepción de la luz como un creador de sensaciones, lo que está muy ligado a como nos hace sentir la luz y como los diferentes parámetros de ésta pueden afectar los diferentes aspectos del desarrollo de las actividades cotidianas.

Los parámetros de la iluminación son características propias de cada fuente emisora de luz, algunas de las cuales definen el color de la luz, la intensidad, la capacidad de reproducir fielmente colores, etc. Los principales parámetros serán definidos a continuación.

- Flujo luminoso: el flujo luminoso es la cantidad de radiación electromagnética visible emitida por una fuente luminosa en una unidad de tiempo (Instituto de Salud Pública de Chile, 2021). Su unidad de medida es el lumen. Este valor expresa la potencia de una determinada fuente de luz. Quiere decir que entre mayor sea este valor, mayor será la capacidad de emitir luz visible.
- Flujo radiante: es la cantidad total de radiación electromagnética emitida por una fuente en una unidad de tiempo. (Rea & Illuminating Engineering Society of North America, 2000). Su unidad de medida es el watt. A diferencia del flujo luminoso, este parámetro considera toda la emisión de luz, ya sea en el rango visible o no, por lo que representa la potencia total de salida de la fuente.
- Eficacia luminosa: es la relación entre el flujo luminoso y el flujo radiante. Se expresa en lumen/Watt. La máxima eficacia lumínica que da una fuente de luz blanca que solo emitiera radiación visible es de aproximadamente de 220 lm/W.(Rea & Illuminating Engineering Society of North America, 2000)

- Intensidad luminosa: es el cociente entre el flujo luminoso y un ángulo sólido dado (AENOR, 2020). Su unidad de medida es candela y se refiere a la cantidad de radiación emitida a 540×10^{12} Hz en una dirección específica. Como la mayoría de las fuentes de luz emiten a diferentes intensidades en diferentes direcciones, la intensidad luminosa se debe definir en todas direcciones. Para hacer un uso más eficiente de esta información se usa un gráfico polar. Este gráfico llamado curva fotométrica es presentado en la figura 2 y muestra la distribución de intensidad luminosa en el espacio.

Normalmente la curva fotométrica representa los dos planos verticales: el transversal (0°) y longitudinal (90°), también presenta la intensidad luminosa como circunferencias concéntricas en donde el centro tiene un valor de 0, por lo que el valor de intensidad máxima será el punto más alejado del centro. Finalmente las líneas que cortan estas circunferencias representan la dirección de la intensidad luminosa en grados (UPC, 2025).

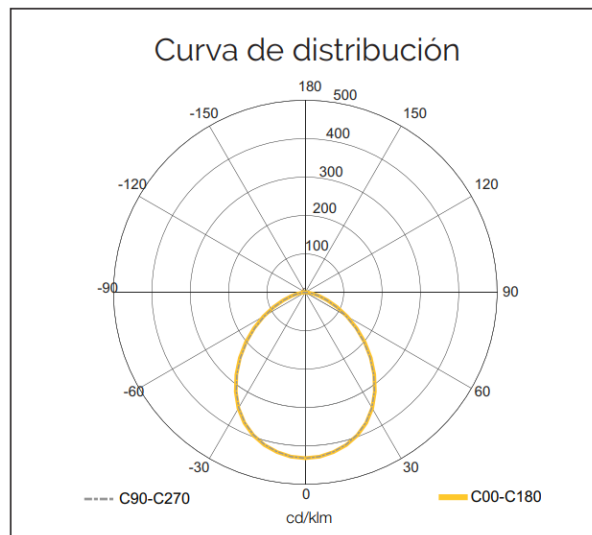


Fig. 2: Curva fotométrica de panel led 600x600 40W Evolux. Fuente (EVOLUX, s. f.)

- Iluminancia: es la medida de la cantidad de luz que incide sobre una superficie por unidad de área. Su unidad de medida es el lux, donde $1 \text{ lx} = 1 \text{ cd} \cdot \text{m}^2$. La iluminancia es de suma importancia al momento de diseñar sistemas de iluminación, ya que esta determina la luminosidad del área y afecta en el confort, el rendimiento y la seguridad. (Ozenen, 2024).

- Luminancia: es la relación entre el flujo luminoso irradiado sobre una superficie en una dirección dada y el área luminosa aparente (Kling et al., 2024). Su unidad de medida son candela por unidad de área, cd/m^2 . En simples palabras es la relación entre cuanta luz llega a una superficie en comparación con el resto visible.
- Temperatura del color: es la medida del color aparente de una fuente luminosa. Se expresa en grados Kelvin. Este parámetro puede impactar en el color percibido, lo que afecta al confort y al desempeño visual (Ozenen, 2024). Temperaturas del color como 2000-3000k son consideradas cálidas, mientras que temperaturas de 5000 a 6500k son consideradas frías. La figura 3 muestra las temperaturas del color ordenadas de cálidas (izquierda) a frías (derecha).



Fig. 3: Diferentes temperaturas del color de luminarias, cálidas (izquierda) a frías (derecha). Fuente (lighting, 2025).

- Índice de reproducción cromática (CRI) : es la medida de la capacidad de una fuente de luz de representar el color de los objetos comparada con una luz de referencia a la misma temperatura de color (Ozenen, 2024). Se mide en una escala de 0 – 100 donde 0 es nula representación de color y 100 es una representación ideal. La figura 4 muestra la representación del color junto con su valor en la escala CRI.



Fig. 4 : Diferentes niveles de representación cromática. Fuente (northerncult, 2025).

- Deslumbramiento: se distinguen dos tipos de deslumbramiento, el molesto y el perturbador. El deslumbramiento molesto produce una sensación desagradable sin perturbar la visión del objeto. El deslumbramiento perturbador perturba la visión al objeto, pero no necesariamente produce una sensación molesta (AENOR, 2020). Es importante evitar los deslumbramientos en espacios de trabajo donde se necesita una alta agudeza visual.
- Índice de deslumbramiento unificado (UGRL): es una medida del deslumbramiento producido por luminarias dentro de un espacio. La escala va de 10 – sin deslumbramiento a 30 – deslumbramiento psicológicamente inaceptable.
- Uniformidad de la iluminancia: es la relación entre la iluminancia mínima y la iluminancia media en una superficie (AENOR, 2022). Su valor puede ir de 0 a 100, donde 0 es nula uniformidad y 100 es una superficie perfectamente uniforme.

La combinación de estos parámetros crea ambientes que pueden ser tanto beneficiosos como molestos para los ocupantes de estos espacios. Investigaciones muestran que una alta temperatura del color puede afectar positivamente al estado de alerta y la concentración (Li, 2024), la intensidad de iluminación muestra gran impacto en el estado de ánimo de los estudiantes (Askaripoor, 2021), además de que muestra efectos sobre la concentración de éstos (Sleegers et al., 2013). En contra parte una mala uniformidad de la iluminación, un mal nivel de iluminación y deslumbramientos excesivos pueden traer consecuencias como fatiga visual y jaquecas.

Normativas de iluminación

Las normativas de iluminación son referentes que establecen los criterios mínimos de iluminación permitidos en distintos espacios. Estas normas son regionales y obedecen a los criterios definidos por expertos en cada región del mundo. Las dos normas internacionales más importantes son la europea UNE 12464 y la norteamericana IES RP-3-20. En Chile la norma RIC N°10 establece los estándares mínimos de iluminación.

Estas normas presentan los estándares de iluminación para una multitud de espacios, en este momento se enfocará en los requisitos exigidos para aulas de escuelas. Se presenta un pequeño resumen de las exigencias de cada norma.

- UNE-12464 Iluminación de los lugares de trabajo Parte 1: lugares de trabajo en interiores. Esta norma europea propone los siguientes parámetros para aulas de uso general: 500 lux, uniformidad de 0,60, CRI 80, UGRL 19. Para niños pequeños se permite 300 lux si es regulado. Además, especifica requisitos de iluminancia en paredes (150 lux) y techos (100 lux), considera la luz ambiental, y exige control de la iluminación para adaptarse a diferentes actividades y escenarios (AENOR, 2022).
- RIC N°10: el pliego técnico normativo RIC N°10 de la SEC fija las exigencias mínimas de 300 lux para aulas estándar y 500 lux para clases nocturnas o educación de adultos, UGRL 19, uniformidad de 0.6 y CRI 80. Como observación recomienda que la iluminación sea controlable (no especifica un método), se deben evitar reflejos en pizarras y deslumbramientos (SEC, 2020).
- ANSI/IES RP-3-20: la práctica recomendada para instalaciones educativas establece un mínimo de 300 lux para aulas generales, una uniformidad de 0,6 y CRI \geq 80. También se destacan medidas contra el deslumbramiento y los reflejos, sugiriendo distribuciones lumínicas controladas y orientación adecuada de las luminarias. Se recomienda el uso de sistemas de control, especialmente en combinación con luz natural, para optimizar el confort visual y la eficiencia energética (IES, 2022).

De las normativas de iluminación revisadas, destaca la normativa europea UNE-EN 12464 por presentar los requisitos más exigentes y por contemplar un mayor número de características relacionadas con la calidad de la iluminación. Además, la normativa chilena vigente (RIC N°10) toma como referencia dicha norma europea, por lo que resulta razonable asumir que al cumplir con los requerimientos de la UNE-EN 12464, también se satisfacen las exigencias del RIC N°10. En consideración a lo anterior, este estudio adoptará como base normativa la UNE-EN 12464 para el diseño del sistema de iluminación destinado a aulas escolares.

Tecnologías de iluminación

A lo largo de la historia el ser humano ha intentado iluminar zonas de diversas formas. La inicial y más básica es a través de fuego. Para realizar este proceso inicialmente se quemaba madera, en siglos posteriores fue reemplazada por aceite y ceras que retardaban la quema de una mecha. Estos dispositivos como lámparas de aceite o velas se usaron durante décadas como fuentes de luz.

Sin embargo, no fue hasta la llegada de la electrificación masiva y la invención de la bombilla eléctrica funcional la que trajo consigo la llegada de la iluminación en masa de espacios. Aunque la bombilla eléctrica, conocida en Chile como ampolleta, no se diferencia mucho del método original de iluminar, la cual es quemar algo. La ampolleta funciona de la siguiente manera: un filamento encerrado dentro de una bola de cristal se calienta a más de 600°C por acción del paso de la corriente, esta bola se encuentra cerrada al vacío, por lo que no hay oxígeno que permita que este filamento se encienda. Esta temperatura permite al filamento irradiar ondas electromagnéticas en el rango visible, pero la mayor parte de esta radiación se emite en forma de calor (ondas infrarrojas), y sólo una pequeña parte se utiliza para iluminación. Esta luminaria solo transforma el 5% de la energía eléctrica consumida en luz visible (Oladiran Kayode Olajiga et al., 2024).

Actualmente en Chile se encuentra prohibida la comercialización de este tipo de luminarias, esto fue dictado por la resolución 60 extensa promulgada el 18 de diciembre del 2013. Esta resolución prohíbe explícitamente la comercialización de lámparas incandescentes cuya clase de eficiencia energética sea D, E, F o G, para toda lámpara con potencia entre 25W y 200W (MINISTERIO DE ENERGÍA, 2013).

A mediados del siglo 20 una nueva forma de iluminación cobró fuerza, este sistema se basa en el paso de una corriente eléctrica a través de un tubo de vidrio lleno de combinaciones de gases inertes, comúnmente vapor de mercurio con neón o argón. Este tubo provoca una descarga eléctrica en su interior semejante a un rayo. Para aumentar la eficiencia de este objeto se recubrieron sus paredes con fosforo, el cual permite absorber las ondas UV y emitirlas dentro del rango visible. Este sistema se llama tubo fluorescente, consume 75% menos de energía que las ampollas incandescentes y duran 10 veces más (energy, 2013). Un contra de esta tecnología es el uso de materiales tóxicos en su construcción, lo cual es perjudicial en caso de destrozado del tubo.

Un salto revolucionario se dio en 1962 donde Nick Holonyak, trabajador de General Electric, invento el primer diodo emisor de luz visible, más conocido como LED. Pero no fue hasta el año 2002 en el cual la tecnología de iluminación LED llegó de manera masiva a la población con la primera bombilla LED residencial (energy, 2013). Este dispositivo semiconductor es una gran innovación técnica, su construcción y funcionamiento es algo más complejo en los anteriores métodos ya que se basa en uniones de diferentes elementos químicos, los cuales al hacer pasar una corriente eléctrica generan espontáneamente luz visible. Este sistema contiene grandes ventajas versus sus competidores, es 80% más eficiente que las ampollas incandescentes, tiene una vida útil de 3 a 5 veces mayor que los tubos fluorescentes y 30 veces más que las incandescentes (U.S. Department of energy, 2025), son más robustos y no contienen materiales tóxicos (Ozenen, 2024). La tabla 1 muestra la comparativa entre las eficacias de las distintas fuentes luminosas mencionadas.

Tabla 1: Comparación de eficacia de cada tipo de luminaria. Elaboración propia.

Tipo de bombilla	Eficacia (lm/W)
Incandescente	15
Fluorescente compacta	73
LED	90

Las ventajas de la tecnología LED han llevado a que este sistema esté reemplazando a los tubos fluorescentes, además la caída de los precios de luminarias con esta tecnología ha permitido el uso en la mayoría de los sectores residenciales y productivos.

Sistemas de control de iluminación

Los sistemas de control de iluminación surgen en la necesidad de cumplir dos funciones claves: crear ambientes más confortables y ahorrar energía. Los diferentes sistemas de control tienden a estar enfocados más hacia uno de los dos objetivos, es deber del usuario identificar cuál es el que más se acomoda a su realidad, uso y espacio.

Algunos de los métodos de control son los siguientes:

- Sensores on/off: este sistema de control de iluminación funciona encendiendo las luces únicamente cuando detecta la presencia de personas en el área de uso. Cuando no hay nadie presente, el sensor lo identifica y apaga automáticamente las luces. Existen muchos tipos de sensores on/off en el mercado y cada uno funciona de manera diferente, los más comunes son los sensores de presencia humana y los sensores de movimiento. La ventaja de este sistema es que permite ahorrar energía al encender las luces solo cuando es necesario. La desventaja es que no permite controlar otros aspectos, como la intensidad de la iluminación, por lo que sólo se comporta como un interruptor automático.
- Regulación de intensidad lumínica (dimmer): sistemas electrónicos que regulan la intensidad de la iluminación. Estos pueden ser de forma manual como una perilla o digitalizada a través de aplicaciones web o servicios de asistentes digitales como Alexa, Siri, entre otros (Repsol, 2023). La ventaja de estos reguladores es que brindan confort a gusto del usuario y ahorran energía eléctrica.
- Sensores de luz día: sensor que mide la iluminación natural que entra al espacio y regula automáticamente la intensidad de las luminarias para mantenerlas en un punto objetivo. Este tipo de sensor es ideal para mantener ahorros de energía sin sacrificar los niveles de iluminación. La desventaja de este tipo de sensores es su alto costo y su poca oferta existente en el mercado chileno.

- Sistemas interconectados: este tipo de control comanda y supervisa una multitud de servicios, entre ellos la iluminación, aunque generalmente también vigila el consumo de gas, agua, electricidad, etc. Uno de los sistemas más conocidos es el protocolo KNX, el cual se usa para la gestión de edificios (KNX, 2025).

Varios estudios destacan la importancia de los sistemas de control como fuente de confort y ahorro energético. Algunos autores como (Barkmann, 2012) realizaron estudios en escuelas con iluminación variable comandada manualmente por el docente, con resultados beneficiosos para el rendimiento de los estudiantes y la motivación del profesor. Otros autores como (Moadab, 2021) crearon sistemas para ahorrar energía mediante sensores de presencia, que apagan automáticamente las luminarias si no detectan presencia humana. Incluso autores crean nuevos diseños de distribución de luminarias usando inteligencia artificial, tal es el caso de (Panska, 2024) que utilizó algoritmo genético, o (Qu, 2022) que utilizó el método de enjambre de partículas. Ambos diseños lograron disminuir el consumo de energía eléctrica y mantener los niveles de iluminación adecuados.

Otro enfoque de sistema de control es el basado en luz natural, que maximiza el uso de la luz del sol para iluminación. Autores como (Khairul Rijal Wagiman1, 2023) crearon sistemas adaptativos mediante un controlador basado en lógica difusa logrando ahorros de un 2%. Otro estudio creó un sistema de gestión de iluminación basado en un controlador convencional de lazo cerrado logrando un ahorro de hasta el 20% (D. H. W. Li et al., 2010).

También existen diseños que van a la mano del poder computacional, esto por medio de software especializados, en los cuales se pueden diseñar sistemas de iluminación y simular las condiciones de operación reales. Estudios como el de (Xie & Omidfar Sawyer, 2021) crearon sistemas de iluminación basados en luz natural simulados en el software RHINO con la herramienta DIVA, esto permitió crear un sistema de control de iluminación que reduce el deslumbramiento. Los sistemas de iluminación creados por software mostraron grandes avances en uniformidad, ahorro de energía, nivel de iluminación y control del deslumbramiento. Además sistemas de iluminación creados con el software DIALux (Bellia & Fragliasso, 2019) y RADIANCE mostraron grandes ayudas al diseño y cálculo de iluminación artificial y natural (Huang et al., 2025).

Con el análisis de estos estudios se deduce que la mejor manera de ahorrar energía eléctrica, mejorando el confort y manteniendo o aumentando los niveles de iluminación, es la combinación de métodos de control. Combinar métodos como diseño asistido por computadora junto con sistemas de control basados en luz natural abren caminos a grandes implementaciones que tienen el potencial de ahorrar energía, mejorar el confort y aumentar los niveles de iluminación presentes en las aulas escolares chilenas.

Antecedentes

La iluminación en espacios educacionales si bien están Normados en Chile por el documento RIC N°10, el cual está basado en la norma española UNE-EN 12665, la realidad es que no es ampliamente aplicada ni fiscalizada. Algunas de dichas condiciones han sido observadas en escuelas públicas chilenas en artículos como “Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Prototypical Public Schools in Chile” (Martínez et al., 2021), “Diagnostics of Existing Lighting Conditions in Existing Public Schools in Central-Southern Chile: Measurements and Predictions for Retrofit”(Martínez, Soto, et al., 2024) y “Diagnostic and improvement for lighting and energy efficiency in Chilean public schools”(Martínez A. et al., 2024), donde se evidencia altos niveles de deslumbramiento, bajos niveles de iluminación y gran consumo de energía.

Algunos métodos para lograr los objetivos de iluminación planteados por la SEC y la UNE son el reemplazo de luminarias fluorescentes por tecnología LED (Montoya et al., 2017) y un uso más extenso de la luz natural (Rea & Illuminating Engineering Society of North America, 2000) apuntando a sistemas de reflexión de luz (Martínez, Soto, et al., 2024) o transparencia limitada (Ma et al., 2024). Otros documentos crean diseños de distribución de luminarias usando inteligencia artificial, algunos métodos utilizados son algoritmo genético (Panska et al., 2024), redes neuronales (Wang & Tan, 2013) y optimización por enjambre de partículas (Qu et al., 2022).

Últimamente las tendencias van hacia la mejora de los sistemas de control de luminarias, pasando por modelos de control simple con sensores de movimiento y tiempos de apagado (Hafezparast Moadab et al., 2021), controles de variación discreta basados en la capacidad de distinción de iluminación (Hu & Davis, 2016) y modelos tradicionales de control continuo tipo PI (Koroglu & Passino, 2014). El problema de estos tipos de control es que no consideran en gran medida la utilización de la luz natural, sino que se centran en mantener los niveles de iluminación constantes. Para solucionar este problema

existen los sistemas de control de luz natural (DLCS), estos no solo son capaces de controlar las luminarias, sino que también censar la luz natural proveniente del exterior y adaptar la intensidad de iluminación. Además algunos de estos modelos pueden controlar sistemas como persianas automáticas o lamellas (Bellia & Fragliasso, 2019). Estos sistemas pueden ser implementados con control automático (Y.-T. Yang et al., 2023), con herramientas como redes neuronales (Xie & Omidfar Sawyer, 2021) o lógica difusa (Wagiman et al., 2023).

Otro punto son los estudios realizados sobre las ventanas con el fin de aumentar la distribución en la iluminación, reducir el deslumbramiento y aumentar el uso de la luz natural. Uno de ellos emplea materiales sustentables como el bambú y evalúa el desempeño de éste (Ma et al., 2024) y otros emplean el uso de persianas automáticas y materiales que redireccionan la luz (Do & Chan, 2021). También existen estudios que muestran como la concentración en una tarea afecta nuestra percepción del deslumbramiento (Kent et al., 2019), abriendo la brecha a un uso más extenso de la luz natural.

Finalmente, se destaca el objetivo del gobierno chileno planteado en el Plan Nacional de Eficiencia Energética, el cual busca la reducción del consumo de energía eléctrica en un 6% al año 2026 (Ministerio de Energía, 2021). Esto genera una nueva ola de mejoras en eficiencia energética y hace necesario un uso consciente y responsable de la electricidad. Sin embargo, la constante alza de precios de la energía eléctrica también impulsa este consciente colectivo de ahorrar energía. Según los datos de energía eléctrica en la ciudad de Los Ángeles, a fecha de julio de 2025 y en base a la compañía CGE, el costo por kWh es de \$289 pesos (CuentadelaLuz, 2025).

Estos estudios muestran un gran campo con posibilidades de mejora de iluminación y aplicación a diversos espacios. Sin embargo, ninguno de los estudios presentes ha aplicado soluciones de gestión de iluminación en las aulas chilenas. Incluso la mayoría de los estudios sólo se llevan a cabo dentro de simulaciones y no aplicaciones reales. Esto lo que motiva al desarrollo de un sistema de iluminación adaptativo, que combine sistemas de control automático con control de deslumbramiento, lo que se conoce como sistema de control basado en luz natural, adaptado a las realidades de las aulas escolares chilenas, implementado en un espacio físico real.

También otra diferencia es la tecnología ocupada en el diseño de estos sistemas. La mayoría de estos sistemas son controlados por computadores lógicos programables (PLC), los cuales son costosos,

espaciosos y de sistemas de programación o uso cerrados, con programas propios de cada compañía distribuidora del producto. También el uso de sensores profesionales con grandes costos de compra impide el uso múltiple de éstos para un control ideal del sistema de iluminación. Por ello se crea el sistema de control pensando en el ahorro de costos, esto permite evidenciar el real impacto que pueden tener estos sistemas en el uso de la energía eléctrica, permitir el acceso de más usuarios a la tecnología de control de iluminación e incentivar al uso de esta tecnología por parte de las comunidades escolares chilenas.

Todas estas características de diseño se exigen pensando en el confort visual, los niveles de iluminación establecidos por las normas, un bajo tiempo de amortización de la inversión, disminuir el deslumbramiento, disminuir el consumo energético y aumentar el uso de la luz natural al interior de las salas de clases. Todas estas razones apuntan a crear ambientes educativos de mayor calidad, eficientes y confortables, donde los alumnos tengan todas las herramientas para poder integrar nuevos conocimientos.

Metodología

Caso de estudio

La escuela pública chilena Colonia Árabe es caso de estudio y lugar de las pruebas experimentales a realizar. Esta escuela se ubica en la ciudad de Los Ángeles, región del Bío-Bío. La figura 5(a) precisa las coordenadas. Fue construida en 1968 y representa una escuela típica prefabricada de los años 60s por la Sociedad Constructora de Establecimientos Educacionales (SCEE) durante la reforma educacional vivida en Chile ante el déficit de escuelas (Martínez, Soto, et al., 2024). Actualmente es administrada por la municipalidad local la cual es responsable de la operación y mantención de ésta. La escuela tiene alrededor de 400 estudiantes distribuidos entre kínder a 8° básico.



Fig. 5: a) ubicación de Los Ángeles, Chile b) vista de los pasillos del pabellón escolar. Fuente (Martínez et al., 2021).

En los materiales para la construcción de esta escuela predominan las paredes de ladrillo para el exterior, tabiques de madera para interiores y columnas metálicas para soporte estructural, éstos materiales se pueden apreciar en la figura 5(b). El tipo de luminarias predominante es fluorescente y debido a la ubicación geográfica de ésta, presenta variaciones constantes en la luz natural debido a los efectos de la estación del año.

Proceso de investigación

La investigación realizada y plasmada en este documento inicialmente es del tipo teórica-documental, se recopila información de artículos, conferencias y libros sobre los sistemas de iluminación, sus tecnologías y sistemas de control. Se usaron buscadores como SCOPUS con palabras clave como control, iluminación, ahorro de energía y eficiencia energética, y posteriormente filtrados por año para selección de documentos de máximo 5 años de antigüedad. Luego de esta búsqueda se seleccionaron alrededor de 30 documentos, entre ellos artículos, conferencias y libros, los cuales fueron estudiados y utilizados para construir un marco teórico.

Este marco teórico es necesario para comprender las problemáticas y beneficios de los sistemas de iluminación, y como estos pueden generar ambientes educativos confortables, eficientes y beneficiosos para el aprendizaje, pudiendo así identificar los puntos ineficientes del sistema de iluminación y crear soluciones de gran valor.

El siguiente proceso de esta investigación se aplica al caso de estudio, el cual es analizado y caracterizado buscando la forma de mejorar su operación. La selección de esta escuela se basa en la representatividad de esta ante el estado de la infraestructura actual de la educación pública chilena. También por la facilidad que se brinda al acceso de las aulas y a la intervención de éstas por parte de los directivos de la escuela, lo cual facilita el estudio y análisis de las condiciones de funcionamiento. Esta fase es analítica, se recopilan datos y posteriormente se realizan análisis para determinar el estado de la infraestructura lumínica y energética del establecimiento.

Finalmente, se realiza la parte aplicada experimental, en la cual se procede a entregar una solución al problema encontrado en la escuela e implementar esta solución en el espacio estudiado. Esta estructura de desarrollo encaja dentro de una metodología de investigación diagnóstica, donde inicialmente se recopilan datos al inicio, se evidencia el problema y se entrega una solución de acuerdo con los lineamientos estudiados.

De acuerdo con esta descripción de diseño de la investigación se pueden desglosar los siguientes pasos a seguir: diagnóstico, diseño conceptual, desarrollo de prototipos y validación en terreno. Se describe cada fase a continuación.

- Diagnóstico: en esta etapa se obtiene información del estado de la infraestructura de iluminación. Para obtener información de la situación actual de la iluminación en el caso de estudio se tienen 2 métodos. El primer método es a través de los estudios realizados en la escuela y otra a través de datos obtenidos a través de mediciones en terreno, con sensores de iluminancia ubicados en distintos puntos del aula.

Se realizan dos mediciones en dos salas distintas con la misma orientación, pero con diferencias en el sistema de iluminación de luz natural. La sala A posee una repisa de luz, la cual beneficia el ingreso de luz natural al aula, mientras que el aula B solo posee ventanas comunes. Ambas mediciones se hacen con un sensor de iluminancia, el cual se cambia de posición recurrentemente dentro de la sala, con mediciones hechas dentro de un lapso de 15 minutos. Estas mediciones fueron con el fin de ratificar la información brindada por los estudios previos realizados en la escuela. (ver anexo A)

También se obtienen valiosos datos sobre la infraestructura lumínica, datos de consumo y eficacia de la iluminación, que son posteriormente procesados para definir el estado del sistema y su eficiencia energética.

- Diseño Conceptual: esta etapa consiste en utilizar el software DIALux versión 13.0 gratuito para crear un modelo 3D del espacio a intervenir. Se selecciona este software sobre otros por su gran facilidad de uso, interfaz gráfica intuitiva y su extenso uso en la industria e investigación académica.

En el espacio modelado se crea un sistema de iluminación basándose en la posición del aula con respecto a los ejes cardinales. Esto afecta a la disponibilidad de luz natural que incide sobre el espacio, por lo que se debe tener en cuenta para así garantizar el uso de energía solar, lo que ayuda a ahorrar energía en iluminación.

Para el diseño del sistema se toma como base reglamentaria la norma UNE-12464, la cual exige para aulas de uso general una iluminación de 500 lux, uniformidad de 0.6 y un deslumbramiento menor a 19. También sugiere que este sistema pueda ser controlado en intensidad.

- Desarrollo de prototipos: para garantizar el buen funcionamiento del sistema de iluminación se desarrollan prototipos demostrativos y funcionales del sistema de iluminación y de control. El primer prototipo tiene un enfoque demostrativo, y su objetivo es evaluar si componentes de bajo costo son capaces de realizar un control continuo y efectivo de la iluminación, garantizando funcionalidad básica sin comprometer eficiencia. El segundo prototipo funcional posee sistema de control basado en luz natural y se usa para asegurar que este sistema puede mantener niveles de iluminación ante cambios en la luz natural y evidenciar el posible ahorro de energía al usar esta tecnología.

Las métricas para evaluar los prototipos son: viabilidad técnica, respuesta ante variación de luz natural y porcentaje de ahorro respecto a un sistema no controlado. Para dar como exitoso el prototipo éste debe ser capaz de responder de manera inversa ante el cambio de luz natural y mantener niveles de iluminación por sobre los 500 lux. Con este prototipo se calcula cual es el efecto real del sistema de control sobre el consumo eléctrico y sobre los niveles de iluminación.

- Validación: para validar los datos generados a través de simulación se instala un sistema de iluminación en el espacio estudiado. Este sistema se compara con los datos obtenidos a través de simulación por medio de sensores de iluminancia. Las mediciones son puntuales y dentro de lapsos cortos de tiempo debido al uso continuo de esta aula, lo cual impide su intervención por largos periodos de tiempo. Al comparar los resultados se tiene en cuenta posibles problemas de instalación y se define el porcentaje de error en comparación con la simulación.

Para la instalación del equipo de iluminación se hace una evaluación económica del sistema, incluyendo inversión inicial, ahorro esperado y tiempo de amortización. Además de esto también se crean planos del sistema de canalizaciones, diagramas de conexión del sistema de control, diagrama unilineal, diseño de tablero eléctrico y diseño de sensores para el sistema de control.

La validación del ahorro se hace comparando el sistema instalado con el sistema antiguo presente en la sala aledaña a la intervenida. Esta sala presenta las mismas condiciones de diseño y uso que la sala intervenida, por lo que se puede definir como aula de control.

Recolección de datos

Para la recolección de datos se cuenta con distintos instrumentos y técnicas. En la primera etapa de diseño se recolectan datos a través de levantamiento de información en terreno. Para ello se emplean sensores de iluminancia LI-COR modelo LI-210R, presentado en la figura 6(a). Además, se utiliza un light meter LI-250A, mostrado en la figura 6(b), que permite visualizar en tiempo real los datos obtenidos por el sensor. También se obtienen medidas de la infraestructura como paredes, ventanas, pisos, pasillos, etc. junto con la petición de información de planos de la escuela.

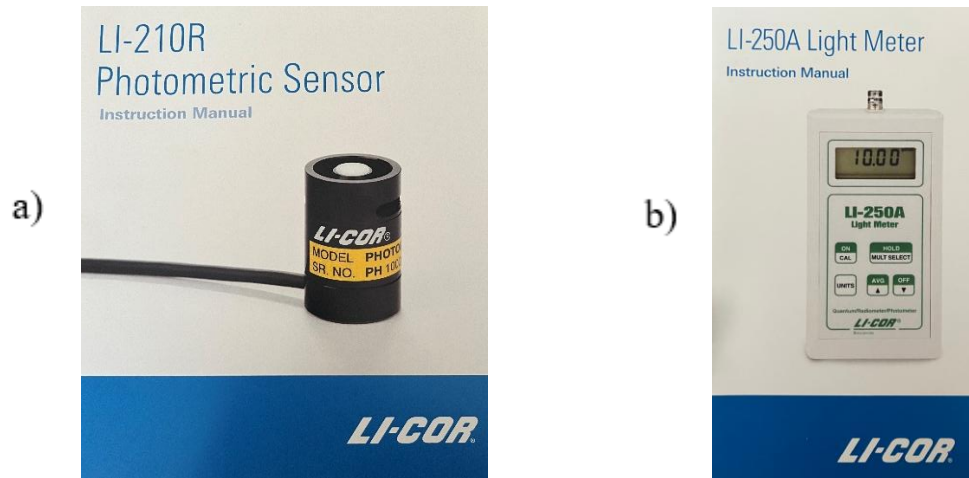


Fig. 6: a) sensor de iluminancia b) medidor de iluminancia. Elaboración propia.

Para la segunda etapa la información recolectada en la fase anterior se usa para crear un modelo en 3D de las posibles aulas a intervenir. Para esto se usa el software DIALux evo, el cual es una herramienta de uso gratuito para el diseño de sistemas de iluminación. La versión utilizada fue la 13.0. aquí se diseñan dos salas de clases contiguas respetando su orientación espacial y considerando detalles como mobiliario, color de las paredes, puertas, techo y suelo, altura del techo, tipo de suelo, altura de luminarias, tipo de ventanas y material de cada uno de estos elementos.

Para la etapa de desarrollo de prototipos se utilizan tecnologías de bajo costo y de gran oferta en el mercado. La base del sistema de control es el controlador ESP32 mostrado en la figura 7. Este microprocesador posee comunicación por medio de WIFI y BLUETOOTH, tiene un procesador dual-core y 38 pines de conexión con amplio soporte para entradas digitales y analógicas. Este controlador posee ventajas frente a otros controladores populares como Arduino o Raspberry, entre las más destacadas se encuentra su poder de procesamiento superior y una mayor disponibilidad de sistemas

de comunicación a de modelos de Arduino del mismo precio y un menor costo que placas de Raspberry, otorgando así un balance entre costo y beneficio.

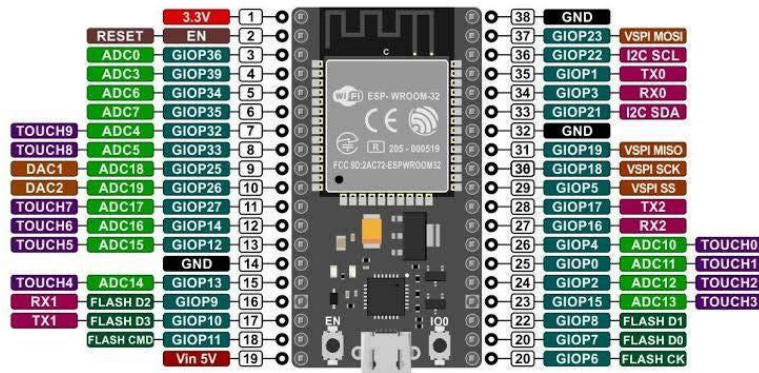


Fig. 7: ESP32 WROOM 38 PIN. Fuente (andre adrian, 2019)

El control de iluminación se hace mediante dimmers controlados por el ESP32, éstos son presentados en la figura 8(a). Cada dimmer permite un consumo de hasta 10 A, voltajes de control desde los 3.3V hasta los 5V y disipador de calor. Este método de control permite la atenuación de grupos de luminarias con mayor facilidad que con otros métodos como PWM o control por radiofrecuencia de los dimmer.

Para la medición de iluminación por parte del sistema de control se utiliza el sensor BH1750, mostrado en la figura 9(b). Este sensor posee un rango de medición de 1-65535 lux, con rechazo de ruido a 50/60 Hz, ideal para medir luz natural. Este producto a comparación de otros disponibles en el mercado como el TCM6000 o las fotorresistencias posee un circuito integrado el cual es capaz de convertir los datos de voltaje a lux automáticamente y enviar estos datos de manera digital por medio de comunicación i2c. Este método de comunicación ofrece ventajas al momento de conectar los sensores permitiendo la conexión de estos en serie y ocupando solo 2 pines del ESP32.

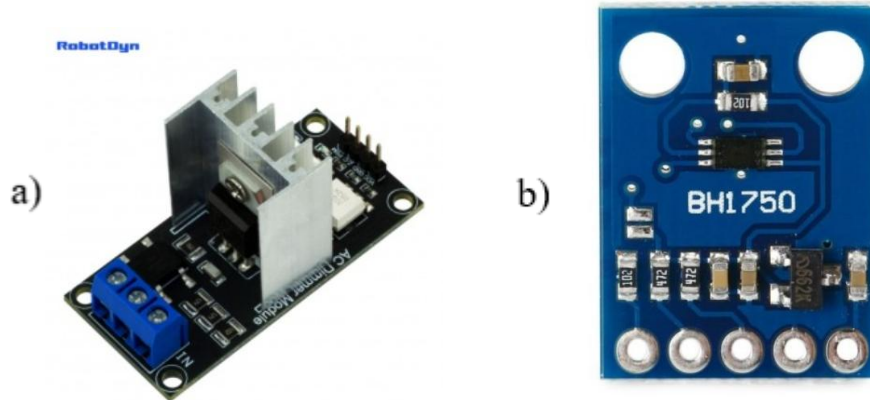


Fig. 8: a) modulo AC dimmer b) sensor de iluminancia BH1750. Fuentes a) (robotdyn, s. f.) b) (naylampmechatronics, 2020).

La medición de consumo en esta etapa se hace a través de cálculos indirectos a partir de la iluminancia, ya que ésta varía proporcionalmente con la corriente que pasa a través de los LED (D. Li et al., 2019). Para realizar este proceso se debe conocer el consumo de corriente continua de la luminaria cuando esta se encuentra en operación normal y registrar las variaciones en iluminancia que provoca el sistema de control, así estableciendo una relación lineal entre corriente e iluminancia se obtiene el ahorro. Esto debido a la falta de equipos tipo datalogger disponibles para la medición de corriente y potencia.

Para la validación de los resultados se hacen mediciones de iluminancia en terreno con el sensor LICOR mencionado anteriormente junto con un datalogger marca HOBO modelo MX1104 el cual cuenta con función de medición de iluminancia, humedad y temperatura. También se hacen mediciones de consumo de corriente en terreno a través de una pinza amperimétrica para verificar el consumo de las luminarias. Estas mediciones serán comparadas con el consumo de una sala de control.

Para el análisis de datos se usa el software EXCEL en cual se realizan los análisis de error, consumo, eficiencia energética y se crean gráficos con los resultados obtenidos. Los análisis de desempeño a mejorar son el consumo en kWh/año, cumplimiento de la norma y porcentaje de ahorro energético.

Sistema de Control

El sistema de control a diseñar es un sistema de control automático con parte proporcional e integral. Se decide el uso de este tipo de control debido a sus bajos requerimientos de potencia computacional para su funcionamiento, su compatibilidad con microprocesadores y su gran uso en sistemas automatizados de todas las áreas. En comparación con sistemas de control modernos como redes neuronales, algoritmo genético u optimización por enjambre de partículas que ejecutan grandes cálculos y necesitan hardware dedicado, el sistema de control PI requiere cálculos matemáticos simples y se ejecuta de manera sencilla en el procesador, lo que asegura libertad del ESP32 para realizar otras tareas.

Para comprender el funcionamiento del sistema de control propuesto, se presenta la figura 9, la cual muestra el diagrama de bloques que describe su ciclo operativo. Inicialmente se configuran por única vez los sistemas de comunicación, luego se entra en un ciclo de sensado de iluminancia, aplicar el control PI y nuevamente medir la iluminancia. Adicionalmente, cada 60 segundos, la información obtenida se envía a un documento de Google alojado en la nube.

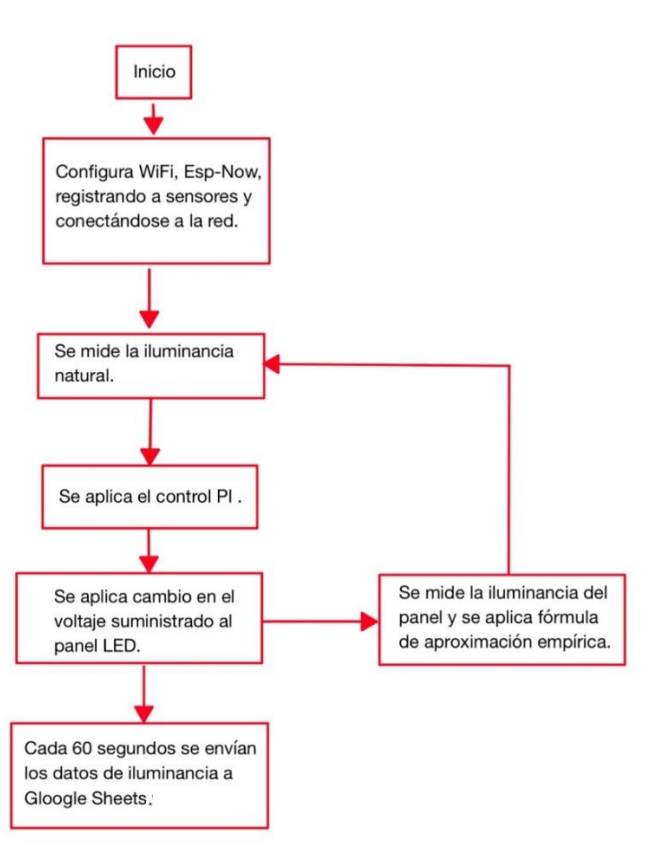


Fig. 9: Diagrama de bloques de funcionamiento de sistema de control basado en luz natural. Elaboración propia.

Para el óptimo funcionamiento del sistema se utilizan 5 sensores que miden la luz natural ubicados en los 4 extremos del aula. Estos sensores son montados en las luminarias para limitar el acceso y manipulación de éstos por la/os estudiantes. Cada grupo de control dispone de 2 sensores. Los valores censados por estos se promedian y se actúa en base al valor promedio del grupo.

Un problema de diseño para este controlador es que no se dispone de retroalimentación directa desde el plano de trabajo, es decir, no se mide la iluminancia en las mesas directamente. Para solventar esto se ubicará un sensor bajo en panel LED midiendo la iluminancia de este. Así, a través de una variable de corrección basada en mediciones hechas en terreno, se puede estimar la iluminación que llega a las mesas. Este sistema de control es validado a través de un prototipo y puesto a prueba durante un par de días para verificar su funcionalidad.

Sistema de comunicación

Para la integración de un sistema de control automatizado es necesaria la recolección de datos por medio de sensores. Es por esto por lo que se necesita diseñar un sistema de comunicación entre el sensor y el procesador. El ESP32 ofrece variadas formas de comunicación cableada, como protocolo serial uart e i2c, y también inalámbricas como WIFI y BLUETOOTH (espressif, 2025). El mayor problema de la comunicación cableada es el nivel de voltaje con el que trabaja, la placa envía datos a 3.3V, por lo que las distancias funcionales de transmisión son bastante cortas, protocolos como el i2c solo tienen un alcance funcional de alrededor de 1 metro. Debido a esto, se considera el uso de comunicación inalámbrica entre la placa maestra y el grupo sensor.

Aunque la comunicación inalámbrica presenta mejores distancias de envío de datos aun presenta desventajas, el WIFI necesita un punto de conexión para establecer comunicación, lo cual puede llevar a saturar éste si se conecta múltiples sensores a una misma red, impidiendo que más dispositivos se conecten. El Bluetooth de ESP32 es versión 4.2, por lo que tiene una capacidad máxima de 4 dispositivos funcionales interconectados a una placa, por lo que no se podrían instalar más sensores si se requiriera.

Es por los factores antes mencionados que se decide diseñar el sistema de comunicación en base a un protocolo propietario y gratuito ofrecido por espressif llamado ESP-NOW. Este protocolo de comunicación funciona en la misma frecuencia que el WIFI y ofrece grandes características como

comunicación de grupos sin limitación de dispositivos conectados, distancias de transmisión de hasta 200 metros y un consumo de energía bajo (espressif, 2023). Para lograr la comunicación efectiva entre estos dispositivos es necesario diseñar el grupo sensor en base a una placa con procesador de espressif.

Diseño de Sensores

Para el diseño del grupo sensor se usan placas ESP32-C3-SuperMini, mostradas en la figura 10. Estas son compatibles con el sistema de comunicación seleccionado, presentan dimensiones reducidas y un bajo consumo energético. Para la alimentación de estas placas se utiliza una fuente de poder de 220V AC a 5v DC con una potencia de 5W modelo Hi-link HLK-5W05. Se utilizan 2 sensores BH1750 por cada grupo sensor, uno para medición de iluminancia exterior y otro para medición de iluminancia emitida por el panel LED. Para la construcción del cableado entre sensores/placa/fuente se usaron como base placas ranuradas, donde los componentes fueron soldados y cableados.

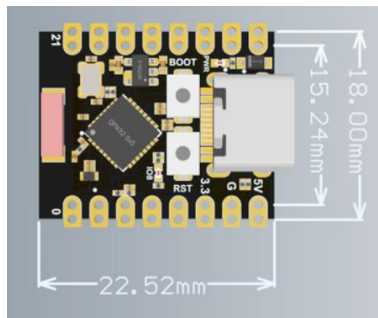


Fig. 10: Placa ESP32-C3-SuperMini. Fuente (espboards, 2025)

Para una manipulación segura y una mejor estética se diseñan carcasas plásticas a medida para la ubicación de estos sensores. Cada carcasa es diseñada en el programa Fusion 360 y exportada al laminador UltiMaker Cura, para finalmente ser imprimida en una impresora Creality K1 Max.

El entorno de programación usado para el desarrollo de los sensores y controladores es Arduino IDE. Se selecciona por su gran compatibilidad con placas ESP32, su amplio catálogo de bibliotecas de uso gratuito, su comunidad de desarrollo y por la simpleza del lenguaje de programación que utiliza. Una ventaja de este programa es que contiene un compilador, una interfaz gráfica y programador todo en el mismo sistema, lo que genera un entorno de programación amigable y de uso rápido.

Para un óptimo funcionamiento del sistema de control y debido al bajo costo de los sensores utilizados se realiza un trabajo de calibración de éstos. La calibración se hará comparando las mediciones de los sensores BH1750 con las realizadas por el sensor HOBO MX1104, se verificará la utilidad de éstos y se espera como resultado un error menor al 5% dentro del rango de 0 a 1000 lux.

Resultados

Situación actual de iluminación

La escuela Colonia Árabe cuenta con un sistema de iluminación de tipo fluorescente en cada una de sus salas, éste sistema es mostrado en la figura 11(a). Cada sala está equipada con 4 luminarias de 2 tubos tipo t8 modelo TL-D 36W/54-765 cada una, con una intensidad de 2500lm por tubo. Las mediciones hechas en la fase de alimentación de las luminarias, presentado en la figura 10(b), arrojan un consumo de 0,8 A por luminaria, lo que resulta en una potencia requerida de 704VA para la iluminación completa de la sala.

Esta intensidad de corriente se debe al factor de potencia de este tipo de luminarias. Estudios como el realizado por (Frund et al., 2018) y el realizado por (Di Mauro & Raciti, 2014) establecen el factor de potencia típico de estas luminarias en 0,6. Junto a lo anterior se suma el hecho de que esta luminarias montan un balastro magnético, el cual presenta bajo rendimiento energético. El estudio hecho por (Mrabet et al., 2018) realiza las comparaciones entre luminarias con balastos magnéticos y electrónicos, el resultado es que las luminarias con balastos magnéticos tienen un factor de potencia inferior y consumen 1,5 veces más potencia activa.



Fig. 11: a) sistema de iluminación fluorescente b) consumo de una luminaria completa. Elaboración propia

Algunos de los problemas detectados son:

- Niveles bajos de iluminación: Mediciones en terreno (anexo A) indican que la iluminación sobre las superficies de trabajo (mesas) en el extremo alejado de las ventanas es de 110 lux, valor significativamente inferior a los estándares establecidos por normativas nacionales (RIC N°10) e internacionales (UNE-EN 12464-1). Esta deficiencia podría afectar directamente el confort visual y el rendimiento académico de los estudiantes.
- Fallas y degradación de luminarias: El sistema actual presenta problemas como la falla de tubos fluorescentes por lo que no todas las luminarias están al máximo rendimiento. Otro problema grave es la antigüedad de estos tubos fluorescentes. Si se busca la hoja de datos de los tubos instalados se verifica que la intensidad lumínica disminuye según las horas de uso de este, al año de uso este ilumina a su 85% aprox. de su capacidad, a los dos años baja al 75% (PHILIPS, 2023).

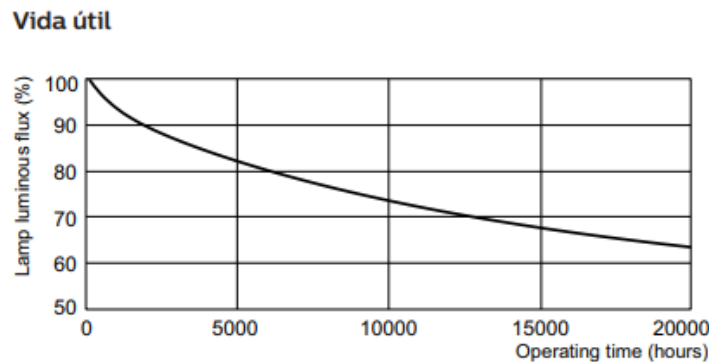


Fig. 12: Gráfica de degradación de flujo luminoso para un tubo fluorescente PHILIPS serie TL-D. Fuente (PHILIPS, 2023).

- Deslumbramiento por iluminación natural: las salas objeto de estudio están ubicadas con ventanas directamente orientadas hacia el norte, por lo que presentan una gran disponibilidad de iluminación natural. El problema encontrado es el deslumbramiento que esta radiación no controlada provoca en la/os estudiantes y docentes, incentivando así un uso mínimo de esta fuente lumínica, obligando a los docentes a cerrar las cortinas y creando una mayor dependencia de las fuentes artificiales de luz.
- Variabilidad de la iluminación: factores como la degradación de las luminarias y la orientación del aula provocan una gran variabilidad en la iluminación según la estación de año. La figura

13 fue construida en base a los datos experimentales obtenidos por un sensor de iluminación dejado en posición vertical en el muro opuesto a las ventanas, en una sala de clases con orientación de ventanas hacia el norte.

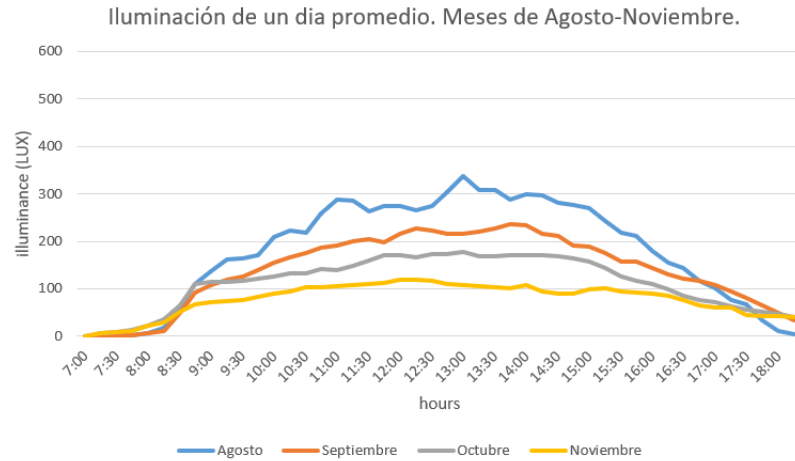


Fig. 13: Iluminación promedio del aula en los meses agosto a noviembre. Elaboración propia basados en mediciones realizadas en Proyecto Fondecyt Iniciación 11240683.

En la figura 13 se observa como la iluminación es altamente variable según el mes y la estación de año, por lo que es muy difícil obtener una iluminación constante y dentro de las normas con métodos de iluminación fijos. En noviembre, la iluminancia se reduce a aproximadamente un tercio del nivel registrado en agosto. Esta operación exige un método de control de iluminación para adecuar estos niveles variables a un nivel estable y conforme con las normativas.

Con el objetivo de estabilizar la iluminación en una de las salas, estudios anteriores implementaron una repisa de luz reflectante en el exterior de las ventanas. Esta solución, combinada con la pintura del techo en color blanco, permitió reflejar los rayos solares hacia el interior y distribuir la luz de manera uniforme. Como se observa en la figura 14, se logra una mejora significativa en la distribución de la iluminación a lo largo del año, disminuyendo la variabilidad de la iluminación encontrada entre los meses de agosto a noviembre. El sensor fue ubicado en la misma posición que la anterior muestra.

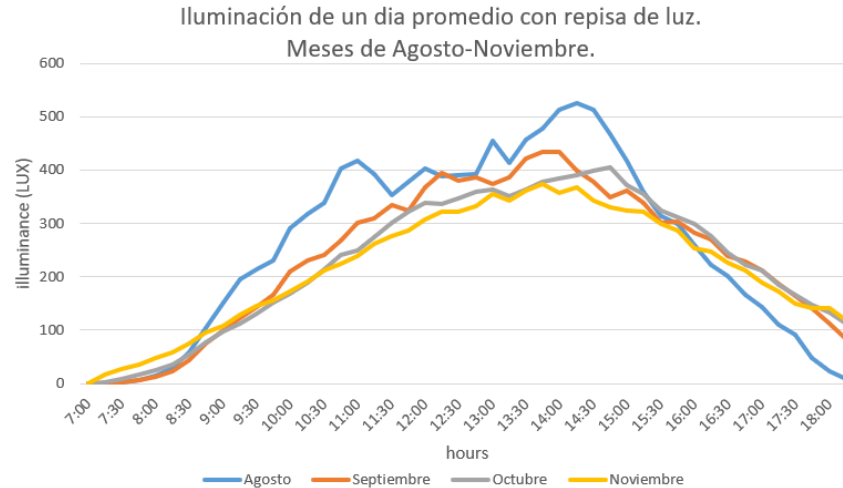


Fig. 14: Iluminación promedio del aula en los meses de agosto a noviembre. Elaboración propia basados en mediciones realizadas en Proyecto Fondecyt Iniciación 11240683.

Los problemas encontrados en las aulas objeto de estudio de la escuela Colonia Árabe evidencian falencias en temas de eficiencia energética y bajos niveles de iluminación general. Si bien la repisa de luz instalada ayuda a la variabilidad de la iluminación estas medidas no representan la iluminancia medida en el plano de estudio (sobre las mesas), por lo que los niveles de iluminación en el plano de estudio aún son inferiores que los exigidos por las normas internacionales.

Simulaciones lumínicas

Para el desarrollo de las simulaciones en el software DIALux se modelan 2 salas contiguas con orientación de ventanas hacia el norte, la figura 15 muestra el modelo. Se recrea la sala de estudio A con repisa de luz y la sala B solo con ventanas comunes. Se incluye un sistema de persianas con transferencia de luz del 5% para control de deslumbramiento. Las luminarias seleccionadas para el estudio de iluminación son paneles con tecnología LED con medidas de 120cm x 30cm, flujo luminoso de 3842lm y un consumo de 41 W. Este panel es seleccionado debido a su bajo costo, gran eficiencia y semejanza con luminarias disponibles en el mercado.

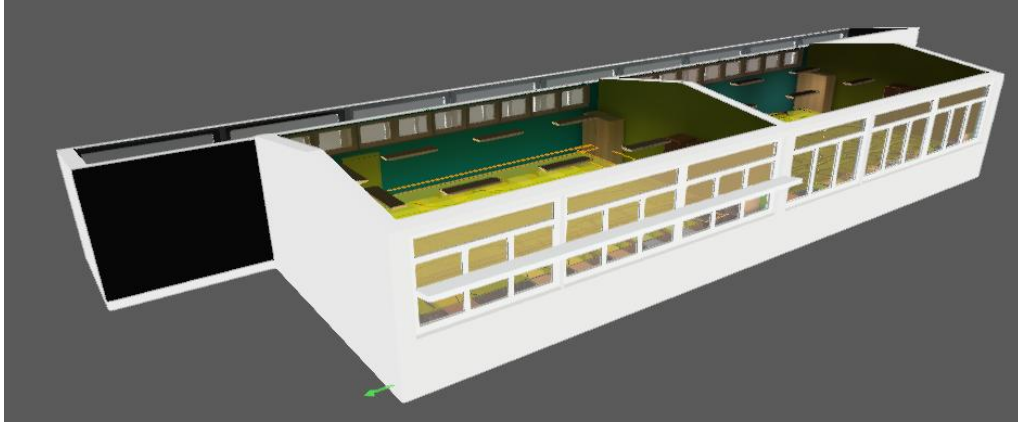


Fig. 15: Modelo de escuela Colonia Árabe, vista lateral. Elaboración propia.

Debido a la diferencia en los niveles de iluminación y variabilidad de esta presente en cada aula se construyen dos sistemas de iluminación independientes para cada sala. Esto con el fin de otorgar una solución específica para cada realidad y no aumentar los costos al momento de implementación debido al sobredimensionamiento de un sistema de iluminación.

Caso de diseño sala A.

En la figura 16 se muestra la distribución de las luminarias en el aula. Este sistema se divide en 3 zonas de actuación. Estas zonas son la iluminación de la pizarra (verde), la cual asegura una iluminación adecuada para facilitar la visibilidad de los contenidos escritos, iluminación costado ventanas (rojo) e iluminación muro (amarillo). Esta distinción se hace debido a la gran incidencia que tiene la luz natural sobre los niveles de iluminación, por lo que esta distribución permite una mayor eficiencia energética y un control más preciso, reduciendo la cantidad de actuadores necesarios y minimizando los costos de implementación.

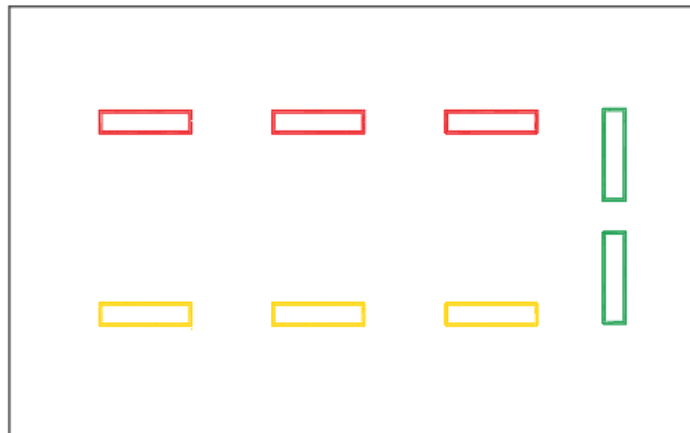


Fig. 16: Zonas de actuación de control de iluminación. Elaboración propia.

Con esta distribución de luminarias, persianas con transferencia de luz del 5%, cielo cubierto e intensidad de luminarias al 80% se simula la sala en DIALux, resultando en una intensidad de la iluminación de 503 lux con una uniformidad del 63%. Esto cumple con los estándares nacionales e internacionales, por lo que se da como válido el diseño. (resultados completos en anexo B).

Caso de diseño caso B

La figura 17 muestra la distribución de luminarias en el aula B. Se presenta un diseño más conservador con la distribución de luminarias de tipo matricial, junto con detalles para resaltar la pizarra con apliques. Se diseña una distribución del tipo 3 x 3 con un total de 9 paneles led y 2 apliques que iluminaran directamente al docente y a la pizarra. Este sistema al incluir 3 filas de luminarias posee 3 zonas de control: zona de ventanas (azul), zona central (verde) y muro (amarillo). Este sistema es más costoso debido a la inclusión de más luminarias y es necesario un mayor número de sensores para su control, pero permite niveles de iluminación mayores y uniformidad mejorada. Naturalmente este sistema consumirá niveles ligeramente superiores de energía eléctrica.

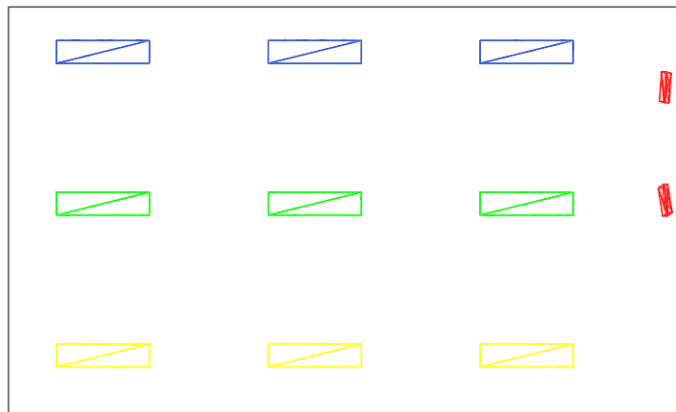


Fig. 17: Distribución de luminarias. Elaboración propia.

Con esta distribución de luminarias, persianas con transferencia de luz del 5%, cielo cubierto e intensidad de luminarias al 70% se simula la sala en DIALux, resultando en una intensidad de la iluminación de 534 lux con una uniformidad del 62%. Esto cumple con los estándares nacionales e internacionales, por lo que se da como válido el diseño.

Desarrollo de prototipos

Se construyen dos prototipos para este estudio de iluminación. El primero se diseña para comprobar la base tecnológica, es decir placas de programación, actuadores y sensores, y su funcionamiento en conjunto. El segundo prototipo es diseñado para comprobar el sistema de control y su posible ahorro dentro de un uso cotidiano.

Prototipo 1

Este prototipo es diseñado en base a dos placas ESP32-WROVER-B, un módulo dimmer AC Robotdyn y un sensor de iluminancia BH1750. Para el funcionamiento del este prototipo se conecta una placa ESP32 con el sensor de iluminancia BH1750, en otro grupo se conecta el módulo AC dimmer y una ampollita incandescente, junto con el ESP32 restante (esquema en Anexo C). El método de comunicación entre el grupo sensor y el grupo accionador es a través de ESP-NOW. El grupo accionador también tiene la tarea de subir la información recaudada por el sensor a una hoja de Google Sheets en la nube para posterior análisis de datos.

El resultado de este prototipo es que la placa ESP32 es capaz de intercambiar información de manera confiable por medio de la tecnología ESP-NOW, es capaz de controlar de manera estable el módulo dimmer y enviar la información a través de un código json a la hoja de datos de Google. Con eso la validación tecnológica se da como aprobada y se valida el uso de estos componentes para un sistema de iluminación de mayores dimensiones.

Se adjunta un video demostrativo en el siguiente enlace: <https://youtu.be/ANsOi2oua0o>

Prototipo 2

El segundo prototipo es diseñado en base a una placa ESP32-C3-SuperMini para el conjunto sensor. Este conjunto posee 2 sensores BH1750, uno de ellos mide la iluminancia que llega desde el exterior, este se pone en posición vertical apuntando hacia las ventanas, el segundo sensor se ubica en posición horizontal apuntando hacia el panel LED. El controlador en este prototipo es del tipo PI con ganancia proporcional de 0,3 y ganancia integral de 0,05, sintonizado por el método empírico de prueba y error, debido a la complejidad de modelar con precisión el sistema. Este controlador se encuentra integrado en la placa del grupo sensor y actúa por medio de PWM a través de un módulo con transistores conectado a una fuente regulada. Esta configuración permite a la placa controlar los pulsos emitidos por el módulo PWM y lograr un cambio en la iluminancia del panel LED.

El sistema de envío de datos hacia la nube se realiza a través de un intercambio de información entre grupo sensor y una placa ESP32 encargada de administrar los datos y enviarlos a la hoja de cálculo de Google. Este intercambio se hace a través de ESP-NOW, la placa administradora se conecta a WIFI y envía los datos hacia el documento requerido. Este modelo de comunicación optimiza el uso de los puertos de conexión del WIFI, ya que, al conectar solo un dispositivo al punto de conexión quedan libres puertos para su uso por particulares. En la figura 18 se muestra el prototipo funcional operando en una luminaria LED de 60 x 60 cm, una intensidad de 4000lm y un consumo de 36W. Para la obtención de datos en el plano de trabajo se ubica el sensor HOBO MX1104 bajo el panel LED.



Fig. 18: Prototipo 2 panel LED 60 x 60 cm. Elaboración propia.

Los resultados de este prototipo se plasman en las figuras 19 y 20. La figura 19 presenta el comportamiento del sistema de control para un día soleado. Se observa como desde las 12 hasta aproximadamente las 13 horas la luminaria reduce su brillo hasta apagarse, sin que disminuya la iluminancia en el plano de trabajo, lo mismo sucede entre las 16 y las 17 horas. La figura 20 muestra el comportamiento del sistema para un día nublado, se aprecia como el controlador es capaz de mantener la iluminancia por encima de los 500lx en todo momento, cumpliendo así con lo requerido.

En resumen, el sistema de control basado en ESP32 es capaz de variar la intensidad de la luminaria de manera inversamente proporcional a la incidencia de luz natural que llega al espacio, capaz de mantener la iluminación en el plano de trabajo sobre el punto de operación de 500lx. El controlador ESP32 es capaz de contener un controlador y enviar/recibir datos de manera satisfactoria y estable por medio del protocolo ESP-NOW. Se evidencia un ahorro de un 2% de energía para días nublados y hasta un 30% para días soleados.

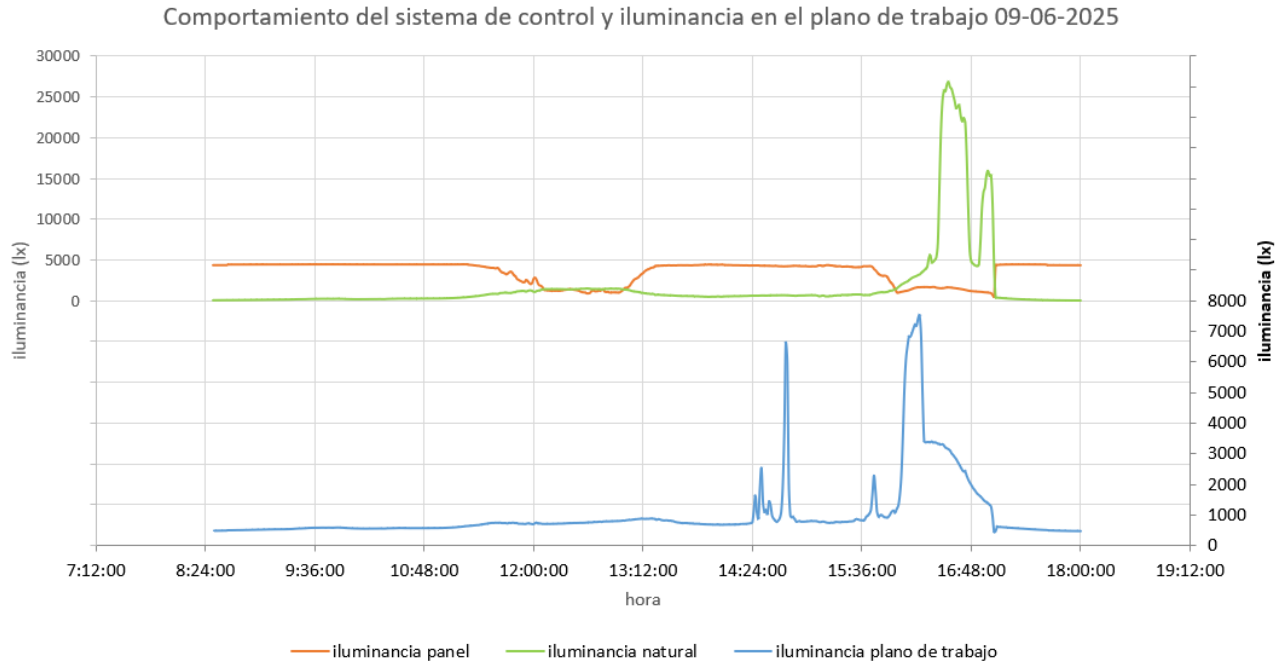


Fig. 19: Gráfica de funcionamiento de sistema de control, fecha 09-06. Elaboración propia.

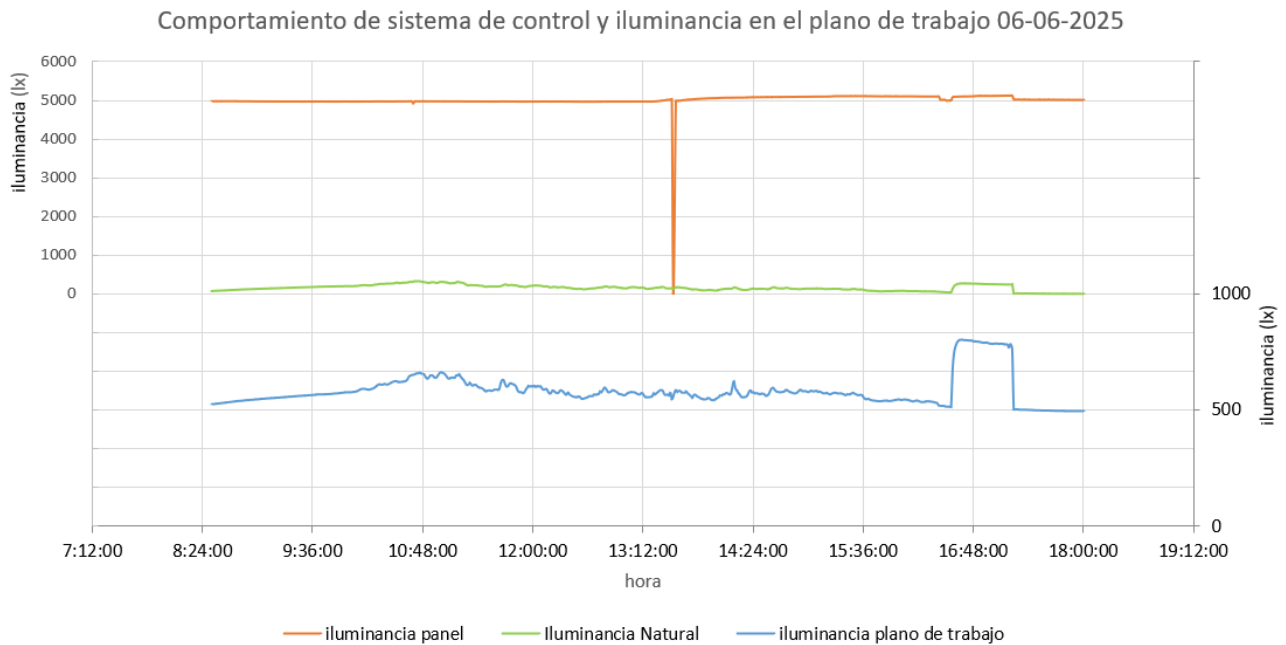


Fig. 20: Gráfica de funcionamiento de sistema de control, fecha 06-06. Elaboración propia.

Tomando como base estos resultados y analizando los datos del clima obtenidos a través de la página web Meteoblue se obtiene que en la ciudad de Los Ángeles tiene un promedio anual de un 6% de días nublados, 63% de días parcialmente nublados y 31% de días soleados (Meteoblue, 2025). Con esta información y suponiendo un porcentaje de ahorro para días nublados del 2%, para días parcialmente nublados del 12% y días soleados del 30%, se calcula que se puede ahorrar aproximadamente un 17%

de energía eléctrica en el año. Estudios semejantes como el control por redes neuronales mostraron ahorros del 22% (Wang & Tan, 2013), control por lógica difusa ahorros del 2% (Wagiman et al., 2023) y sistemas de control tradicional ahorros de 20% (D. H. W. Li et al., 2010).

Calibración de sensores

Para una obtención de datos fiel se puso a prueba la calidad de medición de los sensores de bajo costo con un sensor HOBO. Para la obtención de datos en condiciones similares, se adhirieron los sensores de iluminancia BH1750 a la carcasa del sensor HOBO, esto se puede observar en la figura 21. Para el almacenamiento de datos realiza un código en Arduino IDE para enviar los datos en una hoja cálculo de Google (ver anexo D).



Fig. 21: Ubicación de sensores para calibración. Elaboración propia.

La figura 22 muestra las mediciones obtenidas entre dos sensores de bajo costo con chip BH1750 y el sensor HOBO. Se observa que, para mediciones realizadas entre 0 y 300lx, se obtienen errores menores al 5%. En el rango hasta 1000lx, el error aumenta hasta un 14%. Para rangos mayores, el error se comporta de manera no lineal. La figura 23 presenta el error en lux de cada sensor con respecto al sensor HOBO, según la iluminancia medida, a forma de resumen. Se aprecia que en el rango de medición de 0-1000 lux, el error crece de forma lineal y predecible, por lo que se procede a calibrar los sensores mediante software sumando o restando una cantidad fija por tramos.

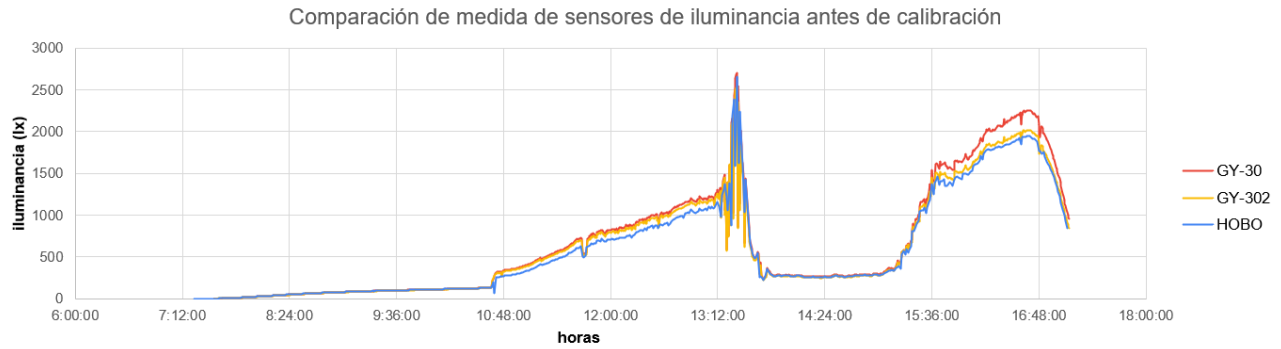


Fig. 22 : Gráfica comparativa de medición de sensores de iluminancia sin calibrar. Elaboración propia.

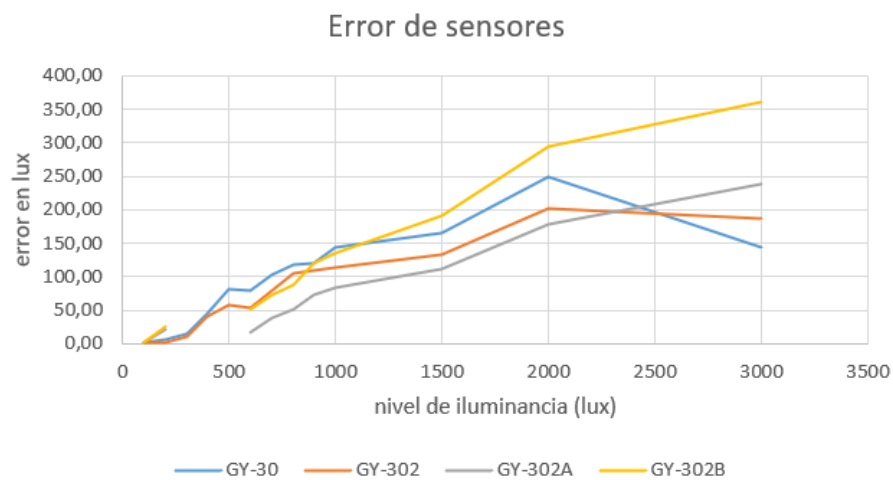


Fig. 23: Error de sensores según nivel iluminancia medida. Elaboración propia.

La figura 24 muestra el resultado de la calibración a través de software, la cual consiste en restar 20 unidades por cada 100lx medidos por sobre 300lx. Se observa que el rango hasta 300lx no se ve afectado, manteniendo el error bajo un 5%. En el rango hasta 1000lx, la calibración reduce el error a valores menores al 5%.

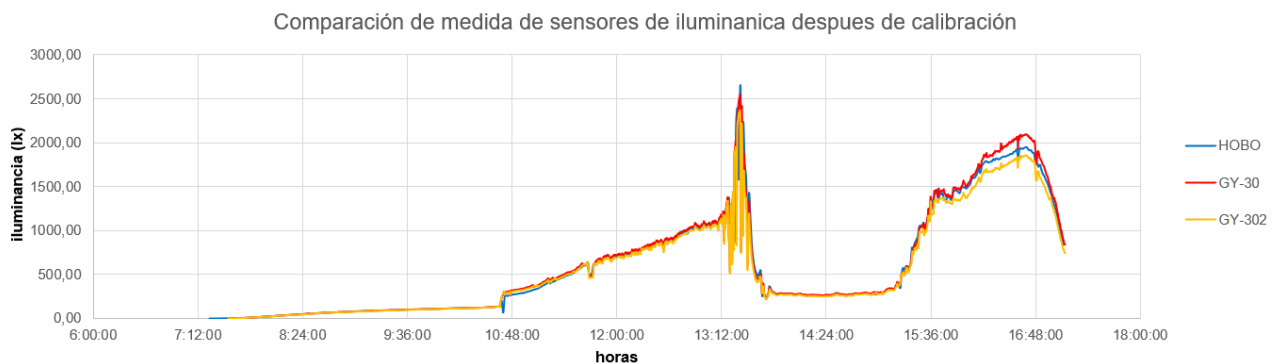


Fig. 24: Gráfica comparativa de medición de sensores de iluminancia calibrados por software. Elaboración propia.

Diseño carcasa de sensores

El diseño de la carcasa de los sensores se puede visualizar en la figura 25(a), ésta se realiza a medida para los componentes del grupo sensor. Se diseña un pequeño brazo en forma de L con el fin de integrar dos sensores BH1750, uno en posición vertical y otro en posición horizontal orientado hacia el panel LED. La parte superior de la carcasa alberga una fuente de poder HI-link y un microprocesador ESP32-C3, además de una saliente para la sujeción a través de tornillería de esta carcasa a los paneles LED. La ubicación de estos sensores se presenta en la figura 25(b). Como se aprecia éste es montado en la luminaria, impidiendo así la manipulación de este por los y las estudiantes. Se imprimen 5 de estas carcasas para su uso en la implementación final propuesta en la escuela Colonia Árabe.

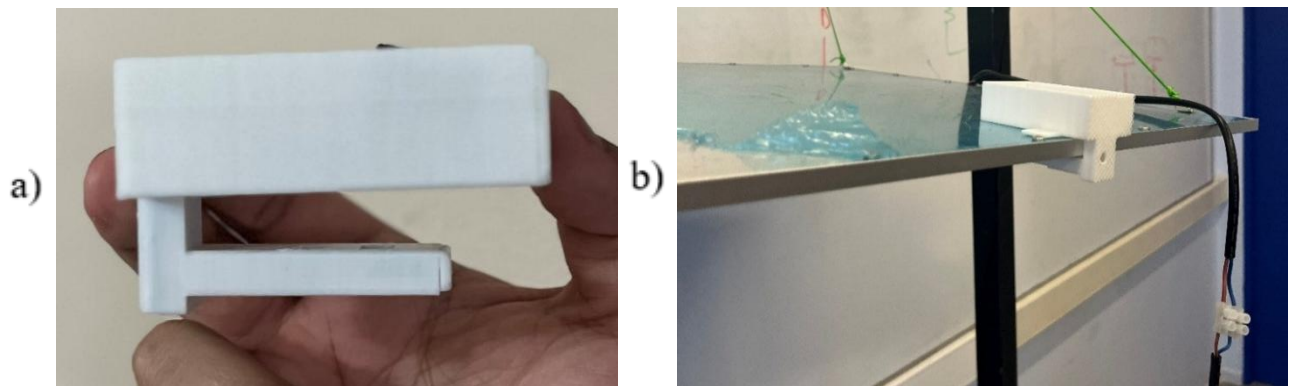


Fig. 25: a) carcasa de sensores b) ubicación en luminaria. Elaboración propia.

Implementación en escuela Colonia Árabe

Para la implementación del sistema de iluminación se opta por la instalación del sistema en la sala A, la cual posee la repisa de luz. La selección de esta aula se debe a la disponibilidad de ésta a las intervenciones necesarias para la instalación de este sistema, además en esta aula ya se han realizado mejoras y es objeto de estudio continuo, esto permite visualizar los efectos de los diferentes cambios y como estos afectan a los estudiantes en distintos ámbitos de la enseñanza.

Luego de la selección del aula a intervenir, se procede al diseño de ingeniería para crear los documentos necesarios para la implementación. Estos documentos son: plano de canalizaciones, diagrama unilineal de sistema de potencia, diseño de tablero eléctrico y esquema de conexión de

sistema de control (ver anexo C). Estos documentos son creados para una instalación fácil y documentada, ayudando así a la comprensión de posibles técnicos y personal extra.

Para las canalizaciones el método seleccionado es a través de canaleta de PVC de 20x10mm para una instalación simple. El tablero diseñado para el sistema de potencia y control es un tablero de 24 módulos sobrepuesto, este tablero cuenta con luz de presencia de tensión con una protección fusible de 2A, un interruptor automático de 6A curva C y un diferencial de 25A con sensibilidad de 30mA. El esquema de conexión del sistema de control es el mismo que el del grupo accionador del prototipo 1, solo que se conectan dos módulos dimmer extras.

La selección de materiales tiene como principal objetivo la selección de luminarias, materiales de control y materiales de acondicionamiento necesarios para la instalación de este nuevo sistema de iluminación. La luminaria seleccionada para la instalación en la escuela es un panel LED Faretto de medidas 1203x303mm, flujo luminoso de 4400lm, CRI>80, una potencia de 48W con FP 0.98, una temperatura del color de 4000K y una eficacia de 92 lm/W. Se selecciona este panel LED debido a su alta eficiencia, bajo costo y gran flujo luminoso, se compraron 8 en total. Para el control de intensidad se adquirieron drivers dimerizables compatibles con este panel junto con dimmers manuales para una regulación controlada por el docente.

Como parte de las medidas de control del deslumbramiento, se propone la instalación de una persiana para las ventanas orientadas al norte, diseñada con materiales que permitan el paso de solo un 5% de la luz. Esta medida es implementada con el fin de obtener una regulación más precisa y sencilla al control de deslumbramiento, además la leve transparencia de este tipo de persianas genera un uso mayor de luz natural. Los materiales del sistema de control son 5 ESP32-C3 y 10 sensores BH1750 para el grupo sensor y un ESP32-WROOVER-B y 3 dimmer AC para el grupo accionador. Además de la compra de materiales de uso común como cables, conectores, cinta aisladora, etc. La lista completa de materiales está disponible en el anexo E.

Con los materiales comprados se procede a la instalación en la escuela Colonia Árabe, la sala intervenida corresponde a la sala número 3 del establecimiento y pertenece a un curso de sexto año.

La instalación de las luminarias requiere el recableado de todo el sistema eléctrico destinado a iluminación. Se instala cable EVA-flex de 1,5 mm, este cable resiste corrientes de hasta 16A, la corriente estimada de consumo de estos paneles LED es de alrededor de 2A y la protección termomagnética es de 6 A, por lo que el cable opera con normalidad y está protegido contra sobrecarga. Este cable es libre de halógenos y no propagador de llama.

Se instala el tablero eléctrico de 24 módulos mostrado en la figura 26. Junto a éste se instala un selector de 3 posiciones para diferenciar el modo de control automático de el modo de control manual. Para una mejor experiencia de uso del sistema de iluminación, se instalan 3 dimmer manuales al costado izquierdo del tablero, dando al docente la posibilidad de regular la intensidad de la iluminación en las tres zonas de actuación, este control está disponible en modo manual. Esto se hace debido a la motivación y confort que entrega al docente el poder controlar la iluminación a su gusto.



Fig. 26: Tablero de Alumbrado y control con selector y dimmer manuales. Elaboración propia.

Debido a la diferencia de ancho entre el panel LED adquirido y el panel usado en el prototipo, es necesario rediseñar la carcasa para la adaptación de esta al nuevo panel. Para no desechar las carcasas ya impresas se procede a crear el suplemento mostrado en la figura 27(a). Este se diseña con el fin de aumentar el espacio entre el brazo de la carcasa y la parte superior. Esto permite reutilizar las carcasas originales y reducir la generación de residuos. El resultado de esta modificación se observa en la figura 27(b), donde se evidencia el aumento de distancia entre la parte superior y el brazo del sensor.

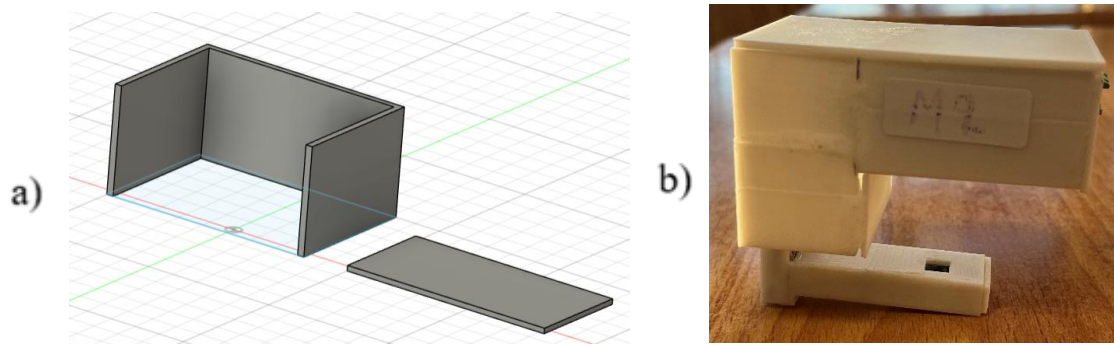


Fig. 27: a) suplemento para carcasa de sensores b) resultado final de carcasa de sensores. Elaboración propia.

Una vez colgadas las luminarias se procede a instalar el driver, la ubicación de éste se muestra en la figura 28(a). La toma de tierra se instala conectada la carcasa del propio panel LED. La figura 28(b) muestra la ubicación de los sensores. Estos fueron orientados hacia las ventanas para la medición de luz natural y posteriormente atornillados a la carcasa del panel. La altura final de luminarias es de 2,5m para luminarias de los costados y 2,2m para las luminarias de la pizarra.

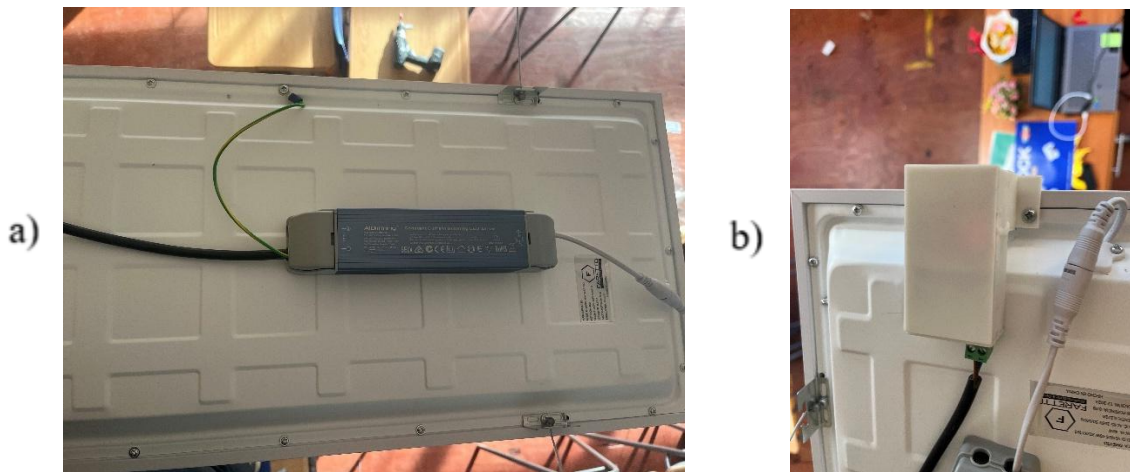


Fig. 28: a) instalación de driver regulable b) instalación de sensor de iluminancia. Elaboración propia.

Luego se instala el sistema de persianas. Se decide instalar un sistema de persianas motorizadas controlada a través de control remoto y con carga a través de panel solar. Este tipo de persianas es de bajo consumo energético y al usar energía solar para recargarse no incide en el consumo eléctrico del aula. La tela seleccionada permite el intercambio de luz natural, refleja los rayos UV y permite la visual desde el interior del aula hacia el exterior, lo cual motiva a los estudiantes.

Finalmente, se procede a la instalación del sistema de control en el tablero en base a la placa ESP32. Se procede a crear un modo automático de ahorro, como muestra la figura 29(a), para seleccionar este modo se debe girar hacia la derecha el selector, este modo activa el sistema de control automático y apaga las luminarias de la pizarra, ideal para clases que necesiten usar proyectores o donde no se busque resaltar al docente. En este modo las luminarias del lado de las ventanas son atenuadas según la incidencia de luz natural en el espacio. Los datos de sensores y consumo de corriente son subidos a una hoja de datos de Google. La figura 29(b) presenta una fotografía del aula una vez finalizadas las intervenciones. Se destaca el nuevo sistema de iluminación junto con la instalación de las persianas en las ventanas.

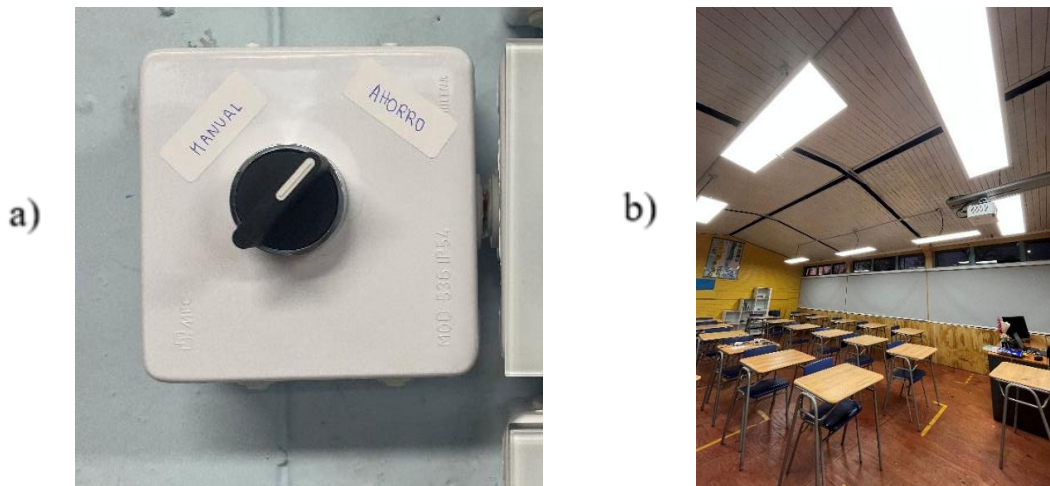


Fig. 29: a) palanca selectora con inscripción de modo manual y ahorro b) resultado final de sistema de iluminación. Elaboración propia.

Como resultado de la implementación del sistema de iluminación, se obtiene que la iluminancia al costado del muro aumento de 107lx en la sala de control, a 524lx en la sala intervenida. Esto es un aumento de 5 veces en el nivel de iluminación. Según simulaciones realizadas, con especificaciones similares en hora, fecha y persianas, al costado del muro debiese obtenerse una iluminancia de 474lx aproximadamente, por lo que el error entre la simulación y el sistema real es de un 11%. El consumo de corriente de este sistema con todas las luminarias al máximo es de 1,9 A, por lo que cada luminaria consume 0,237 mA, las luminarias fluorescentes antiguas consumían un total de 3,2 A, por lo que el ahorro de energía aparente por cambio de luminarias es de un 41,6%.

El modo de funcionamiento automático, basado en el consumo de cada luminaria y a los resultados del prototipo 2, puede ahorrar hasta un 17,7% anual más que el modo de funcionamiento manual al máximo, por lo que el ahorro de energía aparente total puede ascender a un 59,3% anual en comparación con el sistema de iluminación anterior.

La inversión en materiales por etapa se distribuye de la siguiente manera: control \$141.897, materiales eléctricos \$139.274, tablero \$51.586, luminarias \$496.880 y persianas \$860.000. La mano de obra y puesta en marcha es proporcionada por el Departamento de Administración de Educación Municipal. La inversión total, sin contar gastos de traslado, ascienden a los \$1.691.407 pesos. La mayor parte de este monto corresponde a las persianas, representando un 51% de la inversión total, seguido por el conjunto de luminarias, este conjunto incluye los drivers regulables, paneles LED, dimmer manuales y kit para colgar, este conjunto representa un 29% de la inversión total.

Utilizando los datos de consumo de las luminarias, un FP de 0.9 y un uso del aula de 8 horas al día, de lunes a viernes durante 10 meses, se calcula que el consumo de energía eléctrica en modo manual con luminarias al máximo es de 602kWh/año, para el modo automático el consumo es de 498kWh/año al año y para un modo mixto de uso, con 4 horas al máximo y 4 hora en automático, el consumo es de 550kWh/año. En comparación con el sistema de tubos fluorescentes reemplazado, con FP 0.6 aprox. y las mismas horas de uso, consume 676 kWh/año, lo que se traduce en un ahorro del sistema LED del 11% con las luminarias al máximo, un 26% en modo automático y un 19% en modo mixto. La tabla 2 muestra un resumen de los consumos de cada sistema.

Tabla 2: Comparativa de consumo eléctrico de sistema LED con sistema fluorescente. Elaboración propia.

Consumo de energía				
	Sis. Fluorescente	Sis. LED Manual Max	Sis. LED Control	Sis. LED uso Mixto**
kWh	675,84	601,92	495,4	548,65
% de ahorro*	0%	11%	27%	19%

* Comparado con el sistema de iluminación fluorescente.

** Uso mixto se define como 4 horas con brillo máximo y 4 horas en modo automático al día.

Con el precio de la electricidad para la distribuidora CGE en la ciudad de Los Ángeles actualizado a julio de 2025 se calcula que el sistema ahorra \$21.363 pesos anuales con las luminarias al máximo, \$52.153 pesos anuales en modo automático y \$36.758 pesos anuales en modo mixto. Con esto y tomando como referencia el modelo mixto, el cual se considera el modo de uso más realista, se

calcula que el tiempo de amortización de la inversión total es de 32 años. Este tiempo elevado de amortización se debe principalmente al uso de persianas motorizadas la cual tiene un tiempo de amortización de 16 años, luego el sistema de luminarias se amortiza en 9,5 años y el sistema de control 2,4 años.

Discusiones

Las mediciones hechas en terreno fueron realizadas en un día de verano soleado a una altura de 78 cm del suelo con el sensor de iluminancia Li-COR.

El diseño del sistema de iluminación en el software DIALux fue realizado pensando en los modos de funcionamiento del sistema de ahorro de energía, pero también en base a la funcionalidad de éste. Los paneles LED ubicados en la pizarra son a fin de resaltar la figura del docente, incitando a dirigir la vista de los alumnos a hacia el frente, pudiendo así beneficiar a la concentración puesta en la clase. La temperatura del color de 4000k fue seleccionada debido a su categoría como luz neutra, lo cual genera que su uso sea multifunción, esto es ideal para esta aula donde se hace uso de ella de diferentes maneras dependiendo de la clase impartida, aunque temperaturas mayores también son válidas.

No fue posible adquirir las luminarias con las cuales se realizó el estudio de iluminación. Tampoco fue posible adquirir los archivos de iluminación necesarios para la implementación de las luminarias adquiridas en el programa, por lo que se adquirieron las luminarias en base a las especificaciones implementadas en el software DIALux.

Un problema encontrado al momento de implementar el sistema de iluminación fue la disponibilidad del aula para realizar la intervención lo que llevó a que la instalación del sistema de iluminación se extendiera por 3 semanas y fuera propenso a errores humanos, esto debido a los cortos tiempos diarios de trabajo, acceso restringido del aula a solo 2 días a la semana y el tiempo de traslado desde Concepción hacia Los Ángeles. Uno de estos errores fue que la altura de las luminarias fue modificada, la altura instalada fue de 2,5 m mientras que en la simulación la altura es de 2,4 m. También se decidió disminuir la altura de las luminarias de la pizarra con un fin estético a 2,2 m. Otra diferencia es que las luminarias compradas e instaladas tienen un flujo luminoso de 4400lm y las simuladas un flujo de 3842lm. Todos estos factores afectan al funcionamiento del sistema de iluminación y explican las diferencias entre el modelo de simulación y el real. Aun así, el porcentaje de error entre simulación y realidad es del 11% aproximadamente, lo cual es un valor aceptable teniendo en consideración los desafíos encontrados.

En los resultados del prototipo 2 se aprecia un gran aumento de iluminancia en horas específicas del día. Esto se debe a que el espacio en el cual fue implementado este prototipo no presentaba cortinas, por lo que el sistema estaba constantemente sometido a los rayos del sol. Esto destaca un problema inherente de este tipo de sistema de control, como el sistema no presenta un método de retroalimentación directa en la superficie de trabajo, debido a la posible manipulación de los sensores por manos de los estudiantes, el controlador no tiene forma de detectar rayos de sol que incidan de tal manera que solo afecten al plano de estudio. Este problema hace imprescindible el funcionamiento del sistema automático en conjunto con un sistema de control de luz natural.

El funcionamiento del sistema de sensorizado se basa en promedios, el sensor del extremo de la pizarra y el sensor del extremo del muro se promedian para obtener los datos de iluminancia promedio, estos datos son subidos cada un minuto a la plataforma de hojas de cálculo de Google disponible en el siguiente enlace: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1wciTm2k4ojb8bT0-nRo-YnouJHcEg-ThhV4nLxPtmCw/edit?usp=sharing>. El fin de esta recolección de datos es el uso de estos para generación de posibles estudios futuros sobre comportamiento energético y mejoramiento de la infraestructura actual.

El porcentaje de ahorro de energía activa calculado en base al sistema fluorescente si bien representa el ahorro de costos en iluminación no representa el cambio en la eficiencia del sistema. La eficiencia del sistema la podemos evaluar según la eficacia de la luminaria, para los tubos fluorescentes instalados en la escuela la eficacia, según su hoja de datos, es de 69,4 lm/W nuevos y a partir de las 5000 horas de uso esta decae hasta los 55 lm/W. En cambio, los paneles LED instalados ofrecen una eficacia de 92lm/W, por lo que para iluminar la misma habitación a la misma intensidad con ambas luminarias la tecnología LED ahorra un 32,6% de energía eléctrica activa. Al incluir el consumo de los balastos magnéticos al funcionamiento de las luminarias fluorescentes, la eficacia luminosa del sistema disminuye a 47,4 lm/W nuevos y a partir de las 5000 horas de uso disminuye a 37,6 lm/W. Esto da como resultado que para iluminar la misma habitación a la misma intensidad la tecnología LED ahorre un 49% de energía eléctrica activa.

Esto no es lo único en lo que cambia el sistema de iluminación instalado, ya que las corrientes totales bajaron de 3,2 A en el sistema fluorescente a 1,9A en el sistema LED. Esto se puede explicar debido al mejor factor de potencia que ofrecen estas luminarias pasando de un FP 0,6 a 0,9, lo que reduce el

paso de corriente a través de los conductores, que a su vez reduce las pérdidas térmicas. Es aquí donde se destaca que el ahorro de hasta el 59,3% es en energía aparente y no en energía activa.

Las mediciones realizadas en terreno luego de finalizar la instalación de las luminarias fueron concisas y se centraron en la medición en la sección de la sala opuesta a las ventanas (más cercano al muro), debido a que esta sección de la sala es la más afectada por la iluminación artificial, ya que es la más alejada de las ventanas, por lo que la llegada de luz natural es inferior. Dicho esto, las mediciones realizadas fueron a las 6 de la tarde en invierno, por lo que la luz natural era escasa, y la medición realizada con el sistema anterior fue en verano alrededor de las 5 de la tarde, por lo que la comparación está sujeta al clima y la estación.

Comparando las mediciones con lo exigido por la normativa de referencia UNE-12464 se cumple con el nivel de iluminación exigido de 500 lx y CRI >80. Asimismo, se cumple con lo exigido por la SEC para aulas de uso general con nivel de iluminación sobre los 300 lx y CRI >80. Debido a las limitaciones de tiempo no fue posible comprobar la uniformidad de la iluminación, ni el deslumbramiento, por lo que estas variables quedan sujetas a futuras mediciones en terreno. Sin embargo, la uniformidad de la iluminación está sometida a cambios constantes debido a la manipulación de la intensidad de las luminarias por parte del docente en modo manual, por lo que se debe evaluar su uniformidad en modo automático.

La ubicación de las persianas (apreciada en la figura 29) fue un tema de relevancia para el buen funcionamiento de las medidas tomadas con anterioridad para el mejoramiento de la iluminación. Como se menciona anteriormente esta aula posee una repisa de luz, por lo que para permitir la reflexión de la luz en esta y su ingreso a la sala se instaló la persiana a 50cm del techo, permitiendo así el ingreso de la luz natural por el ventanal superior e interfiriendo en menor medida con el funcionamiento de la repisa.

El funcionamiento del sistema de control en modo automático debió sufrir modificaciones en su funcionamiento al momento de instalarlo y ponerlo en marcha en terreno, debido a la capacidad de procesamiento del ESP32 lo cual limitó la funcionalidad del sistema de control. Inicialmente se esperaba controlar las 3 zonas de actuación definidas junto con un control continuo de las persianas, pero la placa ESP32-WROOVER-B presentó inconsistencias en su uso como la incapacidad de

controlar los tres módulos dimmer a la vez y la falta respuesta ante el envío/recepción de señales de RF.

Debido a estos problemas se decidió el uso de sólo una zona de control (cercano a las ventanas), una zona de iluminación fija (cercano al muro) y el apagado de las luminarias de la pizarra junto con un control de persianas manual a cargo del docente. Si bien este problema no se esperaba, esta solución permite la evaluación e implementación del sistema de control. Además, en las simulaciones realizadas las luminarias del costado del muro generalmente no se atenúan más del 80%, por lo que las pérdidas de oportunidad de ahorro si bien son interesantes no representan una cantidad significativamente grande.

Soluciones de iluminación de esta índole benefician a la concentración y el rendimiento de los estudiantes (Barkmann et al., 2012), aumentan la atención prestada al docente (W. Yang & Jeon, 2020) y motivan a este (Barkmann et al., 2012), generando un mejor ambiente estudiantil. Es importante destacar que esta solución está orientada a estudiantes de sexto año escolar, por lo que el potencial de crecimiento y motivación que aporta la instalación puede generar un impacto relevante en su proceso formativo, favoreciendo el cumplimiento de sus objetivos académicos y contribuyendo a la construcción de una proyección personal y educativa más sólida.

Conclusiones

Las mediciones realizadas en la escuela Colonia Árabe muestran niveles de iluminación deficientes y muy alejados de las exigencias de normas nacionales e internacionales. La necesidad de mejora de los sistemas de iluminación instalados es de suma relevancia para el desempeño escolar regular, por lo que se hace necesario la creación de un sistema de iluminación moderno y eficiente, pero sobre todo acorde con las normativas y que brinde confort al usuario.

Usando el software DIALux se diseñaron dos sistemas de iluminación basados en paneles LED que lograron simulaciones con 503 lx y 534 lx de iluminancia, uniformidades superiores a 0,6 y UGR < 19, cumpliendo normativas nacionales e internacionales.

Los prototipos diseñados demostraron la viabilidad técnica de los componentes seleccionados, se demostró una comunicación estable entre sensores y actuadores por medio del protocolo ESP-NOW en combinación con el envío de información a una hoja de cálculo de Google a través de WIFI. El ahorro del sistema de control en base a un controlador del tipo PI mostro un ahorro del 2% para días nublados y del 30% para días soleados. Combinando estos resultados con la variación estadística de los días nublados, parcialmente nublados y soleados en la ciudad de Los Ángeles se estima un ahorro anual del 17%. Con estos resultados se puede dar como válido el objetivo específico número dos y tres, implementando el sistema de control basado en luz natural y optimizando el recurso energético utilizado en iluminación.

Las mediciones realizadas con sensores de bajo costo mostraron errores menores al 5% en un rango de 0 a 300lx sin necesidad de calibración, para rangos de medición mayores el error aumenta a valores del 14%. Si bien el uso de estos sensores es una alternativa viable, estas mediciones están sujetas a grandes variaciones, estos errores de medición se pueden ajustar utilizando técnicas a través de software para intentar limitar el margen de error. Al limitar el margen de error dentro de un rango de uso dado permite que los sistemas de control y datos obtenidos tengan mayor validez, pero los datos fuera de ese rango objetivo pueden tener variaciones superiores al 14%. Con una calibración por software en el rango de 300lx a 1000lx se obtuvieron errores menores al 5% en ese rango.

Aunque el microprocesador ESP32 es una gran alternativa para sistemas de control y comunicación, este presenta grandes falencias al momento de su uso en sistemas complejos de comunicación y control que requieran uso extenso de su procesador y funcionalidades como WIFI.

La implementación del sistema de iluminación diseñado para el aula A permitió incrementar los niveles de iluminancia desde 107 lx hasta 524 lx, lo que representa un aumento del 490%. Asimismo, se logró una reducción del 41,6 % en la corriente consumida por el sistema, junto con un ahorro del 11 % en el consumo de energía eléctrica activa, el cual puede alcanzar hasta un estimado de 26 % bajo condiciones de operación en modo automático. Las diferencias entre el sistema real y el simulado son alrededor del 11%, error principalmente producido por diferencias en la luminancia del panel LED instalado y en la altura de instalación en comparación con el sistema simulado. Estos resultados evidencian el cumplimiento satisfactorio del objetivo general y de los objetivos específicos planteados, abordando con éxito los desafíos establecidos en el presente estudio.

Se espera que este estudio afecte positivamente a la vida de las y los estudiantes y docentes usuarios de esta aula, aportando confort y niveles de iluminación agradables. Se incita a las autoridades encargadas de las escuelas municipales a invertir en espacios educacionales confortables, a cumplir con las normativas y aumentar su eficiencia energética.

Recomendaciones y Trabajos Futuros

Para una mayor replicabilidad de este sistema se recomienda realizar estas mejoras paulatinamente partiendo por el cambio de luminarias a tecnología LED, luego implementando un sistema de control de iluminación y finalmente si es necesario un sistema de persianas. Si algunos componentes como las luminarias y persianas ya se encuentran instalados el costo de integrar control al sistema de iluminación es la mejor opción para elevar el ahorro de energía.

Para un uso óptimo del sistema de control de iluminación creado se recomienda la implementación de un microprocesador más potente o diseñar un sistema en base a dos controladores ESP32, uno encargado de las comunicaciones y otro del sistema de control. Esto permitiría el control continuo de las 3 zonas de actuación junto con la posibilidad de controlar las persianas motorizadas.

Como trabajo futuro se recomienda la evaluación de consumo real del sistema de iluminación y evaluación de deslumbramiento dentro del aula. Esto permitiría contrastar los datos estimados de ahorro del sistema de control con la realidad y proponer mejoras a este. También se espera la realización de la evaluación de percepción de confort e impacto realizada a los estudiantes y docentes, esto es crucial para verificar que el público objetivo de este estudio se sienta cómodo y realmente beneficie la experiencia de enseñanza.

Referencias

1. AENOR. (2020). *Iluminacion terminos basicos y criterios para la especificacion de requisitos de alumbrado* (No. UNE-EN 12665; Versión 2020).
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063587>
2. AENOR. (2022). *Luz e iluminación Iluminación de los lugares de trabajo Parte 1: Lugares de trabajo en interiores* (No. UNE-12464; Versión 2022). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0068596>
3. andre adrian. (2019). *ESP-WROOM-32* [Graphic].
http://www.andreadrian.de/ESP_Schachzweg/
4. Barkmann, C., Wessolowski, N., & Schulte-Markwort, M. (2012). Applicability and efficacy of variable light in schools. *Physiology & Behavior*, *105*(3), 621-627.
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.09.020>
5. Bellia, L., & Fragliasso, F. (2019). Automated daylight-linked control systems performance with illuminance sensors for side-lit offices in the Mediterranean area. *Automation in Construction*, *100*, 145-162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.027>
6. CuentadelaLuz. (2025, junio). *Tarifa eléctrica por comuna*. <https://cuentadelaluz.cl/>
7. Di Mauro, S., & Raciti, A. (2014). Analysis and comparison of CFLs and LED lamps. *2014 AEIT Annual Conference - From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/AEIT.2014.7002055>
8. Do, C. T., & Chan, Y.-C. (2021). Daylighting performance analysis of a facade combining daylight-redirecting window film and automated roller shade. *Building and Environment*, *191*, 107596. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107596>
9. energy. (2013, noviembre 22). History light bulb. *22/11/2013*.
<https://www.energy.gov/articles/history-light-bulb>
10. espboards. (2025). *ESP32-C3* [Graphic]. <https://www.espboards.dev/img/Xeoyxp1h4b-500.png>
11. espressif. (2023). Wireless Communication Protocol (ESP-NOW). *Low-Power Solutions*.
<https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>
12. espressif. (2025). *ESP32-WROVER-B & ESP32-WROVER-IB Datasheet Version 2.1*.
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-b_datasheet_en.pdf

13. EVOLUX. (s. f.). *Panel LED*. Recuperado 2 de julio de 2025, de <https://static1.squarespace.com/static/5669738d2399a34df135c130/t/57d29da444024362fbb3b60b/1473420718115/EVOLUX+-+PANEL+LED.pdf>
14. Frund, J. L., Chort, A., Krenz, M., Cassano, A., & Vincitorio, F. (2018, febrero 20). Mejoras en el factor de potencia mediante el reemplazo de tubos fluorescentes por tubos equivalentes LED. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 11-18.
15. Hafezparast Moadab, N., Olsson, T., Fischl, G., & Aries, M. (2021). Smart versus conventional lighting in apartments—Electric lighting energy consumption simulation for three different households. *Energy and Buildings*, 244, 111009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111009>
16. Hu, W., & Davis, W. (2016). Dimming curve based on the detectability and acceptability of illuminance differences. *Optics Express*, 24(10), A885. <https://doi.org/10.1364/OE.24.00A885>
17. Huang, Y., Zeng, T., Jia, M., Yang, J., Xu, W., & Lu, S. (2025). Fusing Transformer and diffusion for high-resolution prediction of daylight illuminance and glare based on sparse ceiling-mounted input. *Building and Environment*, 267, 112163. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112163>
18. IES. (2022). *RECOMMENDED PRACTICE: LIGHTING EDUCATIONAL FACILITIES*. the illuminating Engineering Society. <https://store.ies.org/product/rp-3-20-recommended-practice-lighting-educational-facilities/?v=161747ec4dc9>
19. Instituto de Salud Pública de Chile. (2021). *INSTRUCTIVO PARA EVALUACIÓN DE LA LUMINANCIA E ILUMINANCIA EN LOS LUGARES DE TRABAJO*. <https://www.ispch.cl/wp-content/uploads/2021/02/Instructivo-Evaluacion-Illuminaci%C3%B3n-Iluminancia-v2-2021.pdf>
20. Kent, M. G., Fotios, S., & Altomonte, S. (2019). An Experimental Study on the Effect of Visual Tasks on Discomfort Due to Peripheral Glare. *LEUKOS*, 15(1), 17-28. <https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1489282>
21. Khan Academy. (2025, agosto 12). La luz: Ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones. *Química Avanzada*. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

22. Kling, R., Seifert, D., Honarbacht, A., & Böhnel, M. (2024). Lighting Control, Monitoring and Management. En M. Barfuss, A. Rosemann, D. Seifert, & W. Osterhaus (Eds.), *Lighting Technology: Fundamentals of Illuminating Engineering* (pp. 491-578). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09940-3_4
23. Knes, I. (1995). Effects of indoor lighting on mood and cognition. *Journal of Environmental Psychology*, 39-51. [https://doi.org/10.1016/0272-4944\(95\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0272-4944(95)90013-6)
24. KNX. (03 de 07 de 2025). *KNX*. Obtenido de KNX: <https://www.knx.org/knx-es/para-profesionales/>
25. Koroglu, M. T., & Passino, K. M. (2014). Illumination Balancing Algorithm for Smart Lights. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(2), 557-567. <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2258399>
26. Li, D. H. W., Cheung, K. L., Wong, S. L., & Lam, T. N. T. (2010). An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls. *Applied Energy*, 87(2), 558-567. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.002>
27. Li, D., Miao, A., Jin, X., Shang, X., Liang, H., & Yang, R. (2019). An automated 3D visible light stereolithography platform for hydrogel-based micron-sized structures. *AIP Advances*, 9(6), 065204. <https://doi.org/10.1063/1.5097001>
28. Li, Y. (2024). Diurnal biological effects of correlated colour temperature and its exposure . *Applied Ergonomics* , 119. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104304>
29. lighting, E. (02 de 07 de 2025). *etaplighing*. Obtenido de etaplighing: <https://www.etaplighing.com/es/blog/escala-de-temperatura-de-color-kelvin>
30. Ma, Y., Yu, D., & Bian, Y. (2024). Modeling Bamboo Window Blinds in Classrooms: Assessing Daylighting Performance by Simulation Incorporating BSDF. *LEUKOS*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/15502724.2024.2382455>
31. Martínez, A., Gonzalez, V., Soto, I., & Rivera, M. I. (2024). *Diagnostic and improvement for lighting and energy efficiency in Chilean public schools*.
32. Martínez, A., Rivera, M. I., & Arriagada, P. A. (2021). *Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Prototypical Public Schools in Chile*.
33. Martínez, A., Soto, I., Bustos, P., & Rivera, M. I. (2024). Diagnostics of Existing Lighting Conditions in Existing Public Schools in Central-Southern Chile: Measurements and Predictions for Retrofit. *Blucher Design Proceedings*, 1262-1273. <https://doi.org/10.5151/sigradi2023-282>

34. MeteoBlue. (2025, julio 15). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Los Ángeles*. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/los-%c3%81ngeles_chile_3882428
35. MINISTERIO DE ENERGÍA. (2013). *Resolución 60 EXENTA* (No. 60; Versión unica-28-dic-2013). <https://bcn.cl/3o61k>
36. Ministerio de Energía. (2021). *PLAN NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGETICA 2022-2026*. Santiago: Ministerio de Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/eficiencia-energetica_16-nov.pdf
37. Montoya, F. G., Peña-García, A., Juaidi, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. *Energy and Buildings*, 140, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.028>
38. Mrabet, B. M., Chammam, A. M., & Nsibi, W. (2018). Experimental Study of Electrical and Harmonics Characteristics of LED Bulbs and Comparison with Different Other Lamp-Ballast Systems. *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 923-928. <https://doi.org/10.1109/SSD.2018.8570556>
39. naylorlampmechatronics. (2020). *BH1750* [Graphic]. https://github.com/naylorlampmechatronics/Ejemplos_BH1750
40. northerncult. (02 de 07 de 2025). *northern cult*. Obtenido de northern cult: <https://northerncult.com/color-rendering-index-cri-northerncult-blog/>
41. Oladiran Kayode Olajiga, Emmanuel Chigozie Ani, Zamathula Queen Sikhakane, & Tosin Michael Olatunde. (2024). A COMPREHENSIVE REVIEW OF ENERGY-EFFICIENT LIGHTING TECHNOLOGIES AND TRENDS. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 1097-1111. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.973>
42. Ozenen, G. (2024). *Architectural Interior Lighting*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49695-0>
43. Panska, Z., Balsky, M., Bayer, R., & Brejcha, M. (2024). Unconventional Luminaire Layout Design by Genetic Algorithms. *Sustainability*, 16(17), 7689. <https://doi.org/10.3390/su16177689>
44. PHILIPS. (2023, abril 30). *Colores estándares TL-D*. https://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fp926000205041-pss-es_ar

45. Qu, J.-Q., Xu, Q.-L., & Sun, K.-X. (2022). Optimization of Indoor Luminaire Layout for General Lighting Scheme Using Improved Particle Swarm Optimization. *Energies*, 15(4), 1482. <https://doi.org/10.3390/en15041482>
46. Rea, M. S. & Illuminating Engineering Society of North America (Eds.). (2000). *The IESNA lighting handbook: Reference & application* (9. ed). Illuminating Engineering Society of North America.
47. Repsol. (2023, julio 26). Qué es un dimmer y cómo te puede ayudar a ahorrar energía. *Asesoramiento de consumo*. <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/que-es-dimmer/>
48. robotdyn. (s. f.). *AC DIMMER MODULE* [Graphic]. <https://robotdyn.com/es/reguladores-de-intensidad-ca-bricolaje/>
49. SEC. (2020). *PLIEGO TÉCNICO NORMATIVO : RIC N°10: INSTALACIONES DE USO GENERAL*. https://www.sec.cl/reglamento-de-seguridad-de-las-instalaciones-de-consumo-de-energia-electrica-decreto-08/?view_full_site=true
50. Slegers, P., Moolenaar, N., Galetzka, M., Pruyn, A., Sarroukh, B., & Van Der Zande, B. (2013). Lighting affects students' concentration positively: Findings from three Dutch studies. *Lighting Research & Technology*, 45(2), 159-175. <https://doi.org/10.1177/1477153512446099>
51. UC Davis. (2025). *El espectro electromagnético* [Graphic]. http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Spectroscopy/Fundamentals/Electromagnetic_Radiation
52. UPC, U. P. de C. (2025, agosto 12). Fotometría. *Luminarias*. <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fotometria.php>
53. U.S. Department of energy. (2025, julio 3). *Led lighting*. <https://www.energy.gov/energysaver/led-lighting>
54. Wagiman, K. R., Abdullah, M. N., Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Md Adnan, M. F., Hussin, I., Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Aziz, S., & Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. (2023). A Fuzzy Logic-Based Tuning Model in an Indoor Lighting System for Energy and Visual Comfort Management. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(4). <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.04.022>

55. Wang, Z., & Tan, Y. K. (2013). Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm. *Energy and Buildings*, 62, 514-521. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.029>
56. Xie, J., & Omidfar Sawyer, A. (2021, septiembre 1). *A simplified open-loop control strategy for integrated shading and lighting systems using machine learning*. 2021 Building Simulation Conference. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30629>
57. Yang, W., & Jeon, J. Y. (2020). Effects of Correlated Colour Temperature of LED Light on Visual Sensation, Perception, and Cognitive Performance in a Classroom Lighting Environment. *Sustainability*, 12(10), 4051. <https://doi.org/10.3390/su12104051>
58. Yang, Y.-T., Chiang, W.-C., & Wang, J.-S. (2023). Improving Students' Learning Effectiveness by an AIoT Human Centric Lighting System. *2023 14th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)*, 180-181. <https://doi.org/10.1109/IIAI-AAI59060.2023.00045>

Anexo A. Planimetría, mediciones y documentación escuela Colonia Árabe.

ESCUELA COLONIA ARABE - LOS ANGELES

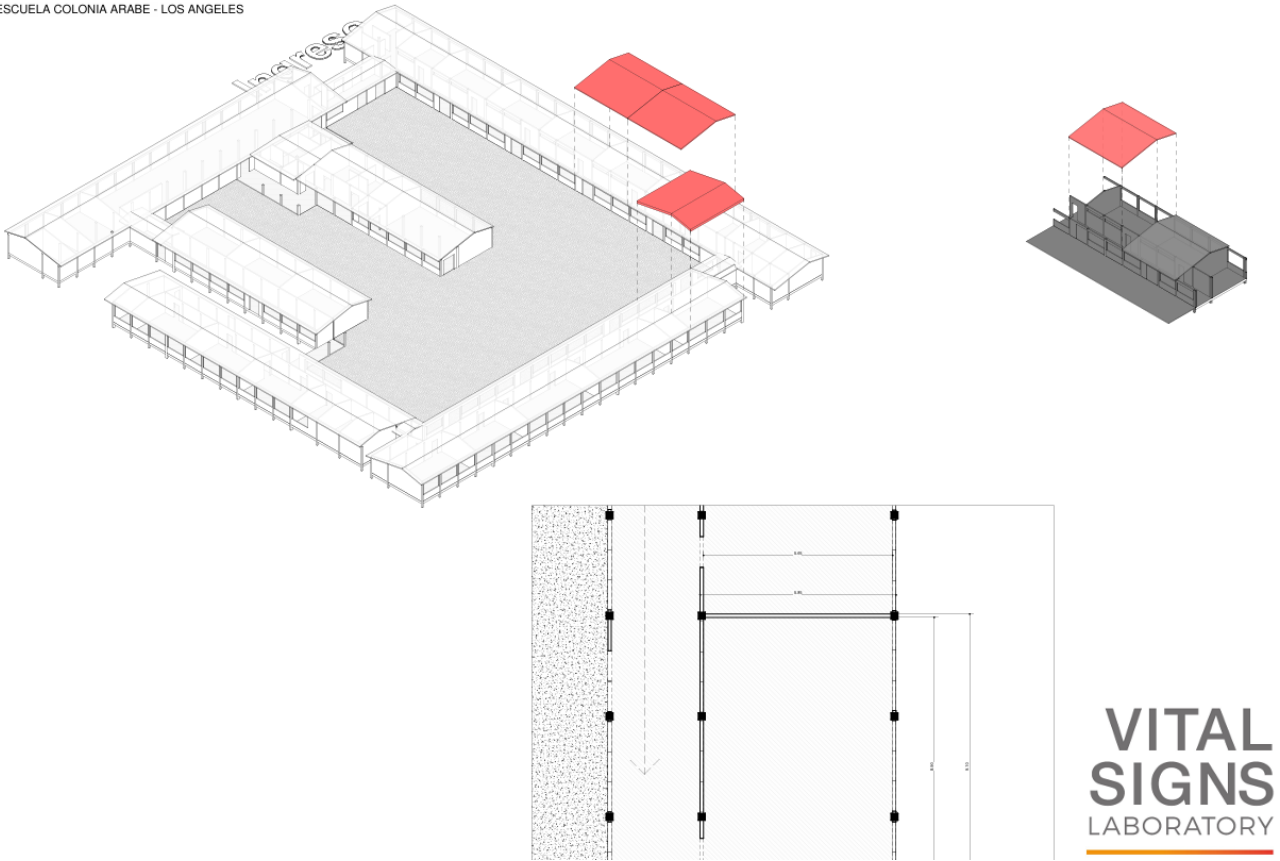


Fig. A1: vista superior y medidas de aulas escuela Colonia Árabe. Fuente Vital Sings Laboratory.

Planimetría Sala 3 Colonia Árabe, Los Angeles

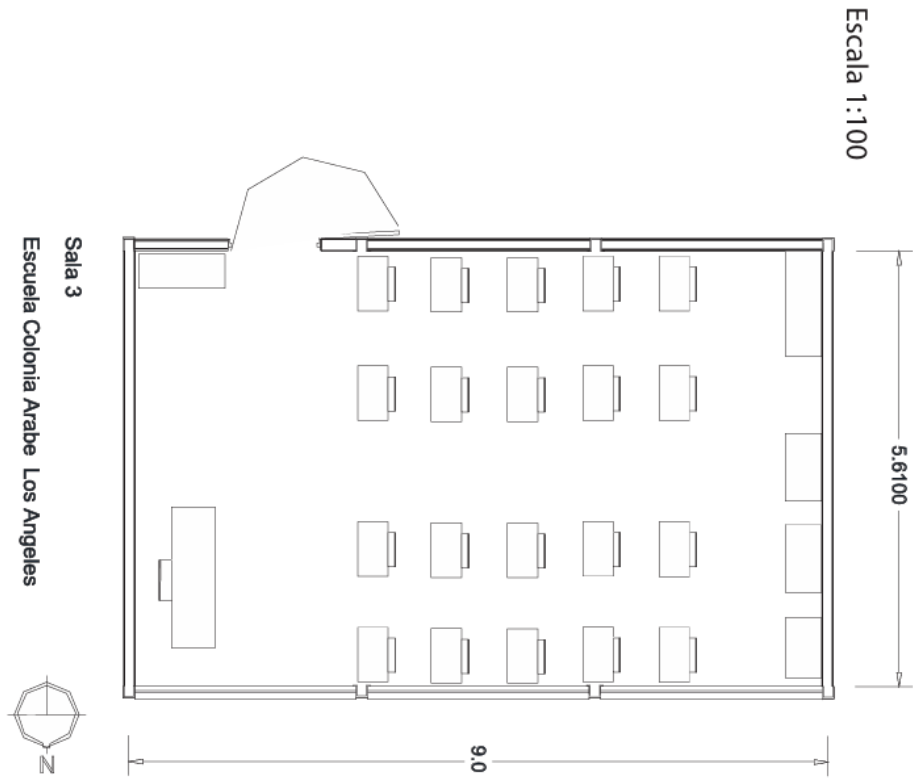


Fig. A2: Dimensionamiento de aula 3 escuela Colonia Árabe.

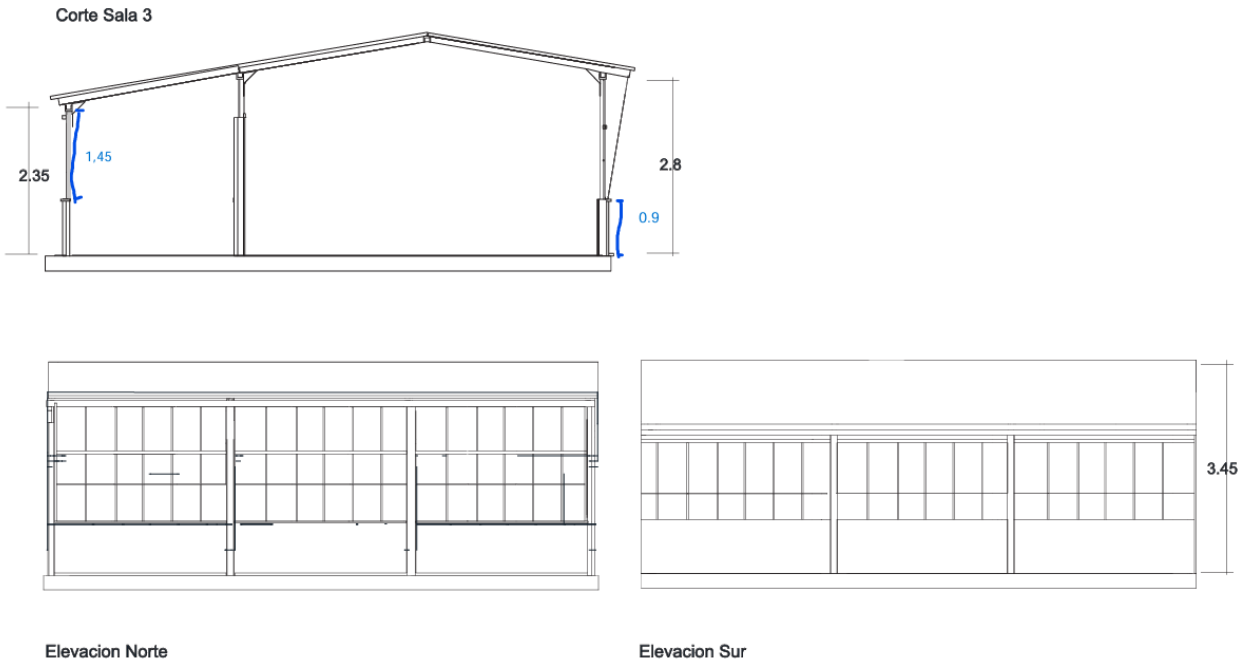


Fig. A3: Dimensionamiento de pasillos y techos de escuela Colonia Árabe.

Documento 1: Artículo “Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Prototypical Public Schools in Chile”. Fuente (Martínez et al., 2021)

RESILIENT CITY
Physical, Social, and Economic Perspectives

Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Prototypical Public Schools in Chile

Andrea Martínez Arias¹, María Isabel Rivera Barraza^{1,2}, Pablo Arragada Ojeda¹

¹Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Universidad de Concepción, Chile
²Researcher, Centre for Sustainable Urban Development (CEDEUS), Chile

ABSTRACT: Climate change has local manifestations through extreme weather events, such as drought and heatwaves. While those extreme conditions can be mitigated in new buildings through improved designs and new construction codes, assessing existing buildings can be challenging. Existing buildings have been operative for many years, some built before energy codes, and many have reached their useful life with little or no maintenance. This study explores a workflow for assessing the improvement of existing public schools in Chile. Although public schools run with very little energy consumption, retrofitting those buildings represents an opportunity to achieve net-zero emissions while improving indoor comfort. A public school in the central-southern region of Chile is used as a case study. It features prefabricated metal frames with masonry infill in exterior walls, single glass panes, and no insulation on walls or roofs, with substantial evidence of thermal bridging. These types of schools are not equipped with active systems for conditioning, and therefore, it is still a predominant typology in the country built in the 1960s, which has low actual energy consumption and is therefore energy-efficient. However, that energy efficiency is a tradeoff in the indoor comfort of students and teachers. Retrofit alternatives were evaluated based on an energy model using software for early design stages. The model had an error margin of less than 5% than the school's actual energy consumption. Several improvement strategies on the thermal envelope are proven as potential effective retrofits. Net-zero emissions is visualized as likely considering the already low energy consumption of the building. This study is informative to many similar schools that are still operational long after having completed their useful lives with little maintenance. Finally, the study contributes a quick and easy alternative that designers could use to improve our extensive stock of existing buildings.

KEYWORDS: Existing Schools, Energy Retrofit, Calibration Models, Passive Design, Global Sustainability, Mitigation and Adaptation, Digital Design and Practices.

INTRODUCTION

Schools are a critical building type since they provide shelter to our children during their early years, and still, in Chile, there is no policy for schools to comply with high performance. Neither energy codes nor special certifications at a national level mandate schools to comply with high-environmental standards. Most of the existing schools were built with little consideration of energy and indoor environmental performances, and many are still operational despite having completed their useful lives. A few rules from the 1980s regulate a limited set of indoor parameters, such as the minimum temperature in classrooms, 12°C (53.6°F), or the minimum lighting levels in classrooms, 180 lux (Ministerio de Educación 1989). The norm also mentions that artificial light and mechanical ventilation can supply underlit and underventilated spaces. Mechanical ventilation should be provided whenever natural ventilation is impossible with existing fenestrations, which is rare in Chilean schools due to energy costs and restricted budgets in public schools. Still, some schools use wood furnaces inside the classrooms for heating in cold climates.

In the last years, the government has improved the standards for new schools. Along with reforms to education that started in 1997, the government recommends a series of sustainable criteria whenever new school facilities are built with public funding. The so-called “seal schools” (in Spanish “escuelas sello”) are to be certified by a national system of sustainability. In the process, the government has assumed the global challenge that all new and improved existing buildings follow high standards of sustainability, comfort, and energy efficiency (Ministerio de Educación 2013, 30). However, these new schools are still a tiny portion of the country's extensive stock of schools, many of which are still operative long beyond their useful lives and urgently need renovation. More than 9,000 primary schools provide learning shelter for nearly 2 million children in the country (Ministerio de Educación 2018). The government started the first survey of school facilities in 2012 after the 8.9 magnitude earthquake suffered in 2010, collecting information from 5,530 school facilities (Ministerio de Educación 2020). School facilities have a wide range of ages and sizes and have different levels of damage. Fifty-six percent of the school buildings presented less than 20% damage; 34% of the buildings had between 20% and 40% damage; and about 10% of these surveyed buildings presented damage equal or superior to 40% (Montenegro 2016). Even though the school inventory was a nonmonetary task, it still does not provide a precise diagnostic of the spatial and comfort conditions of the stock of schools.

RESILIENT CITY
Physical, Social, and Economic Perspectives

On a global level, poor comfort conditions negatively affect students' performance, increase respiratory diseases and absenteeism, and high teacher turnover. Students learn in precarious conditions, and those are mostly the more vulnerable kids. The different environmental factors affecting children's health and learning in classroom settings have been widely reported in the existing literature. Improved acoustical, air quality, and thermal conditions are essential in schools (Bluyssen et al., 2018). Several studies have found a school with poor air quality—high levels of CO₂ concentration particulate matter or volatile organic compounds (Madureira et al. 2016, Kawczyk et al. 2016, Shendell et al. 2004). It is urgent to reduce children's exposure to the polluted environment to bring benefits in learning (Bakó-Biro et al. 2012) while reducing disease, mortality, and improving wellbeing, especially for kids (World Health Organization 2018). Also, daylighting is a fundamental indoor condition, and windows are critical in student performance and learning (Fuschong Mahone Group 2003, 119). Considering the individual differences in the perception of comfort in kids (Tiel, Jensen, and James 2014), the importance of indoor environmental conditions keeps being proven as fundamental, as is the perception of comfort from the users of these learning spaces (De Gull, De Pos, and De Caill 2012).

In Chile, spatial and indoor conditions for learning and comfort are not always achieved in schools, whether public or private (Treblicock, Bobadilla, et al. 2012, Treblicock et al. 2016, Arriño, Whitman, and Casals 2011). Indoor environmental conditions such as noise, reduced lighting levels, and overheating are typical considering overcrowded classrooms. Temperatures lower than 8°C have been registered in the winter season while concentrations of CO₂ are higher than 3,800 ppm (Montenegro 2016). In terms of thermal comfort in schools, combustion heating artifacts are still common in cold areas, schools in warmer areas, and no cooling systems. Artificial lighting is frequent due to insufficient natural daylighting, high contrast and glare, and uneven distribution. Consequently, what leads to artificial lighting are usually outdated or non-efficient fixtures. Finally, with around 1.1 m²/student, Chilean schools are among the most crowded compared to the 2 m²/student of OECD countries (Montenegro 2016). Too many children in the classroom is only one factor in schools' registering CO₂ over 5,000ppm in classrooms in Chile (Rivera 2019). In addition, projectors introduced into the classroom derived from teachers keeping curtains closed, which also difficult ventilation from windows. With too many kids in a classroom, the spread of illnesses like SARS-CoV2 and the resulting absenteeism, high noise levels, and the low performance of students and teachers are always present risks.

With new standards and guidelines for healthy and high-performance schools being helpful resources in improving schools, there is still a long way to implement the existing ones. New standards and certifications have established parameters for proper ventilation and air quality, thermal comfort, acoustics, and various fundamental attributes in high-performance schools (ASHRAE 2018), and many leading international certifications include unique systems for schools. In Chile, some critical initiatives have focused on providing recommendations for the energy efficiency of schools (Treblicock, Pident, et al. 2012) and colleges (Marinon and Morell 2014). However, still more guidelines are needed to inform school stakeholders. Improvements such as replacing combustion systems to air conditioning equipment or replacing old light fixtures are standard partial retrofits in schools; however, these do not solve the problem. Those interventions might increase energy bills even when they are probably undersized to overcome the envelope deficiencies. These “low-hanging fruit” solutions do not adequately solve the problem.

Retrofitting schools are called to restore health, performance, environmental, and cost considerations together in a life-cycle perspective, maximizing wellbeing while minimizing ecological impacts. The initial investment of a whole-building retrofit may seem expensive. Still, from a whole-building lifespan perspective, that added cost could pay for itself due to decreased energy cost and future earnings from the yields of students and teachers' improved wellbeing. High-performance schools have proved that increased value resulted in annual financial benefits by more than 13-fold, the most important of the estimated future gains for improved academic performance (Kats G, Perlman J, and S, 2005). Even if a complete retrofit could not be possible as one investment, a plan containing the right-step retrofit process should be provided. Energy simulations made by experts can be prohibitive for most school districts and also a time-consuming process. While they are less accurate, user-friendly tools, such as plugins to the leading design software, would allow for early analysis using simple mass studies with few inputs. Those easy-to-use tools are handy to know performance displays while designing. But most important, to efficiently assess school improvement, easing early-stage analysis is fundamental to inform the decision-making process.

1.0 METHODOLOGY

1.1 Objectives

The objective of this study was to evaluate retrofit strategies in the early stages of the assessment process. For doing so, the following specific objectives were set:

- Identifying early-stages plugins would be more efficient for representing the actual energy use of existing buildings;
- Determining the error range of these models;
- Evaluating the flexibility for assessing retrofit strategies.

1.2 Methods

This study used the following methods and steps:

- Model a case study school in a commonly used modeling software for geometry (Sketchup – Revit). The study considered SketchUp (Trimble, 2021) a user-friendly software plugin to evaluate its capabilities for generating fastouts during the early design, using EnergyPlus and Radiance engines for calculations. For the energy study, the Selaira Plugin (Trimble, 2021) was used in conjunction with both models.
- Compare the simulated results to existing consumption for a year. A pre-pandemic year was used for the study since it represented a typical use in the school.
- Estimate the potential for energy generation to achieve net-zero energy condition.

1.3 Case Study

A public school building located in a valley city in the central-south region in Chile was used as a case study. The building represents a prototypical prefabricated school building constructed by the government to palliate schools' deficit in an educational reform implemented in the middle of the 20th century. The school, built in 1968, accounts for 2,400 m² on a site of 10,000 m². The school is administered by the municipality department responsible for the operation and maintenance of the school. The school has 420 students; however, the current enrollment is around 377 students from pre-school to 8th grade, corresponding to the primary-cycle in the morning and afternoon uses. On average, classrooms have an occupancy of 20 students (DAEM, 2021). Figure 1 provides general view of the outside patio and corridors of the school.

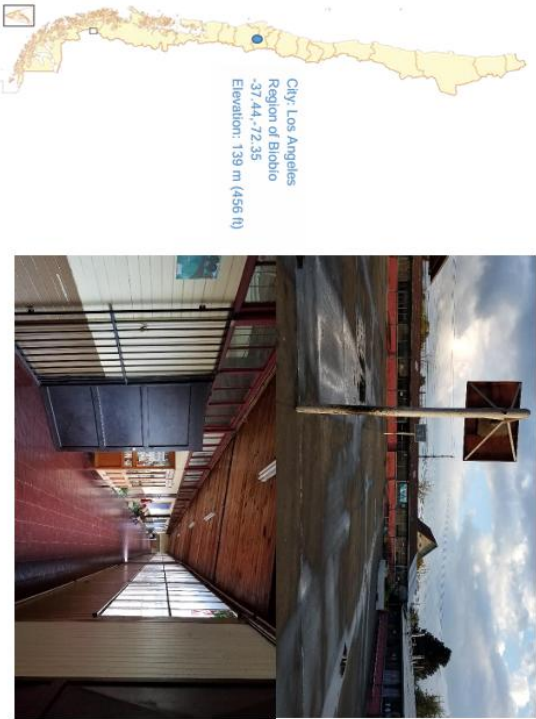


Figure 1: Location Los Angeles, Chile (left), image of exterior of the school (left) and one of the corridors reaching the classroom pavilion (right). Source: (Authors, 2021)

The school belongs to a typology resulting from a government plan for increasing literacy and instruction as public policy in the middle of the 20th century. The so-called Society for Construction of Educational Facilities (in Spanish Sociedad Constructora de Establecimientos Educacionales - SCEE) was created primarily to build schools in the whole country. This entity was responsible for constructing schools from 1937 until 1987 (Valdina y Torres, 2016). Mass production of schools from that period contributed to building a stock strongly in quantity but not in space quality.

Looking at the energy use, the school has a very low energy use. Actual electricity use during the 2019 school year was 29,900 kWh/year as illustrated by monthly consumption in Figure 2. Based on the 2,463 m² of usable area, the school had a resulting Energy Use Intensity (EUI) of 12.145 kWh/m²/year. Energy consumption in this school is low mainly because it does not have conditioning systems for heating, ventilation, or cooling (HVAC). The school is heated by burning wood, including in classrooms, while cooling occurs mainly through natural ventilation. Therefore, this electricity consumption represents end uses such as lighting and plug loads.

RESILIENT CITY
Physical, Social, and Economic Perspectives

Electricity Consumption
Colonia Arabe Primary School (2019)



Figure 2: Electricity consumption by the case-study school for the year 2019. Source: (Authors, 2021)

The school's physical deficiencies represent a historical debt to this community. Figure 3 shows some thermal images of classrooms of thermal bridging in winter time (with wood stove on) and summer time heat transfer through the roof steel beams. The lower energy consumption is a tradeoff for comfort, evidenced by plans of demolition and parent strikes. In 2018, this school was listed for demolition, and in 2018 a national competition was opened for a new building (La Tribuna, 2018). However, the new building has been on hold during the COVID pandemic. Also, a peaceful strike was embraced by parents to protest the poor conditions, primarily due to deficiencies in bathroom facilities (El Contrastista, 2019).

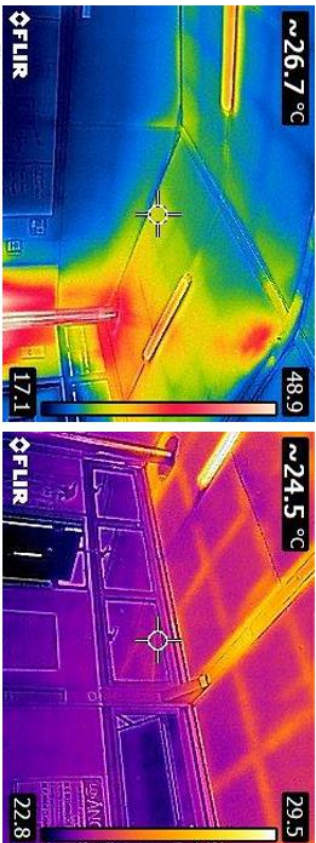


Figure 3: Thermal imaging of classrooms showing thermal bridges in roof areas during winter (left) and summer (right)

2.0 MODELS AND CALIBRATION

2.1. Analytic Model

As a first step, a geometry model was built in SketchUp (Trimble, 2021) and Revit, using little effort due to the lack of details. The Selaira plugin automatically identifies envelope components such as roof, walls, windows, and floors, saving time on input parameters, as shown in Figure 3. The rapid feedback of energy performance is displayed through a dashboard displayed by the plugin.

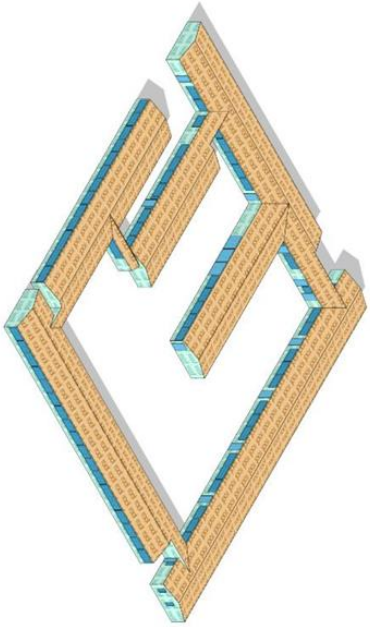


Figure 4: Image of geometry SketchUp model showing the roof, wall, and window components. Source: (Authors, 2021)

2.2. Input parameters

The geometry was obtained by modeling in SketchUp and Revit, and location and orientation were defined in the model. The Sefaira plugin allows for two levels of input/outputs with an increasing number of instances. The first set of inputs was defined considering the most sensitive parameters by the plugin, which are listed in Table 1. Those inputs allowed for a first baseline. However, the plugin assumes mechanical systems, which did not match the actual free-running school condition.

Table 1: Input at the screen plugin parameters for the baseline model. Source: (Authors) based on the Sefaira Plugin inputs.

Variable	Condition
Wall insulation	No insulation
Floor insulation	No insulation
Roof insulation	No insulation
Glazing U-Factor	1 Pane
Visible light transmittance	1 Pane
Solar heat gain coefficient	Clear single glazing
Infiltration rate	Leaky building
Ventilation rate	High ventilation
Equipment	Poor
Lighting	Poor

A first baseline was determined with a second level of inputs was defined on the cloud interface, with an extended detail for envelope components, as shown in Table 2. The cloud fields allowed modifying performance parameters such as thermal conduction (U) values. Also, inputs for internal loads such as occupancy, equipment, and lighting loads were defined on actual estimates from the school. Only at the cloud interface was it possible to eliminate HVAC, which allowed to get closer to the free-running school condition. All these configurations produced changes in final consumption, resulting in energy use of 12.78 kWh/m²-year.

Table 2: Final input parameters for the baseline model. Source: Authors

Energy	Material	Unit	Value
Facade Glazing	Glass	W/m ² -K	4.8
Walls	Brick	W/m ² -K	2.27
Floors	Tiles	W/m ² -K	0.70
Infiltration	Crack Infiltration	L/s-m	2.00
Roof glazing	Glass	W/m ² -K	0.40
Roofs	Metal Deck	W/m ² -K	1.90
Occupant density	-	m ² /person	3
Equipment power density	-	W/m ²	3
Lighting power density	-	W/m ²	3
EUI TOTAL		kWh/m²-Year	12.78

3.0 RESULTS

3.1. Baseline model
With the EUI of 12.78 kWh/m²-yr, allowing results with a difference of 2.58% compared to the consumption shown in Table 3, it is possible to see all the configurations used, established for the purposes of the investigation as the Baseline. From this point, the exploration of optimizations began to reduce energy consumption.

Table 3: Final annual energy consumption by energy bills and Sefaira baseline model. Source: (Authors)

	EUI	Unit
Actual electricity use	12.45	kWh/m ² -Year
Model electricity use	12.78	kWh/m ² -Year
Difference	2.58%	

3.2. Retrofit strategies

Since the deficiencies known in the building were mainly in the envelope, the strategies focused on improving the thermal performance of the roof, walls, and glazing. It also contemplated improvement for lighting. Two rounds of retrofits were run. Input values for those changes are identified in Table 4.

Table 4: Final inputs for alternatives for retrofits.

Energy	Material	Unit	Baseline	Retrofit strategies #1	Retrofit strategies #2
Facade Glazing	Glass	W/m ² -K	4.8	2.9	1.4
Walls	Brick	W/m ² -K	2.27	0.33	0.4
Floors	Tiles	W/m ² -K	0.70		
Infiltration	Crack Infiltration	L/s-m	2.00		
Roof glazing	Glass	W/m ² -K	0.40		
Roofs	Metal Deck	W/m ² -K	1.90	1	1
Occupant density	-	m ² /person	7.0		
EPD	-	W/m ²	3		
LPD	-	W/m ²	3		
EUI TOTAL		kWh/m²-Year	12.78	9.21	9.18
				-27.94%	-28.17%

The first set of retrofit strategies (Retrofit Strategies #1), resulting in a final EUI of 9.21 kWh/m²-year.

- Firstly, replacing the school's windows from simple to insulated glass with better thermal resistance.
- Complementary, large windows throughout the school, the window-to-wall ratio was reduced, dropping from 40% to 20% on west facades.
- Likewise, opaque walls were improved by applying an exterior insulation system layer. EIFS, composed of expanded polystyrene and a rough coating, reducing thermal losses.
- The roof's insulation was improved by applying a ceiling and adding insulation.
- Finally, reducing energy consumption was postulated by changing the lighting, which are currently fluorescent tubes, to LED panels, reducing the Light Power Density to 2 W/m².

The second round of retrofit (Retrofit Strategies #2) looked to fine-tune on two specific instances of the envelope, resulting in a final EUI of 9.18 kWh/m²-year.

- It began with the variation of the composition of the glass on the facade, going from simple glass to insulated Low-E glass, from a U value of 4.8 W/m²-K to 1.4 W/m²-K.
- As the construction of this typology of schools is modular, within this modification, the possibility of replacing the composition of the walls was raised, replacing bricks with cement blocks, improving the U-value of the brick wall from 2.27 W/m²-K to 0.4 W/m²-K.
- Reducing the window-to-wall ratio for the South and West facade from 50% to 40% and 20%, respectively.
- Like the previous set of retrofit strategies, the same improvement for the ceiling integrated an insulated false ceiling, reducing the value of the roof to 1 W/m²-K.
- Finally, reducing energy consumption was sought by changing the lighting, lowering the Light Power Density to 2 W/m².

4.0 DISCUSSION

The software tools were easy to use in the early stage of decision making. Overall, it was helpful in informing energy and daylighting performance, which in the case study, it did not refer to massing exploration, but changes on the building envelope through the definition of input parameters. However, it had some limitations when applied to the case study. The tool does not allow for elimination of HVAC in the plugin. The free-run condition was not represented in the plugin interface but in the cloud interface.

The actual EUI of 12.45 kWh/m²/year is shallow consumption for school buildings. This is especially true compared to schools that use active systems, such as in developed countries like the USA. Although there was a lower energy consumption at the end of the analyzed year, this energy consumption is still low because of the lack of conditioning systems in the building. Regarding energy savings, retrofits resulted in 27.94% and 28.17% reduction from retrofit #1 and #2 respectively. Although those are considerable savings, the extra effort from the second set of strategies might be marginal compared to the effort of those strategies. Nevertheless, a building with this energy consumption can be easily transformed into a net-zero energy building by implementing on-site energy generation. However, it does not solve the problem of energy conservation and the need for improved indoor comfort.

When comparing both optimizations carried out, there is no significant difference between one and the other; however, in the case of the first retrofit set, a change was sought in the construction elements that would have a lower cost than the second retrofit set. In the case of the second optimization, it was sought to reduce energy consumption by applying higher value construction elements. This improved the existing brick wall by applying a complement layer type EIFS.

Although this study covered strategies to reduce energy use, the final goal of the represented retrofit strategies would be for superior benefits: better indoor environment quality for learning. Considering that there is a debt on the public school system to minimum comfort, there must be a more robust effort to improve existing buildings. It is urgent to establish energy codes that could push for improvements that ensure, at least, a minimum level of comfort conditions for many kids and teachers that spend most of their day in these types of schools.

CONCLUSION

This study explored early-stage estimations of retrofits through commonly used software tools for early-stage designs. It showed that quick estimations can be made considering total energy use. With current plug-ins, retrofits are quickly estimated for sensitive input parameters. In the case study, a public school in the central-southern region in Chile, improvements resulted in energy reductions close to 30%. Although the case study has a low actual energy use, it is poorly built and has no active systems for indoor conditioning. While it is good from an energy perspective, unfortunately, the case study is representative of a large portion of schools in the country where energy efficiency is a tradeoff of children and teachers' comfort.

This research line is informative and does not hope to be an alternative to comprehensive energy calibrated models and parametric optimization analyses. This study covered the line of easy and quick first explorations that might be useful for early-stage retrofits assessments in the design process. Hopefully, this is a practice that starts to be more common, as we need to urgently assess our existing stock of buildings for both climate commitment and human commitments.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was possible thanks to the support provided by the following people/institutions: Faculty of Architecture, Urbanism and Geography (FAGU) of the University of Concepción; government-funded research by ANID-PAL-77180057 and CEDEUS, ANID/FONDAP 15110020.

REFERENCES

- Amijio, G., C.J. Whitman, and R. Casals. 2011. "Post-occupancy evaluation of state schools in 5 climatic zones of Chile." *Gazi University Journal of Science* no. 24 (2):265-374.
- ASHRAE. 2018. *Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings - Achieving Zero Energy*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Bako-Biro, Zs. D. J. Clements-Croome, N. Koehner, H. B. Ambi, and M. J. Williams. 2012. "Ventilation rates in schools and pupils' performance." *Building and Environment* no. 48:215-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>
- Bluyssen, Philomena M., Dafi Zhang, Stanley Kurvers, Margjelein Overton, and Marco Ortiz-Sanchez. 2018. "Self-reported health and comfort of school children in 54 classrooms of 21 Dutch school buildings: Building and Environment no. 138 (2018):106-123.
- De Gijl, Valeria, Osvaldo Da Pos, and Michele De Carli. 2012. "Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools." *Building and Environment* no. 56:335-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.024>
- Heschong Mahone Group. 2003. *Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment*. California Energy Commission.
- Kats G, Peftman J, and Jamnadas S. 2005. *National review of green schools: costs, benefits, and implications for Massachusetts*. Original edition, Washington, DC.
- Krawczyk, D. A., A. Rodero, K. Gladyszewska-Friedonk, and A. Galewski. 2016. "CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations." *Energy and Buildings* no. 129:491-498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.003>
- La Tihuna. (2018). *Escuela Colonia Arabe cada vez más cerca de contar con nueva infraestructura*. Diálogo La Tihuna. Recuperado de <https://www.latihuna.cl/noticias/2018/07/05/escuela-colonia-arabe-cada-vez-mas-cerca-de-contar-con-nueva-infraestructura.html>
- Madureira, Joana, Ines Paderna, João Rudo, Milton Severo, Elisabete Ramos, Henrique Barros, and Eduardo de Oliveira Fernandes. 2016. "Source apportionment of CO₂, PM10 and VOCs levels and health risk assessment

- in naturally ventilated primary schools in Porto, Portugal." *Building and Environment* no. 96:198-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.031>.
- Marinón, Yanesa, and Alejandro Morel. 2014. *Guía de apoyo al desarrollo de diagnósticos energéticos para instituciones de educación superior*. IES.
- Ministerio de Educación. 1989. *Decreto 548*.
- Ministerio de Educación. 2013. *Criterios de diseño para espacios educativos*.
- Ministerio de Educación. 2018. *Estadísticas de la Educación 2017*. Santiago, Chile: Centro de Estudios Mineduc.
- Ministerio de Educación. 2021. *Catálogo de Infraestructura Escolar 2020* [enred 2021 abril 1. 2021]. Available from <https://infraestructurascolar.mineduc.cl/studios-y-publicaciones/catastro-infraestructura-escolar/>.
- Montenegro, Esteban. 2016. *Buena Arquitectura, Mejor Educación*. CA Ciudad y Arquitectura. 2016.
- Shendell, D.G., R. Pihl, W.J. Fisk, M.G. Apple, D. Blake, and D. Faulkner. 2004. "Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho." *Indoor Air*. 2004 no. Oct;14(5) 333-41. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>. PMID: 15330793.
- Tel, Despoina, Mark F. Jentsch, and Patrick A. B. James. 2014. "The role of a building's thermal properties on pupils' thermal comfort in junior school classrooms as determined in field studies." *Building and Environment* no. 82:640-654. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.005>.
- Trebilcock, M., A. Bobadilla, B. Piderit, R. Figueroa, C. Muñoz, R. Sanchez, and J. Hernandez. 2012. *Environmental Performance of Schools in Areas of Cultural Sensitivity*. In PLEA 2012, 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture. Lima, Peru.
- Trebilcock, M., J. Soto-Munoz, M. Yanez, and R. Figueroa-San Martín. 2016. "The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile." *Building and Environment* no. 114:455-469. doi: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.036>.
- Trebilcock, Maureen, María Piderit, Freddy Guzmán, Ariel Bobadilla, Rodrigo Figueroa, Cristian Muñoz, Roberto Arriagada, Daniela Besser, and Tobias Hart. 2012. *Guía de Eficiencia Energética de Establecimientos Educacionales*. Agencia Chilena de Eficiencia Energética.
- Trimble (2021). *Sketchup*.
- World Health Organization. 2018. *Air Pollution and Child Health: Prescribing clean air*.
- Valdivia, S. Torres, C. (2016). *Infraestructura escolar pública. Historia, patrimonio y deuda*. *Revista Ciudad y Arquitectura*. Accessed from <http://revista.ca.cl/portada-revista-ca-153/articulos-portada/articulo-02-soledad-valdivia/>

Documento 2: Artículo “Diagnostics of Existing Lighting Conditions in Existing Public Schools in Central-Southern Chile: Measurements and Predictions for Retrofit”. Fuente (Martínez, Soto, et al., 2024).

Diagnostics of existing lighting conditions in existing public schools in Central-Southern Chile: Measurements and predictions for retrofit

Andrea Martínez Arias¹, Isaac Soto San Martín¹, Pierina Bustos¹, y Ma. Isabel Rivera^{1,2}

¹ Departamento de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Universidad de Concepción, Chile

² Centre for Sustainable Urban Development (CEDEUS), Chile

Abstract. Daylight is one of the indoor environmental qualities that most influence students' development in learning in a classroom. However, many existing schools do not optimize daylight. Indeed, standardized facade designs result in wasted energy in artificial lighting while daylight could be harvested. This study provides a diagnostic of illuminance levels and their distribution in a typological classroom based on field data for a school in the central-south region of Chile. The government built these schools during the second half of the 20th century, and they are still operational, maintaining the same original facade, with no differentiation regarding orientation. Through simulations, it analyzes potential retrofit strategies to identify the ones that could result in better light distribution and autonomy. Facing a lack of local standards for lighting levels in schools' classrooms, international standards are used as thresholds for actual lighting levels and a series of retrofit scenarios.

Keywords: Existing schools, Diagnostic, Retrofit, Daylighting.

1 Introduction

Schools are critical spaces for children for their learning and general wellbeing. However, whether for public or private ownership type or considering specific climatic conditions, indoor environmental conditions (i.e., acoustics, daylighting, and comfort) in Chilean schools have been shown to be poor, whether for public or private ownership type nor considering specific climatic conditions (Armijo, Whitman, & Casals, 2011; M.I. Rivera, 2019; M. I. Rivera & Kwok, 2019; Trebilcock, Soto-Muñoz, Yañez, & Figueroa-San Martín, 2016; Trebilcock, Soto, & Figueroa, 2014). Some of these environmental conditions get stressed

out as classrooms are overcrowded, the current Chilean D.S. 548 established that the minimum area is 1m² per student, much lower than the average space in OCDE countries (M.I. Rivera, 2019).

The typology from the "Sociedad Constructora" from the 70s¹, was a school prefabricated steel and light school structure in Chile, which is still predominant and operational in many cities today. The latter was a response to the massive construction response after the Educational Reform in the 1960s, intending to build as many schools infrastructure to provide free access to education to primary students in Chile. (Exss Cid, 2018). The historical and typological significance of these systematic and industrialized schools have been covered in previous studies. (Exss Cid, 2018; Torres & Rojas, 2017), while others have highlighted the need for their improvement (Martínez, Rivera, & Arriagada, 2022).

Access to daylight in Chilean schools is a common resource many designers take advantage of; we observed that it is not studied and distributed in a manner that could improve visual comfort for students and teachers if the facade had some special treatment. Classrooms only rely on the use of indoor curtains for solar control. Teachers usually keep curtains closed because of drafts from the windows in winter or overheating in the summertime, and use projectors for class instruction to create high contrast and control glare or uneven distribution. Additionally, using artificial lighting is expected due to insufficient daylight. However, they do not provide sufficient lighting levels. Due to lighting fixtures being usually outdated, they need to be more efficient in light quality and energy efficiency.



Figure 1. Interior view of the study classroom typology during wintertime. This image was taken during the pandemic, thus the less students seating arrangement than normal school year. It is possible to observe paint over glass panes in lower areas of the window and curtains typical in classrooms for direct sun control. Source: Authors, 2023.

Along with integrating daylight performance in new high-performance schools, improving existing ones is also crucial, as many remain operational beyond their lifetime with minimum maintenance. It has been estimated that 80% of buildings in 2050 are already built (Lee, Matusiak, Geisler-Moroder, Selkowitz, & Heschong, 2022). Among these, retrofitted schools are called to restore health and environmental quality together, given the climate crisis. In the long-term, any added retrofit cost could pay for itself due to decreased energy costs for artificial lighting and future earnings for the fruits of students' and teachers' improved well-being.

1.1 The importance of daylight in classrooms

The evidence that exposure to daylight and views are essential to human life is widely documented for decades (Heschong, 2021; Ludlow, 1976), especially how it impacts human systems such as the visual (Boyce, Hunter, & Howlett, 2003) production of Vitamin D and circadian regulation (Crowley, Cain, Burns, Acebo, & Carskadon, 2015; Mirrahimi, Ibrahim, & Surat, 2013). Currently, daylighting is recognized as one of the most influential factors in creating a positive learning environment, creating optimal conditions for the development of tasks, facilitating learning, and improving performance (Aumann, Heschong, Wright, & Peet, 2004; Rahman & Tuhin, 2019; Susan & Prihatmanti, 2017; Tanner, 2009).

In particular school design, daylight was incorporated as a physical environmental condition fundamental to students' health from the beginning of the 20th century in some government design guidelines (Heschong, 2021 citing American guidebooks; Hobday, 2015 citing British guidelines). After the prolificacy of mechanical means that resulted in a period of windowless schools in some developed countries, a boom in the importance of passive strategies after the oil crisis of the 1970s derived in passive solar schools being built with daylight as a priority (Wu & Ng, 2003). Some research has focused on the importance of the design of windows as a concern for the eye development of children (Hobday, 2015). In addition to the benefits of incorporating natural light, is the connection to the outside, as a positive effect on the quality of life (Kent, 2022) the view to nature has also been linked with children's wellbeing (Lindemann-Matthes, Benkowitz, & Hellinger, 2021) and learning outcomes (Heschong Mahone Group, 2003). All these studies provide the foundation that must inform architecture and industry (Lee et al., 2022), not only in new designs but mostly in existing buildings.

1.2 Metrics, building codes and standard values for daylighting

Even though the Chilean government has pushed for improvement in new and existing schools, there needs to be a policy for schools to comply with high performance, no energy code, or special certification at a national level that can mandate schools comply with current standards. A limited set of indoor parameters, including a minimum average of 180 lux for the entire classroom area, are defined in a rule for schools from the 1980s D.S. 548, which does not address the quality of its distribution and control for glare. (Ministerio de Educación, 1989) (Ministerio de Educación, 1989).

Table 1. International standards, design guidelines and recommended values

Parameter	Value	Reference
Illuminance (lux)	180 lux	DS 548 (1989)
	300 lux (min) - classroom 500 lux - whiteboard	ACEE (2016) based on TDR (2012, Table 16)
	750 lux - drawing general	
Daylight Factor (DF)	300 lux (area - min) - classroom general, elementary school 500 lux (area - min) 750 lux (Trask - average) - Science Lab	IES (2020)
	2% minimum 2% - 5% acceptable 5% - 10% day/lt autonomous > 10% glare probability	TDR (2012) pg. 195
Spatial Daylight Autonomy (sDA)	75% floor area with 300 lux in 50% time occupied hours	LEED v 4.1 Daylight, exemplary performance
ASE	>80% high potential 50%-79% medium potential <50% low potential	TDR (2012) pg. 197
	>90% sDA _{Autonomous}	CHPS 2014
ASE	(ASE1000,250) < 10%	LEED v 4.1 Daylight, exemplary performance

Source: Authors, 2023. Based on Decreto Supremo 548 (1989) del Ministerio de Educación, Chile; Términos de Referencia (TDR) (Ministerio de Obras Públicas, 2012), Ministerio de Obras Públicas, Chile; Lighting Educational Facilities American National Standard (Illuminating Engineering Society, 2020)

Main metrics point to evaluating the availability of light in a space in ranges that allow task to be performed without discomfort. Among these, *Illuminance* (lux) is the amount of light that falls in a determined area, which along with its

uniformity, will determine light availability according to space type. When compared to outside, *Daylight Factor* (DF) establishes the percentage of skylight outside a building that is available indoors at a given point. Light levels outdoors can reach more than 100,000 lux in direct sun and 15,000 lux in the shade on a clear day (Norton & Slegwart, 2013). Minimum DF requirements typically range between 2% and 5%. Finally, some annual metrics are currently used in building certification as indicators of high-performance. *Spatial Daylight Autonomy* (SDA) is an indicator of daylight harvest potential and consequent energy savings on artificial light. At the same time, *Annual Sunlight Exposure* (ASE) indicates the percentage of the regularly occupied floor area that is overlit (receiving direct sunlight >1000 lux) for more than 250 occupied hours. International standards serve as references with recommended values for a series of metrics, as described below in Table 1.

2 Methodology

This study presents the results based on fieldwork data of a diagnosis for one school. However, it is part of a more extensive study that includes three schools in the central southern regions of Chile. The case study includes a classroom with a north orientation in its current conditions and studies a retrofit strategy for improving daylight availability and distribution in its north facade. A Li-cor illuminance meter was used for actual measurements, with a 10-second average in a horizontal grid defined by the students' desks' height at 0.75 meters (2.5 ft.) above the floor. Those measurements were analyzed on tables and processed on an online open-source tool for contour plots (Potly, 2023).

Table 2. Retrofit strategies simulated for a north-oriented classroom

Iteration #	Description of retrofit strategy
1	White-paint in ceiling of the classroom
2	Light-shelf (exterior, 90cms)
3	Light-shelf (interior, 30cms)
4	Light-shelf (exterior + interior)
5	Light-shelf (exterior + interior) + roller curtain

Source: Authors, 2023.

A Rhino model served to evaluate retrofit strategies through Climate Studio plugin (Solemma, 2023). The first step was the definition of a baseline for the representative classroom, which was built based on current materials in the

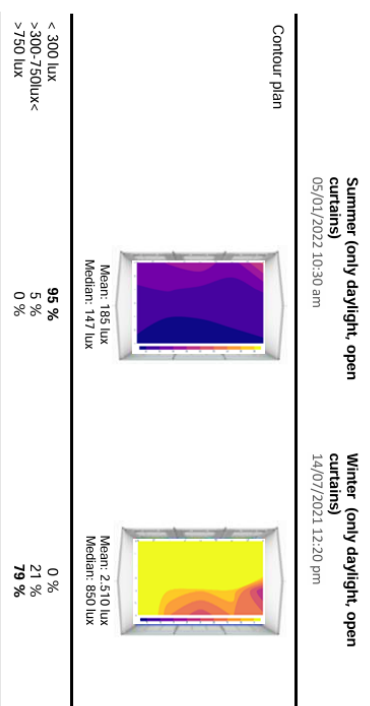
classroom and sky conditions close to the registered from the onsite measurements (summer and winter). The "point on time" analysis was used, which allowed us to compare the values on the model with the field measured values. A grid was used to calculate the deltas on the lux values and their corresponding percentage. It is worth noticing that measurements were taken at different times of the year, which impacted the distribution and number of students' layout of desks and occupancy, defined by the government during the pandemic. Once the baseline was obtained, a second baseline without curtains was created to eliminate the shading effect and allow the following iterations (listed in Table 2) of passive strategies to a full extent of window areas. Subsequently, a series of iterations of strategies for daylight harvesting were simulated, as described in Table 2. The "Daylight Availability" analysis was run for the iterations to obtain indicators for annual base performance, represented in: Spatial Daylight Autonomy (SDA) and the Annual Sunlight Exposure (ASE).

3 Results

3.1 Diagnosis of daylighting performance in a typological classroom

Measurements in the school (open curtains, lighting fixtures turned off) reported that most of the classroom was not in a range of lighting for summer and winter. The current international recommendation of a minimum of 300 lux recommended by IES was not achieved in the classroom in summer. On the other hand, more than two-thirds of the space was overlit in winter.

Table 3. Illuminance levels for north-oriented classroom from one case study school.



3.2 Definition of Baseline

The baseline model resulted in a better representation of summer than winter compared to reference field-measured values. For summer, a mean difference of -25.7% and a median difference of -12.3% existed. However, there was a mean difference of -3.11% for winter and a median difference of -289%.

Table 4. Illuminance levels for field measurements and resulting from the baseline(s) models for the north-oriented classroom from one case study school

	Field values (only daylight, open curtains)	Baseline Model (only daylight, open curtains)	Baseline Model (only daylight, no curtains)
Summer 05/01/2022 10:30 am			
Mean	185 Lux	152 Lux	226 Lux
Median	147 Lux	116 Lux	174 Lux
Winter 14/07/2021 12:24 -12:40			
Mean	2,510 Lux	2,773 Lux	4,029 Lux
Median	850 Lux	269 Lux	424 Lux

Source: Authors, 2023.

The winter difference of values could happen due to historical weather data or, most probably, because of the highly dynamic conditions of the sky (partially cloudy) at the time of measurement. The second baseline eliminated the effects of the curtains, considering that the interventions would not be compatible with them. This baseline elevated the values for winter with a median value closer to the field data.

3.3 Results of iterations of retrofits

Table 5. Diagrams with the different interventions for north-oriented classroom and annual indicators.

	0. Baseline (no curtains)	1. White ceiling	2. White ceiling - Ext. screen light shelf	3. White ceiling + Int. screen light shelf	4. White ceiling + Int + ext light shelves
Summer					
Mean	226 lux	440 lux	420 lux	366 lux	334 lux
Median	174 lux	400 lux	395 lux	353 lux	320 lux
Winter					
Mean	4,029 lux	4,316 lux	1,740 lux	4,342 lux	2,738 lux
Median	424 lux	793 lux	613 lux	749 lux	607 lux
DF Mean	1.6%	1.9%	1.3%	1.8%	1.7%
SDA (30Lux 50% area)	63%	100%	100%	98.3%	56.3%
ASF	21%	29%	14%	29%	14%

Source: Authors, 2023

The annual performance indicators, the Spatial Daylight Autonomy (sDA) as the percentage of the regularly occupied floor area that meet target illuminance level (300 lux) using daylight alone for at least 50% of occupied hours. The Annual Sunlight Exposure (ASE) represents the percentage of the regularly occupied floor area that is overlit with more than 1000 lux direct sun for more than 250 occupied hours).

The results illustrated in Table 5 showed that applying clear paint to the ceiling is a simple change that resulted in a daylight autonomy of 100%. Therefore, the increased reflectivity in that surface brought areas into the illuminance target range in both seasons, leaving only 30% of the classroom area under-lit in summer. However, ASE rose higher than the current situation due to excess direct light remaining in the border area. The exterior light shelf maintained a 100% sDA, which, complemented with an interior light shelf, allowed to bring 66% of the classroom within the target illuminance range, as it dimmed part of the over-lit values next to the window.

4 Discussion

The series of strategies were intended to test simple improvements that could be affordable for the limited budgets of public schools and feasible considering little disruption to school operations. Considering that the school year is in the south hemisphere, the operation in summer is limited to a couple of weeks (beginning of March); strategies to harvest daylight in winter would provide the opportunity for retrofits to result in energy efficiency.

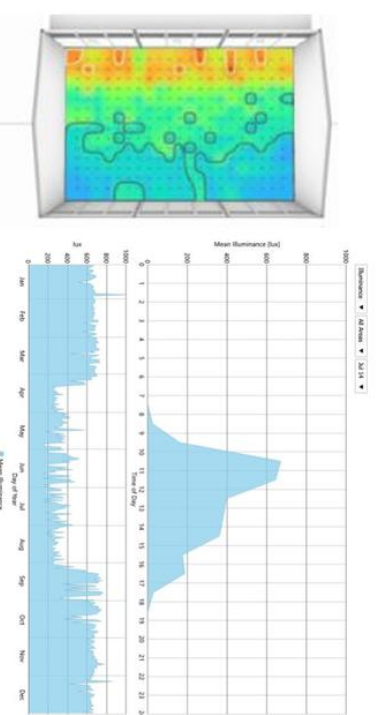


Figure 2. Illuminance distribution for the north-oriented classroom with a profile of mean illuminance for a winter day (July 14) along with the annual profile. Source: Authors, 2023.

The combination of a clear-painted ceiling and light shelves seemed a solution that controlled excess light and bounced light levels in the interior area of the classroom. An additional intervention, incorporating a roller curtain in the lower window areas, was modeled to control the excess of light at the façade of the previous iterations and provide levels between the desired illuminance ranges, except in the early morning (Figure 2).

The modeling of certain features, such as the curtain or films in the glass, would need to be further explored. Likewise, it is worth mentioning that modeling existing spaces remains challenging due to estimating the existing material attributes, either to the natural aging or the representation of the multiple elements on the surfaces in actual classrooms.

5 Conclusion

This study embraced the evaluation of a set of simple strategies of design that could improve daylight availability in typological classrooms based on field data for a school in the central-south region of Chile. The performed simulations provided metrics to evaluate the potential of these retrofit strategies that could be affordable, considering the limited budgets for public school maintenance and upgrades. Simple actions such as painting the classroom ceiling and an exterior light shelf were shown to achieve 100% spatial daylight autonomy for a north-facing classroom. Likewise, bringing the studied classroom to recommended international standards could be possible. Further exploration would better calibrate models for closer prediction, considering the dynamics of weather and the complexity of the representation of surfaces in actual classrooms.

Acknowledgments.

The authors gratefully acknowledge the research support provided by ANID PAI N°77180057, FONDECYT Iniciación N°11221255 and CEDEUS, FONDAP N°1522A0002.

References

Armijo, G., Whitman, C. J., & Casals, R. (2011). Post-occupancy evaluation of state schools in 5 climatic zones of Chile. *Gazi University Journal of Science*, 24(2), 265-374.

Aumann, D., Heschong, L., Wright, R. L., & Peet, R. (2004). *Windows and Classrooms : Student Performance and the Indoor Environment*.

Boyce, P., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). The Benefits of Daylight through Windows. Crowley, S. J., Cain, S. W., Burns, A. C., Acebo, C., & Carskadon, M. A. (2015). Increased Sensitivity of the Circadian System to Light in Early/Mid-Puberty.

- The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 100(11), 4067-4073. doi: 10.1210/jc.2015-2775
- Exss Cid, U. S. (2018). *De la racionalización constructiva a la arquitectura sistemática*. Heschong, L. (2021). *Visual Delight in Architecture. Daylight, Vision, and View* (1st Edition ed.). London: Routledge.
- Heschong Mahone Group. (2003). *Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment*. California Energy Commission.
- Hobday, R. (2015). Myopia and daylight in schools: a neglected aspect of public health? *Perspectives in Public Health*, 136(1), 50-55. doi: 10.1177/1757913915576679
- Illuminating Engineering Society. (2020). *Recommended Practice: Lighting Educational Facilities*. . New York: IES.
- Kent, M. (2022). Predicting Window View Preferences Using the Environmental Information Criteria. *LEUKOS*, 19, 1-20. doi: 10.1080/15502724.2022.2077753
- Lee, E. S., Matusiak, B. S., Geisler-Moroder, D., Selkowitz, S. E., & Heschong, L. (2022). Advocating for view and daylight in buildings: Next steps. *Energy and Buildings*, 265, 112079. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112079>
- Lindemann-Matthies, P., Benkowitz, D., & Hellinger, F. (2021). Associations between the naturalness of window and interior classroom views, subjective well-being of primary school children and their performance in an attention and concentration test. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104146>
- Ludlow, A. M. (1976). The functions of windows in buildings. *Lighting Research & Technology*, 8(2), 57-68. doi: 10.1177/1471535760080020801
- Martinez, A., Rivera, M. I., & Arriagada, P. (2022). *Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Prototypical Public Schools in Chile*. Paper presented at the RESILIENT CITY: Physical, Social, and Economic Perspectives. ARCC-EAAE 2022, Miami, US. Paper presentation retrieved from <https://www.arcc-arch.org/2022-authors-of-papers-posters/>
- Ministerio de Educación. (1989). *Decreto 548*.
- Ministerio de Obras Públicas. (2012). *Terminos De Referencia Estandarizados (TDRE)*. Mirrahimi, S., Ibrahim, N. L. N., & Sural, M. (2013). *Effect of daylighting on student health and performance*.
- Norton, T. T., & Siegwart, J. J. T. (2013). Light levels, refractive development, and myopia – A speculative review. *Experimental Eye Research*, 114, 48-48-57. doi: 10.1016/j.exer.2013.05.004
- Plotly. (2023). *Plotly Contour plots. Plotly Graphing Libraries*. Retrieved august 4 2023. doi: 10.1016/j.exer.2013.05.004
- 2023, from <https://plotly.com/python/contour-plots/>
- Rahman, F., & Tuhin, M. (2019). Daylight impact on learning environment in classrooms of secondary high school at Ishwardi, Pabna, Bangladesh. *International Research Journal of Engineering and Technology (IJRET)*, 6(10), 1148-1153.
- Rivera, M. I. (2019). *Indoor and Environmental Air Quality in Chilean Classrooms*. (22623056 Ph.D.), University of Oregon, Ann Arbor. Retrieved from <https://search.proquest.com/dissertations-theses/indoor-xa0-environmental-quality-chilean/docview/2320962873/se-2?accountid=15690> ProQuest One Academic database.

Documento 3: Artículo “Diagnostic and improvement for lighting and energy efficiency in Chilean public schools”. Fuente (Martínez, Gonzalez, et al., 2024)

PLEA 2024 WROCLAW
(Re)thinking Resilience

Retrofitting classrooms
Diagnostic and Improvement for lighting and energy efficiency in Chilean public schools

ANDREA MARTÍNEZ¹, VALENTINA GONZALEZ¹, ISAAC SOTO, & MARÍA ISABEL RIVERA^{1,2}

¹ Departamento de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Universidad de Concepción, Chile
² Centre for Sustainable Urban Development (CEDEUS), Chile

ABSTRACT: Retrofitting existing schools has become an urgent task in an increasingly changing climate and with the slow rate of the construction of new schools. Built several decades ago, many existing schools keep operating below current standards or recommendations for good indoor environmental quality. As we face an increasingly changing climate, those stressed learning spaces require solutions that could be simple and affordable to implement. This study uses measured data to document existing lighting conditions for predominant prototypical classrooms in a mild-temperate climate in Chile and predicts the effects of simple envelope retrofits. Those measurements were taken in the solstices, and curtains were open (lights on and off) and closed (light on) conditions; luminance evaluation was assessed through high dynamic range images. As the classroom does not comply with the reference thresholds, a series of simple envelope passive retrofits were evaluated through simulation. The study reveals the value of envelope retrofits being tested, revealing the potential for improvements through simple and affordable solutions for tight school budgets. This study shows that simple retrofitting could be implemented with little disruption, improving lighting and energy performance in buildings that will remain operative in the coming decades.
KEYWORDS: Existing buildings, Daylight, Retrofit, Measurements, Simulation

1. INTRODUCTION

Children deserve to spend most of their childhood in healthy and comfortable spaces. In particular, exposure to daylight and views are essential to their growth, as is the case for all human life. [1, 2]. Visual health, production of Vitamin D and circadian regulation, and creating a positive environment for learning [3, 4]. Regarding lighting and energy performance, many schools do not feature envelopes that could harvest daylight and improve comfort and energy efficiency. In the case of Chilean schools, previous research has reported a lack of indoor environmental quality in schools [5-7]. Some of these schools were built several decades ago and did not necessarily fulfill current standards or achieve current recommendations. Therefore, retrofitting existing schools has become urgent to reach indoor spaces that restore well-being and health.

2. METHODOLOGY

This study applied a set of data collection for diagnostic and prediction tools for evaluating retrofits for classrooms of a prototypical public school in Chile used as a study case. This typological classroom is still predominant in public schools in the country, built massively to one of the country's reforms in education in the 1960s. At the time, a government-private initiative (Sociedad Constructora de Establecimientos Educacionales in Spanish) created

systematic modular, prototypical, fast-built schools nationwide. These schools are now recognized for their historical significance because of their industrialized methods, but they must improve their performance to meet current standards [8].



Figure 1: View of the classroom used as a case study for a predominant prefabricated school from the 1960s.

The school is located in an urban area of Concepción, a coastal city (latitude 15ms) in the central-southern region of Chile (Lat. 36-49°, Long. 73°2'). It corresponds to a Mediterranean climate with winter rains and coastal influence Csb (1) [9]. Average hourly Global Horizontal and Direct Normal Illumination reaches 55 Klux and 49 Klux in summer (February), while 17 Klux and 11 Klux in winter (June), respectively. [10]

This study reports on a west-oriented classroom (Figure 1) with openings on two sides. The main

windows to the facade provide the classroom with daylight. In contrast, the other side, with smaller windows at the top of the interior wall, adjoins an interior corridor lit only by artificial light. Windows are single clear glass in an aluminum frame. Commonly, the classroom is used with cloth curtains in afternoons due to the intense western sun, as featured in Figure 1. At those times, six fluorescent light fixtures provide artificial light. Student desks are typically organized facing the front of the classroom; for that reason, measurements were taken on a grid of around a 2-meter distance determined during the pandemic.

Schools in Chile, as all non-residential buildings, lack updated indoor environmental quality (IEQ) standards and visual comfort requirements such as the international standards by IESNA [11]. The only code for schools dates from the 1980s [12]. When illuminance levels were defined as lower than the current standards described in Table 1.

Table 1: Reference threshold based on national codes and international standards

Metric	Value	Ref.
Illuminance	180 lux**	D5548 ¹
	300 lux (min)***	IES ²
Luminance ratio	3:1 task-adjacent surface	IES ²
	1:10 task to non-adjacent surface	IES ²
DF	2% to 5% minimum	LEED ⁴
SDA	>90%	CHPS ⁵
AAE:002-250	<10%	LEED ⁴

¹ IESNA code for school buildings; Decree 548-1980 [13]

² IESNA recommendations for educational facilities [11]

³ LEED v4.1 Daylight amenity performance, Option 1, Daylight Factor, DF

⁴ LEED v4.1 Daylight amenity performance, Option 1, Daylight Factor, DF

⁵ LEED v4.1 Daylight amenity performance, Option 1, Daylight Factor, DF

[15]. **In less favorable desks can be complemented by artificial light. ***a minimum in areas

This school is an excellent example of most schools in the country. It features single-glass windows and fluorescent light fixtures. The set of retrofits this study proposes are simple strategies that respond to limited educational investment capital, particularly in public schools.

2.1 Diagnostic of illuminance and luminance

The criteria for evaluating daylight and artificial light quality in the classroom interior focused on assessing illuminance and luminance. The first challenge was defining the dates intended to be as close to the solstices as possible. Still, the measurements had to be scheduled close to these dates, considering the school year and the occupancy, to avoid disruptions or shades. Additionally, sky conditions at this location fluctuate in all seasons, so several days of measurements were taken. We finally report measurements in clear-sky conditions for the school year's beginning (March 1–summer) and middle (June 27–winter).

Measurements were taken in three iterations: 1) curtains (open), artificial lights (on);

- 2) curtains (open), artificial lights (off), and
- 3) curtains (closed), artificial lights (on)

The availability of light and its distribution was assessed through illuminance -the amount of luminous flux (measured in lux) that a surface receives per unit area (1m²)- with high-precision equipment: a Li-cor 250-A photometer with an Li-210R photo sensor, in 10-second average measurements at the desk plane approximately 0.70m above the ground, as recommended in [11, 16, 17]. Before each iteration, outdoor illuminance levels were taken at the same height in a shaded

For visual comfort, the High Dynamic Range (HDR) imaging technique was used to identify glare areas and evaluate the luminance distribution according to various studies in the literature [18, 19] Using Photosphere software version 1.8.6U (2010). This technique captures several images at different shutter speeds while maintaining the same aperture (f-11). A full-frame, mirrorless Nikon Z5 camera and an 8mm (fish-eye) lens were used. Four views were taken, representing students and teachers' contexts.

2.2 Evaluation of retrofits

Retrofit strategies are evaluated throughout the Climate Studio plugin for Rhinoceros. The model represented the existing geometry and materiality as closely as possible to the current conditions of the classroom, both inside and outside. Albedo was considered a 0.2. A baseline, modeled with the current cloth curtains to be compared to the measurements. Once the closest representation was achieved, a new baseline eliminated curtains for the best analysis of the strategies to increase daylight while controlling discomfort due to glare.

Table 2: Passive Retrofit Strategies

#	Description
R1	Exterior vertical lamellas (80cm width @ 80cm) white aluminum
R2	Exterior vertical lamellas (80cm width @ 80cm) white aluminum
R3	R2 + Skylights (30cmx70cm) insulated clear glass

Three Retrofits were tested that could represent affordable and modular prefabricated solutions that could be built fast and with minor disruptions. Two of these (R1, R2) aiming to create external sun

protection, consisted of vertical lamellas in a perpendicular array to the facade. Skylights have been added (R3) to the best resulting from the previous ones, to increase daylight availability in identified inner areas of the classroom.

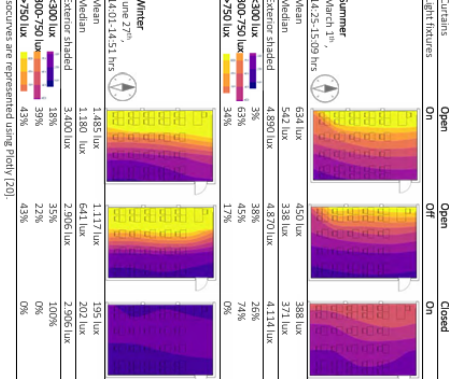
3. RESULTS FROM FIELD MEASUREMENTS

The measurements indicate that illuminance levels, distribution, and visual comfort due to glare are not achieved on summer and winter days.

3.1 Diagnostic for illuminance performance

Regarding illuminance levels and distributions (Table 2), the classroom had insufficient levels considering the Chilean code requirements. 180lux is not achieved in the interior desks only with daylight, which could be achieved by turning lights on as a complement. Nevertheless, 180lux is not achieved in winter when curtains are closed. As per international standards, the classroom reaches 300-750lux of its area in 45% (summer) and 22% (winter). Complemented with artificial light, those areas can increase to 63% (summer) and 39% (winter). However, areas following the facade are overlit by daylight or complemented with artificial light, reaching up to 43% in winter. On the other side, areas far from the facade are underlit with values <300 lux, which, in winter, corresponds to 20% of the area (lights on), reaching 43% of the area (lights off).

Table 3: Illuminance levels of the west-oriented classroom for (March 1st) and winter (June 27th).



3.2 Diagnostic for luminance performance

The study of luminance reveals higher luminance median values in summer than winter. However,

several sources of high-contrast are identified either season. High contrasts are revealed due to direct or reflected sun or the brightness of light fixtures, whether on a task-to-adjacent or task-to-non-adjacent surface.

As shown in Table 4, four views are illustrated (open curtains, lights on) with the corresponding ratios for winter and summer. Position of the occupant, either a child seated at the back of the room or a teacher in front are affected by high contrast due to direct and reflected sun in surfaces. Those ratios overpass the maximum recommended values of 3:1 (task : adjacent surface) and 1:10 (task : non-adjacent surface) referenced in Table 1.

In view a) a student is affected by the reflected light in the floor (1:22 in winter) and the light fixtures (ratio 1:140 in winter, 1:100 in summer).

In view b), high contrasts exist at the teacher's desk regarding to closer surfaces in the wall (14:1 in winter), and from the outside light (4.2:1 in summer). Light fixtures are one of the sources of high contrast as measured to one of the student's desks (ratio 1:106).

In view c), high contrast are present from the windows to the students desks (12:1 in winter and 13.5:1 in summer), and among surfaces in the view scope in light fixtures and the ceiling (218:1 winter) or with the whiteboard (50:1 in summer).

In view d), representing the teacher's workplace, ratios over 1,000:1 are given in planes close to the desk or from the exterior light to the screen.

4. RESULTS FROM SIMULATIONS

The retrofit strategies are compared to the baseline condition and addressed in field measurements for the sample winter day. A single strategy combination showed that illuminance levels improved in the classroom, allowing every desk at least the minimum 180lux required by the Chilean code. Table 5 illustrates the metric as retrofit options are performed. The solution, including the skylight (R3), allowed this classroom to fulfill performance metrics for international references. Incorporating these retrofit solutions, the classroom can achieve a median illuminance level of 314 lux (winter) y 627 lux (summer), achieving the minimum level recommended by IES for educational spaces. Also, the Daylight Factor resulting from R3 is the highest among the explored options, with a higher uniformity coefficient of 0.64. Despite the skylights, there are no significant changes in the Glare performance, showing few points for disturbing or intolerable glare. Combining strategies (for sun protection and top daylight) leads to better distribution to the inner part of the classroom. Regarding annual metrics, the classroom would perform a yearly average lux of 2,285lux, maintaining Daylighting autonomy of 100% while having an ASE of less than 10%.

Table 4: High Dynamic Range images processed with ratio information for four different views (iteration with open curtains and lights on). In circles, luminance values expressed in cd/m²

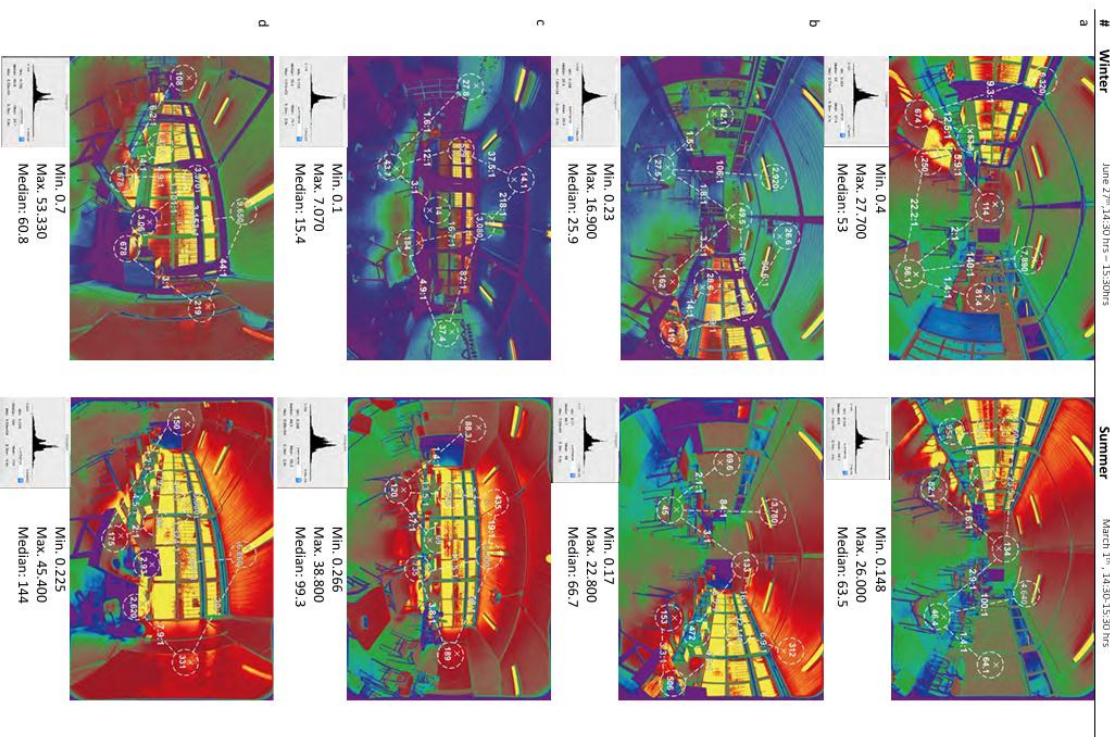
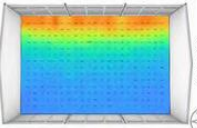
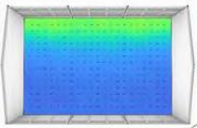
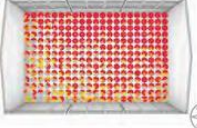
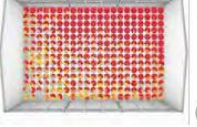
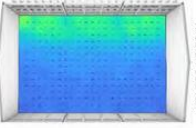
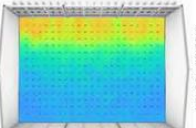
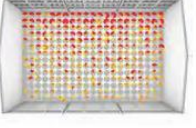
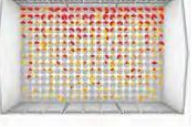
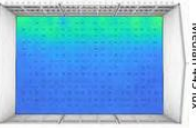
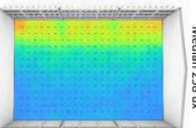
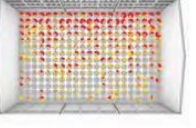
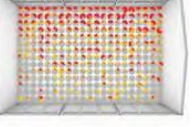
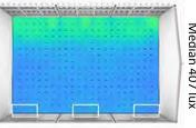
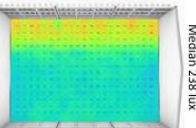
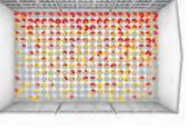
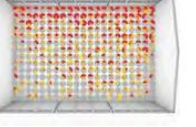


Table 5: Results of lighting and energy metrics of retrofit strategies. Illuminance (levels and distribution) and glare performance

Annual Performance Metrics	Summer Illuminance June 27 th 14:00 hrs	Winter Illuminance March 1 st 14:00 hrs	Summer Glare	Winter Glare
BASLINE Aver. lux: 3.342 Mean DF: 6.13% Min DF: 2.63% Median DF: 4.51% Uniformity: 0.43 SDA 100% ASE 30.3% SDG 98.13%	 Mean 922 lux Median 681 lux	 Mean 546 lux Median 400 lux		
R1 Aver. lux: 2.071 Mean DF: 3.6% Min DF: 1.64% Median DF: 2.89% Uniformity: 0.46 SDA 100% ASE 15.3% SDG 77.21%	 Mean 543 lux Median 445 lux	 Mean 321 lux Median 258 lux		
R2 Aver. lux: 1.938 Mean DF: 3.33% Min DF: 1.45% Median DF: 2.74% SDA 100% ASE 5.1% SDG 79%	 Mean 504 lux Median 407 lux	 Mean 299 lux Median 238 lux		
R3 Aver. lux: 2285 Mean DF: 4.11% Min DF: 2.63% Median DF: 3.47% Uniformity: 0.64 SDA 100% ASE 9.2% SDG 89.41%	 Mean 617 lux Median 627 lux	 Mean 367 lux Median 314 lux		

5. DISCUSSION

The case study classroom, currently does not comply with the minimum lighting requirements for a less stringent Chilean code. 180 lux are not achieved in winter when curtains are closed, which is a typical school setting due to the direct sun and low-performance envelopes (draft). Therefore, at those times, children are learning under deficient light conditions. The simple retrofits studied indicate that overfit could effectively be reduced by facade control. As a complement, upper light (skylights) effectively increases daylight availability to the underlit portion of the classroom.

Further exploration is needed for retrofits that improve the glare control. The study would also be complemented with solutions for improving the thermal envelope. The affordable effects of the studied retrofits must be explored further to understand decreased solar heat gains due to the sunshade proposed in this study. Considering that this school typology is still predominant in the country, the results of this study could be applied to schools with identically oriented pavilions. They could also be informative for east-oriented classrooms.

6. CONCLUSION

This paper evaluates retrofit strategies after addressing a diagnostic of an existing typological classroom. The classroom does not comply with the minimum lighting requirements by national code or international standards. The field data showed that illuminance levels were unevenly distributed, too high on student desks next to the facade and too low at the desks in the classroom's interior. With the intent of revealing the value of envelope retrofit to replace cloth curtains, the tested strategies fulfilled the performance metric used as reference thresholds. Measurement provides complex data for standard practices in classrooms in the country. One of these practices is operating the classroom with closed curtains and artificial light turned on despite the abundance of daylight. As observed, with little or no sun control, illuminance levels are highly high next to the window. It is important to note that illuminance levels measured for winter were performed earlier than those for summer. Therefore, the reported values in the diagnostic could be worse later in the afternoon, considering the regular school operation could be later in the afternoons. Further exploration is needed to simulate illuminance and luminance for summer conditions. Likewise, annual glare studies would be informative in predicting possible problems coming from the skylights. Nevertheless, retrofitting existing buildings contributes to achieving energy reduction goals in buildings that remain operative in the coming decades.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to Mrs. Marielena Muñoz, the school's Principal, and its community for gently facilitating our measurements. This study has been funded by the ANID grants 7417280057 and FONDECYT 11240683; FONDECYT 11221255, and FONDAE 1523A0004.

REFERENCES

- Heschong, L., *Visual Delight in Architecture*. Daylight, Vision, and View, 1st Edition ed., 2021, London: Routledge.
- Ludlow, A.M., *The Functions of windows in buildings*. Lighting Research & Technology, 1976, 8(2): p. 57-68.
- Hobby, R., *Myopia and daylight in schools: a neglected aspect of public health? Perspectives in Public Health*, 2015, 136(1): p. 50-55.
- Barrett, P., et al., *The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis*. Building and Environment, 2015, 89: p. 118-133.
- Armijo, G., C.J. Whitman, and R. Casali, *Post-occupancy evaluation of state schools in 5 climatic zones of Chile*. Gazi University Journal of Science, 2011, 24(2): p. 265-374.
- Rivera, M.I. and A. Kwok, *Thermal comfort and air quality in Chilean schools: perceptions of students and teachers*. In *Future of Prox: Applied Research as a Bridge Between Theory and Practice*. ARCC, ARCC, Editor, 2019.
- Trebblock, M., et al., *The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile*. Building and Environment, 2016, 114: p. 455-469.
- Martinez, A., M.I. Rivera, and P. Arragada, *Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Pretopical Public Schools in Chile*. In *RESILIENT CITY*. 2022, 2022, Architectural Research Centers Consortium, Miami, US.
- Sarricolea, P., M. Herrera-Osando, and O. Meseguer-Ruiz, *Climatic regionalisation of continental Chile*. Journal of Maps, 2017, 13(2): p. 66-73.
- Llgett, R. and M. Milne, *Climate Consultant*. 6.0, 2017.
- Illuminating Engineering Society, *Recommended Practice: Lighting Educational Facilities*. 2020, IES, New York.
- Ministerio de Educación, *Decreto 548*, 1989.
- Colaborante for High-Performance Schools, *National CHPS Criteria, Version 2.0, Criteria & Implementation Guide for New Construction & Major Renovation of School Buildings*, 2020.
- The US Green Building Council, *LEED rating system*, 2023 [cited 2023, August 14]. Available from: <https://www.usgbc.org/leed>.
- Instituto de Salud Pública de Chile, *Instrucción para la reducción de la irradiación luminosa en las figuras de fondo*. O.A.S. Organización, Editor, 2021, Santiago.
- ASHRAE, *Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings*, 2010.
- Peterson, C., et al., *Tutorial: Luminance Maps for Daylighting Studies from High Dynamic Range Photography*. LEUKOS, 2021, 17(2): p. 140-169.
- Jrjakubec, J., et al., *Accurate Measurement of Daylight Interior Scenes Using High Dynamic Range Photography*, 2016.
- Plechy, *Plotly Chart Studio*, 2023. Available from: <https://chart-studio.plotly.com/create?thickCanvas=1&id=>

Tabla A1: a) mediciones en terreno de iluminancia sala A con repisa de luz b) sala B sin repisa de luz.

distancia	1	2	3	4	5	
1	291	336	455	540	1000	pizarra
2	300		449	550	970	
3	295	358	455	550	500	cortina
4	293	358	460	560	1050	
5	290	361	470	560		
6	330	380	475	538	600	cortina
7	305	354	464	545	1100	
8	197		420	535		
9						
fondo						

b)

distancia	1	2	3	4	5	
1	76					
2	100	115	180	478	866	
3	99	136	200	297		cortina
4	92	124	176	500	965	
5	95	140	230	430	686	
6	107	150	228	380	622	cortina
7	120	138	246	565	955	
8	66	102	208	357		cortina
9						
fondo						

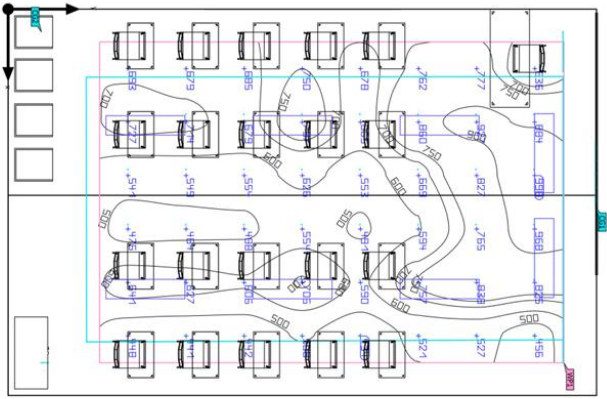
Anexo B. Resultados de Simulación.

Documento 4: Resultados de simulación de sistema de iluminación sala A.

Project

sala - Storey 1 - sala mod (luminarias)

Summary



Ground area	53.10 m ²	Clearance height	3.271 m
Reflection factors	Ceiling: 75.5 % Walls: 47.6 % Floor: 7.0 %	Mounting height	2.400 m
Maintenance factor	0.80 (fixed)	Height, working plane	0.800 m
		Wall zone working plane	0.500 m

DIALUX

Project

sala - Storey 1 - sala mod (luminarias)

Summary

Results

Symbol	Calculated	Target	Check	Index
Daylight factor	0.991 %	-		DF1
Working plane	Perpendicular	≥ 500 lx	✓	WP1
	U ₀ (g)	≥ 0.60	✓	WP1
Lighting power density	9.43 W/m ²	-		
	1.44 W/m ² /100 lx	-		
Energy estimation ⁽¹⁾	Consumption [262 - 436] kWh/a	max. 1900 kWh/a	✓	
Space	Lighting power density	6.18 W/m ²	-	
		0.94 W/m ² /100 lx	-	

(1) Based on a rectangular space of 9.000 m x 5.900 m and SFR of 0.25.
 (2) Calculated using DNI: 18899.4.
 Utilization profile: Educational premises - Educational buildings (44.1 Classroom - general activities)
 Notes on planning:
 Daylight proportion for Overcast Sky on 12.06.2024 at 12:00 (UTC-04:00 Santiago). The ambient conditions for "sala mod" are clean.

Luminaire list

pcs.	Manufacturer	Article No.	Article name	Rug	P	Ø	Luminous efficacy
8	PABAGON	PUPD4U3	Panel Backlit Light PUPD Series 40W 3000K	-	41.0 W	3842 lm	93.7 lm/W
0		IP30					

DIALUX

Project

Project

sala - Storey 1 - sala mod

sala - Storey 1 - sala mod

Luminaire layout plan

Luminaire list



Φtotal 30728 lm	Psal 328.0 W	Luminous efficacy 93.7 lm/W
--------------------	-----------------	--------------------------------

Manufacturer	PARAGON	P	41.0 W	Φ	3842 lm	Luminous efficacy
--------------	---------	---	--------	---	---------	-------------------

Article No.	PLPD40L30	Φluminaire	3842 lm
-------------	-----------	------------	---------

Article name	Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30
--------------	---

Fitting	1x Panel Light PLPD40L30
---------	-----------------------------

pcs.	Manufacturer	Article No.	Article name	P	Φ	Luminous efficacy
8	PARAGON	PLPD40L30	Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30	41.0 W	3842 lm	93.7 lm/W

6 X Paragon Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30

Type	Field Arrangement	X	Y	Mounting height	Luminaire
1st luminaire (W/V/Z)	1.775 m / 2.100 m / 2.400 m	1.775 m	6.600 m	2.400 m	3
X direction	2 pcs, Centre - centre, Distances not equal	4.275 m	6.600 m	2.400 m	4
Y direction	3 pcs, Centre - centre, Distances not equal	1.775 m	4.350 m	2.400 m	5
Arrangement	A1	4.275 m	4.350 m	2.400 m	6
		1.775 m	2.100 m	2.400 m	7
		4.275 m	2.100 m	2.400 m	8

Individual luminaires

X	Y	Mounting height	Luminaire
2.200 m	8.200 m	2.400 m	1
3.800 m	8.200 m	2.400 m	2

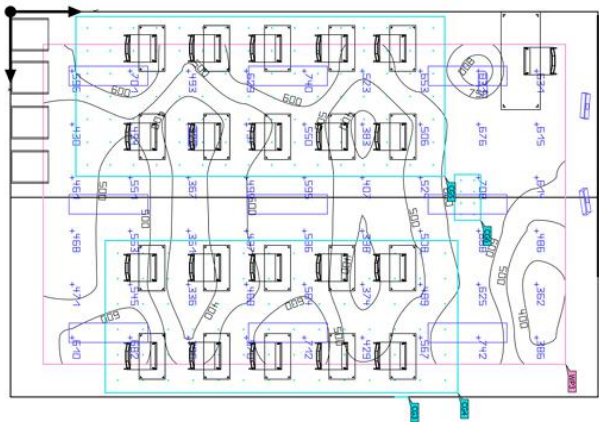
sala - Storey 1 - sala mod (luminarias)

sala - Storey 1 - sala original (luminarias)

Calculation objects

Summary

superficie ugr (RUG)



Ground area	53,10 m ²	Clearance height	2,841 m - 3,271 m
Reflection factors	Ceiling: 10,1 %	Mounting height	2,286 m - 2,300 m
	Walls: 26,4 %		0,800 m
	Floor: 7,0 %		0,500 m
Maintenance factor	0,80 (fixed)	Wall zone mounting game	0,500 m

sala - Storey 1 - sala original (luminarias)

Summary

Results

Symbol	Calculated	Target	Check	Index
Daylight factor	D 0.520 %	-		D33
Working plane	Equivalent	534 lx	≥ 500 lx	WP3
	U _a (g)	0.62	≥ 0.60	WP3
Lighting power density		11.49 W/m ²	-	
		2.15 W/m ² /100 lx	-	
Glare evaluation ⁽¹⁾	R _{glc,max}	21	≤ 19	X
Energy estimation ⁽²⁾	Consumption	[360 - 599] kWh/a	max. 1900 kWh/a	✓
Space	Lighting power density	8.48 W/m ²	-	
		1.59 W/m ² /100 lx	-	

(1) Based on a rectangular space of 9.000 m x 5.900 m and SHR of 0.25.
(2) Calculated using DIN 18519-4

Utilisation profile: Educational premises - Educational buildings (441 Classroom - general activities)

Notes on diagrams:
Daylight proportion for Overcast Sky on 12.06.2024 at 12:00 (UTC-04:00 Santiago) - The ambient conditions for "sala original" are clear.

Luminaire list

pcs.	Manufacturer	Article No.	Article name	Rate	P	Φ	Luminous efficacy
9	PARAGON	PLPD40L/3 0	Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30	-	41.0 W	3842 lm	93.7 lm/W
2	Philips	ST1332T1- f49b265c- e971- 42b5- 42b3- 03a35db5 1993	ST1332X Z0S-PC930 PSU HWB FG	21	40.7 W	4781 lm	117.5 lm/W

sala - Storey 1 - sala original
Luminaire layout plan

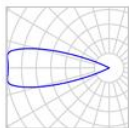


Manufacturer	PARAGON	P	41.0 W
Article No.	PLPD40L/30	Φ	3842 lm
Article name	Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30		
Fitting	1x Panel Light PLPD40L/30		

9 x Paragon Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30

Type	Field Arrangement	X	Y	Mounting height	Luminaire
1st luminaire (X/Y/Z)	0.983 m / 1.500 m / 2.300 m	0.983 m	7.000 m	2.300 m	3
Xdirection	3 fcs. Centre - centre. Distances not equal	2.950 m	7.000 m	2.300 m	4
Ydirection	3 fcs. Centre - centre. Distances not equal	4.917 m	7.000 m	2.300 m	5
Arrangement	A1	0.983 m	4.250 m	2.300 m	6
		2.950 m	4.250 m	2.300 m	7
		4.917 m	4.250 m	2.300 m	8
		0.983 m	1.500 m	2.300 m	9
		2.950 m	1.500 m	2.300 m	10
		4.917 m	1.500 m	2.300 m	11

sala - Storey 1 - sala original
Luminaire layout plan



Manufacturer	Philips	P	40.7 W
Article No.	ST3321L49BZ65C-6971-a2b5-a2ba-03a35db51993	ΦLuminaire	4781 mm
Article name	ST332X2 20S/PC930 PSU HMB FG		
Fitting	1 x 20S/PC930		

Individual luminaires

X	Y	Mounting height	Luminaire
1.431 m	8.767 m	2.286 m	1
2.931 m	8.767 m	2.286 m	2

sala - Storey 1 - sala original
Luminaire list

Φtotal	44131 mm	Ptotal	450.4 W	Luminous efficacy	98.0 lm/W
--------	----------	--------	---------	-------------------	-----------

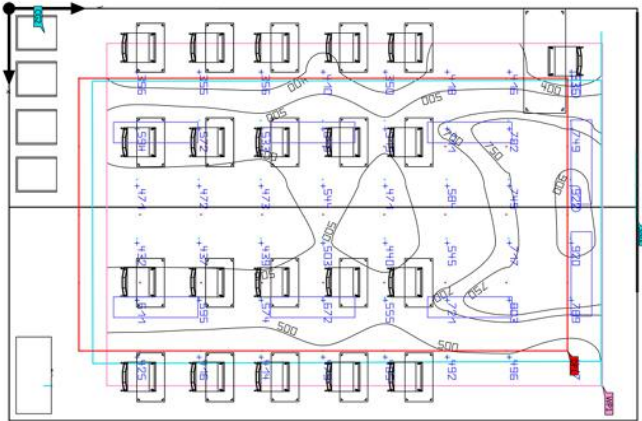
pcs.	Manufacturer	Article No.	Article name	P	Φ	Luminous efficacy
9	PARRAGON	PLPD40L3	Panel Back-lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30	41.0 W	3842 mm	93.7 lm/W
2	Philips	ST3321L-6971-a2b5-a2ba-03a35db51993	ST332X2 20S/PC930 PSU HMB FG	40.7 W	4781 mm	117.5 lm/W

Documento 6: Resultados simulación diseño sala A. Simulado en base al día 12-07-2024 a las 18hrs.

Project

sala - Storey 1 - sala mod (Light scene 1)

Summary



Ground area	53.10 m ²	Clearance height	3.271 m
Reflection factors	Ceiling: 76.5 % Walls: 47.6 % Floor: 7.0 %	Mounting height	2.400 m
Maintenance factor	0.80 (fixed)	Height working plane	0.800 m
		Wall zone working plane	0.500 m

DIALUX

Project

sala - Storey 1 - sala mod (Light scene 1)

Summary

Results

Symbol	Calculated	Target	Check	Index
Daylight factor	0.991 %	-		[Def]
Working plane	Expenditure	543 lx	≥ 500 lx	[WPI]
	U _a (g)	0.62	≥ 0.60	[WPI]
Lighting power density		9.43 W/m ²	-	
		1.74 W/m ² /100 lx	-	
Energy estimation ⁽¹⁾	Consumption	[262 - 436] kWh/a	max. 1900 kWh/a	[✓]
	Space	Lighting power density	6.18 W/m ²	
			1.14 W/m ² /100 lx	

(1) Based on a rectangular space of 9.000 m x 5.900 m and 51% of D25.
(2) Calculated using data 16/9/24.

Utilisation profile: Educational premises - Educational buildings (4.1 Classroom - general activities)

Notes on planning: Daylight proportion for Overcast Sky on 12-07-2024 at 18:00 (UTC-04:00 Santiago). The ambient conditions for "sala mod" are clean.

Luminaire list

pcs.	Manufacturer	Article No.	Article name	Rate	P	Φ	Luminous efficacy
8	PARAGON	PLPD0L03 0	Panel Back-Lit Light PLPD Series 40W 3000K IP30	-	41.0 W	3842 lm	93.7 lm/W

DIALUX

Anexo C. Esquemas de Conexión y Documentos de sistema de iluminación.

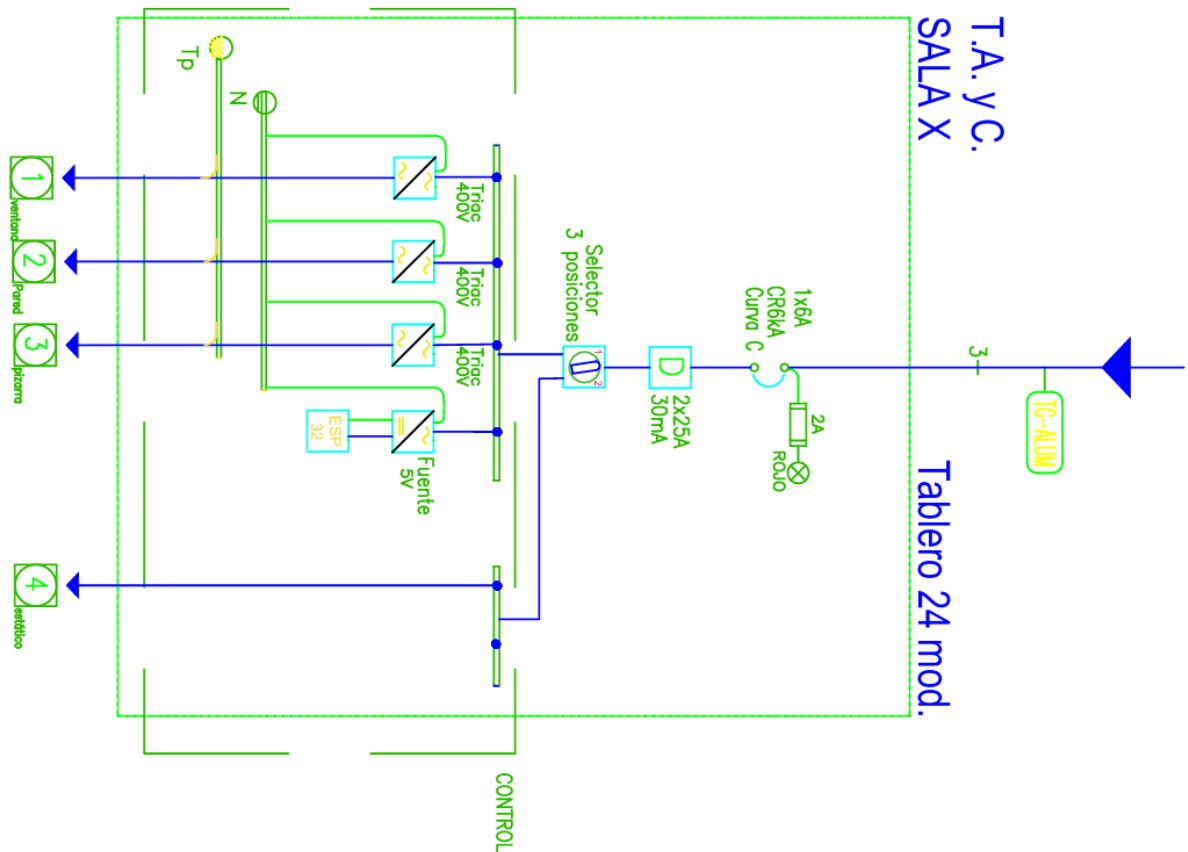


Fig. C1: Diagrama unilineal de sistema de tablero de alumbrado y control.

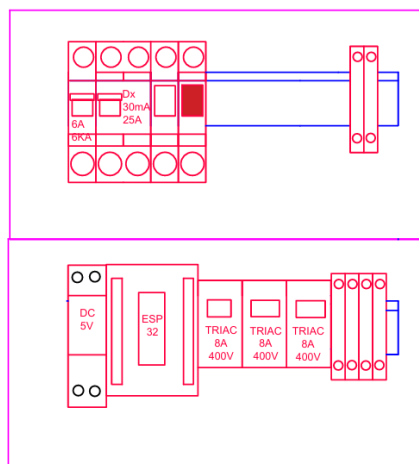


Fig. C2: Diseño de tablero de 24 módulos, parte superior potencia y parte inferior control.

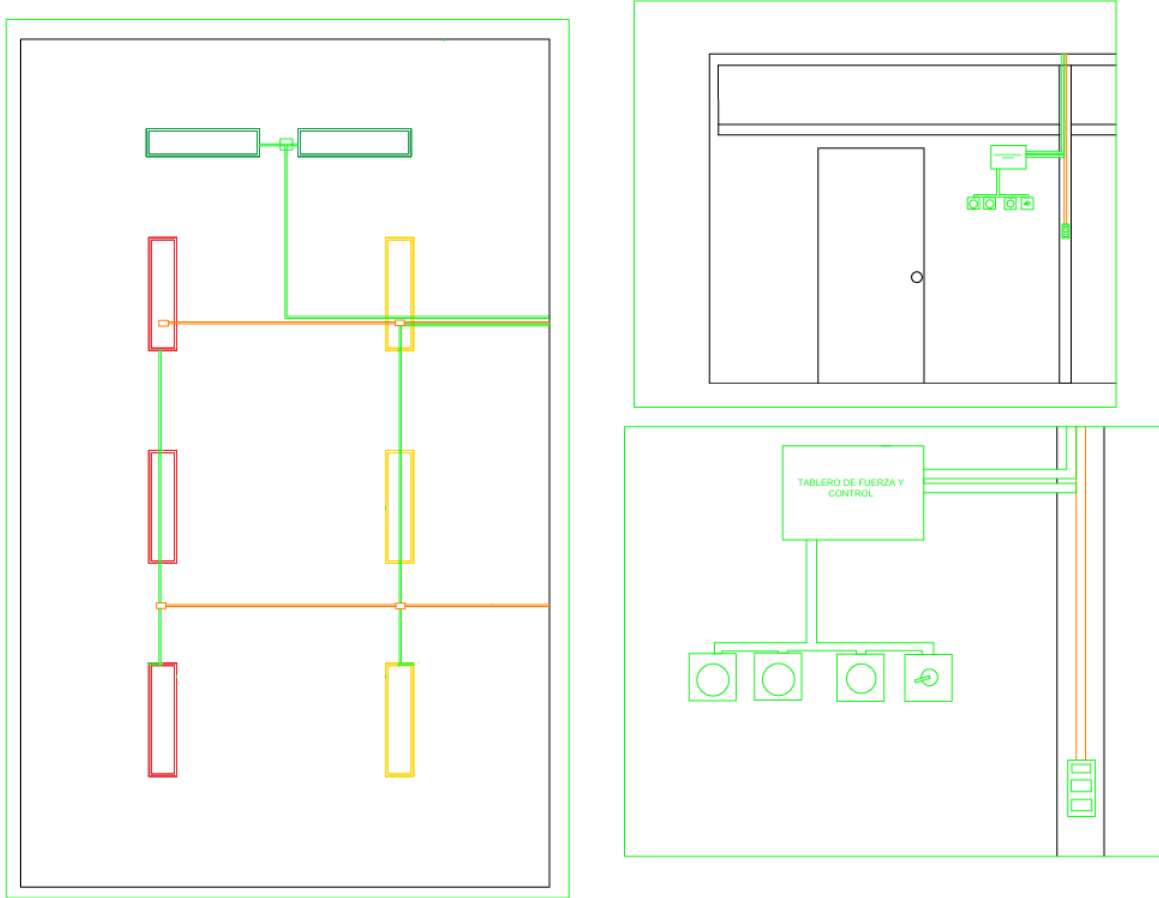


Fig. C4: Plano de canalizaciones sala A escuela Colonia Árabe.

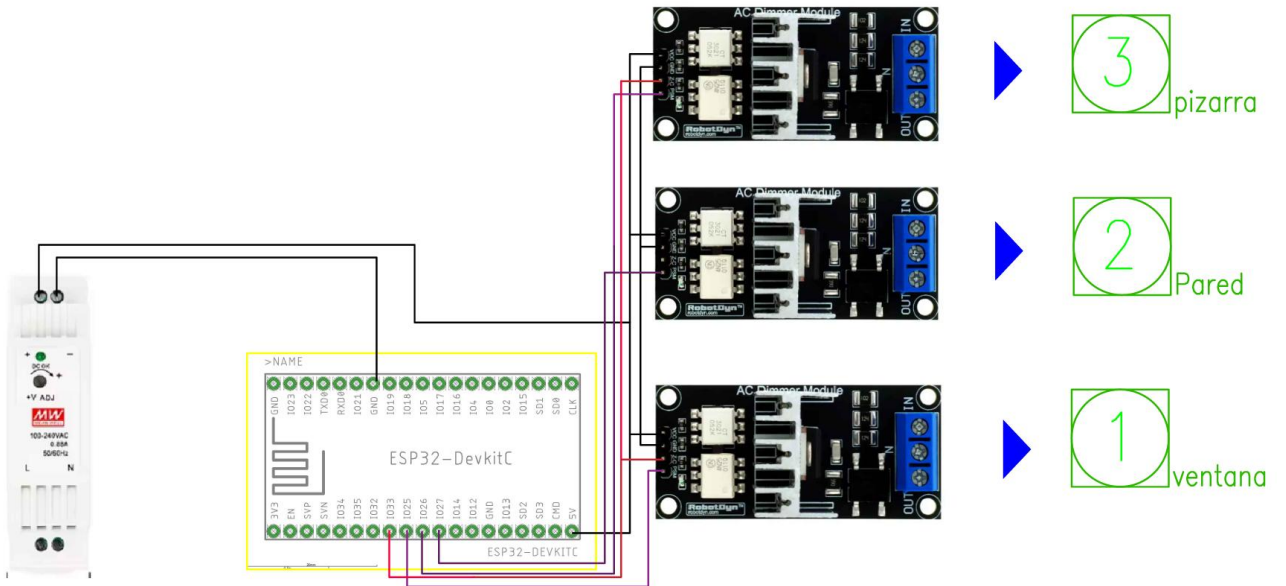


Fig. C5: Esquema de conexión sistema de control ubicado en tablero del aula A en escuela Colonia Árabe.

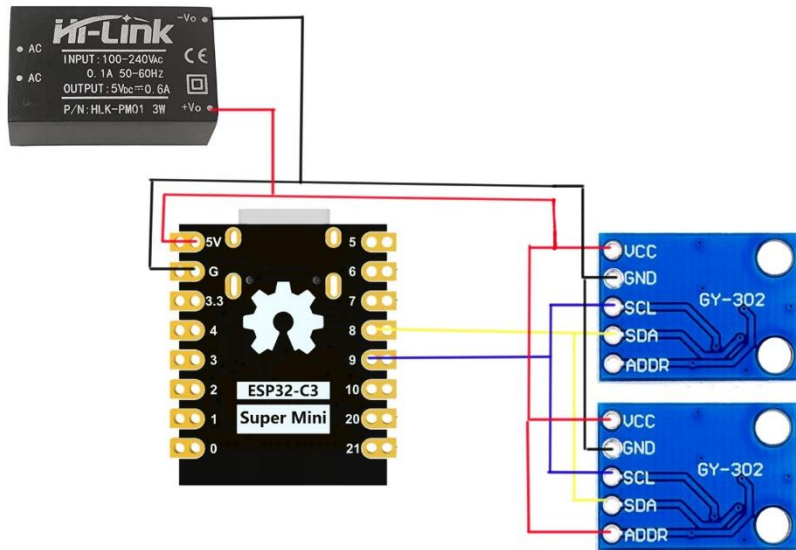


Fig. C6: Esquema de conexión sensores de iluminancia ubicados en escuela Colonia Árabe.

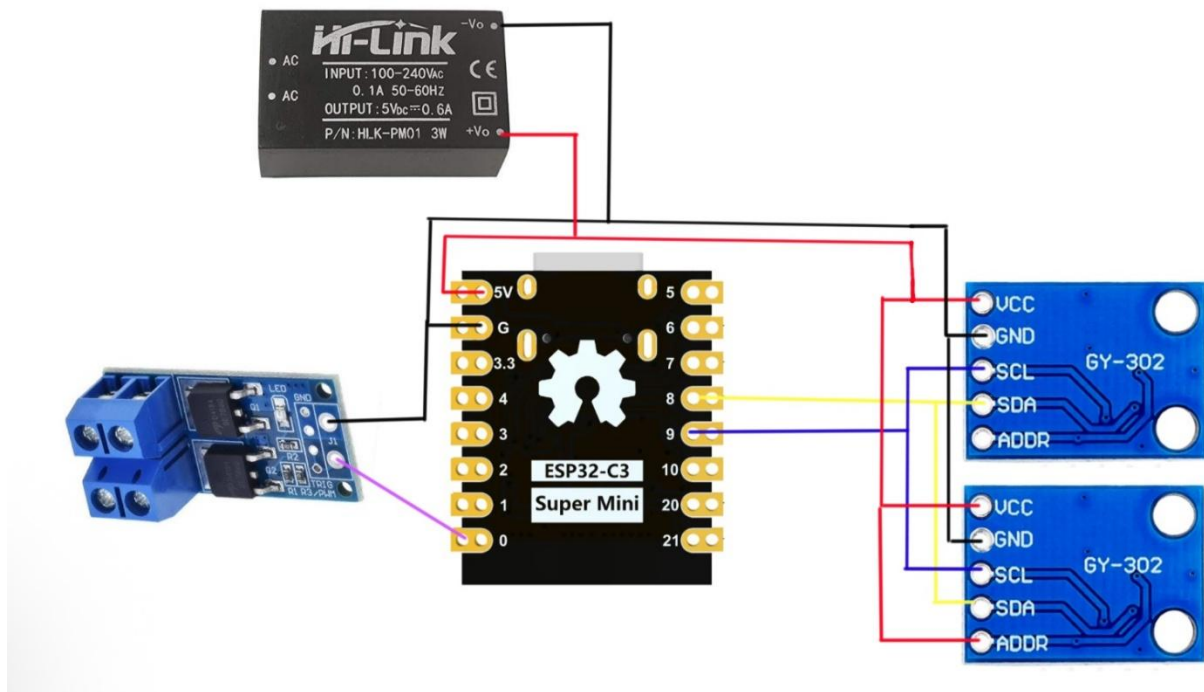


Fig. C7: Esquema de conexión sensores y actuador prototipo 2.

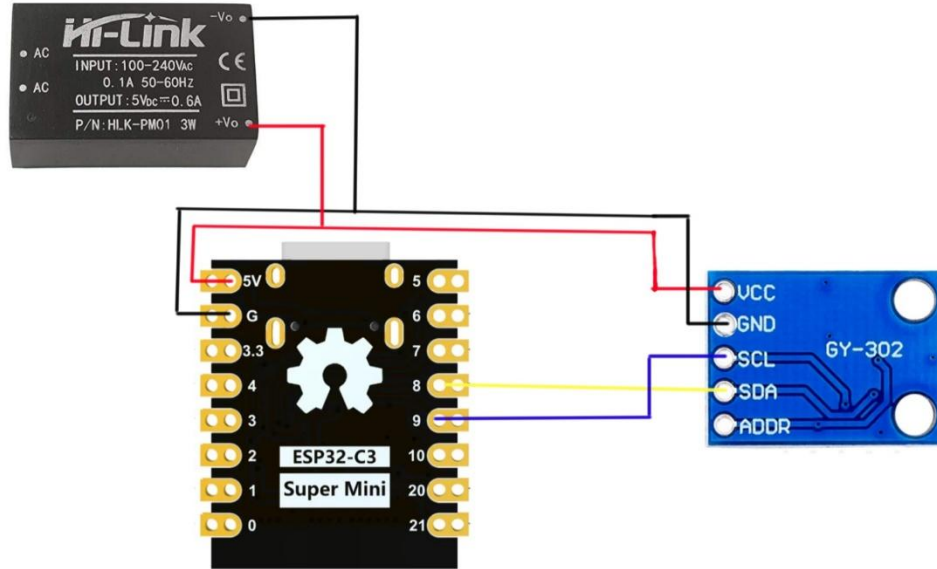


Fig. C7: Esquema de conexión Sensor de iluminancia prototipo 1.

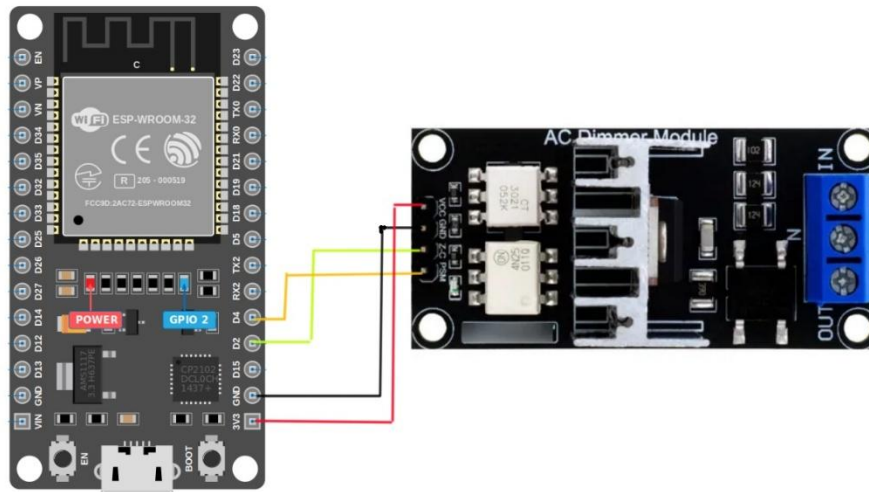


Fig. C8: Esquema de conexión de Actuador módulo AC dimmer prototipo 1.

Anexo D: Códigos.

Código 1: receptor y actuador prototipo 1

```

RECEPTOR-pruebaDIMMER-GOOGLE.ino
1
2 //ID IMPLEMENTACION
3 //AKfycbx6nXU0u5IeU_EM6_cJxm06D1WhatxPU9Ba3J35Uysbee4ae42Jb5z3T8cUK198svH_
4 // URL
5 //https://script.google.com/macros/s/AKfycbx6nXU0u5IeU_EM6_cJxm06D1WhatxPU9Ba3J35Uysbee4ae42Jb5z3T8cUK198svH_/exec
6 //==WiFi definitions==
7 #include <HttpClient.h>
8 #include <esp_now.h>
9 #include <WiFi.h>
10 #include <RBDdimmer.h>
11
12 #define outputPin 4
13 #define zerocross 2 // for boards with CHANGEABLE input pins
14
15
16 // Replace with your network credentials (STATION)
17 const char* ssid = "wifitelsur_ERIKA";
18 const char* password = "truchas123456789";
19 const char* serverName = "https://script.google.com/macros/s/AKfycbx6nXU0u5IeU_EM6_cJxm06D1WhatxPU9Ba3J35Uysbee4ae42Jb5z3T8cUK198svH_/exec";
20
21 unsigned long timeRead = 0;
22 int espera = 5000;
23 float lux = 0.0;
24
25 dimmerLamp dimmer(outputPin, zerocross);
26
27 // Structure example to receive data
28 // Must match the sender structure
29 typedef struct struct_message {
30     int id;
31     float lux;
32 } struct_message;
33
34
35 struct_message receivedData;
RECEPTOR-pruebaDIMMER-GOOGLE.ino
34
35 struct_message receivedData;
36
37 // callback function that will be executed when data is received
38 void onDataRecv(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t *incomingData, int len) {
39     // Copiamos la dirección MAC a un array local para evitar problemas
40     uint8_t mac[6];
41     memcpy(mac, mac_addr, 6);
42
43     memcpy(&receivedData, incomingData, sizeof(receivedData));
44     Serial.print("Luz recibida de: ");
45     for (int i = 0; i < 6; i++) {
46         Serial.print(mac[i], HEX);
47         if (i < 5) Serial.print(":");
48     }
49     Serial.println(" - ");
50     Serial.print(receivedData.lux);
51     Serial.println(" lux");
52
53 // Controlar LED (brillo inverso a la luz)
54 int brightness = map(receivedData.lux, 0, 600, 100, 0); // Mapear 0-1000 lux a 100%-0% brillo
55 brightness = constrain(brightness, 0, 100); // Asegurar que está dentro del rango
56 dimmer.setPower(brightness); // name.setPower(0%-100%)
57
58 }
59
60 void setup() {
61     // Initialize Serial Monitor
62     Serial.begin(115200);
63     //inicia el dimmer
64     dimmer.begin(NORMAL_MODE, ON); //dimmer initialisation: name.begin(MODE, STATE)
65
66 // Set the device as a Station and Soft Access Point simultaneously
67 WiFi.mode(WIFI_AP_STA);
68

```

```

69
70 // Set device as a Wi-Fi Station
71 WiFi.begin(ssid, password);
72 while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
73   delay(1000);
74   Serial.println("Setting as a Wi-Fi Station..");
75 }
76 Serial.print("Station IP Address: ");
77 Serial.println(WiFi.localIP());
78 Serial.print("Wi-Fi Channel: ");
79 Serial.println(WiFi.channel());
80
81 // Init ESP-NOW
82 if (esp_now_init() != ESP_OK) {
83   Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
84   return;
85 }
86 // Once ESPNow is successfully Init, we will register for recv CB to
87 // get recv packer info
88 esp_now_register_recv_cb(esp_now_recv_cb_t(OnDataRecv));
89
90 }
91
92 void loop() {
93   if (millis() > espera + timeRead){
94     lux = receivedData.lux ; //se obtienen los datos del sensor
95     timeRead = millis();
96     sendToGoogleSheet();
97   }
98 }
99 void sendToGoogleSheet() {
100   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
101     HTTPClient http;
102     http.begin(serverName);
103     http.addHeader("Content-Type", "application/json");
104
105     String jsonData = "{\"lux\":\"" + String(lux) + "\"}";
106
107     int httpResponseCode = http.POST(jsonData);
108
109     if (httpResponseCode > 0) {
110       String response = http.getString();
111       Serial.println(httpResponseCode);
112       Serial.println(response);
113     } else {
114       Serial.print("Wrong request POST: ");
115       Serial.println(httpResponseCode);
116     }
117
118     http.end();
119   }
120 }
121

```

Código 2: emisor y sensor prototipo 1.

```

emisor_prueba_now_wifi.ino
1 |
2 | #include <esp_now.h>
3 | #include <esp_wifi.h>
4 | #include <WiFi.h>
5 | #include "BH1750FVI.h"
6 |
7 | BH1750FVI myLux(0x23);
8 |
9 | // Set your Board ID (ESP32 Sender #1 = BOARD_ID 1, ESP32 Sender #2 = BOARD_ID 2, etc)
10 | #define BOARD_ID 1
11 |
12 | //MAC Address of the receiver
13 | uint8_t broadcastAddress[] = {0x84, 0xCC, 0xA8, 0x7E, 0xC8, 0xF4};
14 |
15 | //Structure example to send data
16 | //Must match the receiver structure
17 | typedef struct struct_message {
18 |     int id;
19 |     float lux;
20 | } struct_message;
21 |
22 |
23 | esp_now_peer_info_t peerInfo;
24 |
25 | //Create a struct_message called myData
26 | struct_message myData;
27 |
28 | unsigned long previousMillis = 0; // Stores last time temperature was published
29 | const long interval = 1000; // Interval at which to publish sensor readings
30 |
31 | unsigned int readingId = 0;
32 |
33 | // Insert your SSID
34 | constexpr char WIFI_SSID[] = "wifitelsur_ERIKA";
35 |
36 | int32_t getWifiChannel(const char *ssid) {
37 |     if (int32_t n = WiFi.scanNetworks()) {
38 |         for (uint8_t i=0; i<n; i++) {
39 |             if (!strcmp(ssid, WiFi.SSID(i).c_str())) {
40 |                 return WiFi.channel(i);
41 |             }
42 |         }
43 |     }
44 |     return 0;
45 | }
46 | // callback when data is sent
47 | void onDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
48 |     Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
49 |     Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery Fail");
50 | }
51 |
52 | void setup() {
53 |     //Init Serial Monitor
54 |     Serial.begin(115200);
55 |
56 |     Wire.begin(); // activar el i2c
57 |
58 |     myLux.powerOn(); // se prende el sensor
59 |     myLux.setContHighRes(); // se configura el sensor
60 |
61 |     // Set device as a Wi-Fi Station and set channel
62 |     WiFi.mode(WIFI_STA);
63 |

```

```

63
64 int32_t channel = getWiFiChannel(WIFI_SSID);
65
66 WiFi.printDiag(Serial); // Uncomment to verify channel number before
67 esp_wifi_set_promiscuous(true);
68 esp_wifi_set_channel(channel, WIFI_SECOND_CHAN_NONE);
69 esp_wifi_set_promiscuous(false);
70 WiFi.printDiag(Serial); // Uncomment to verify channel change after
71
72 // Init ESP-NOW
73 if (esp_now_init() != ESP_OK) {
74     Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
75     return;
76 }
77
78 // Once ESPNow is successfully Init, we will register for Send CB to
79 // get the status of Transmitted packet
80 esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
81
82 // Register peer
83 memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
84 peerInfo.encrypt = false;
85
86 // Add peer
87 if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK){
88     Serial.println("falla en enlace peer");
89     return;
90 }
91 }
92
93 void loop(){
94     unsigned long currentMillis = millis();
95     if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
96         // Save the last time a new reading was published
97         previousMillis = currentMillis;
98         //Set values to send
99         myData.id = BOARD_ID;
100        myData.lux = myLux.getLux();
101        Serial.print("lux: ");
102        Serial.print(myData.lux);
103
104        //Send message via ESP-NOW
105        esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
106        if (result == ESP_OK) {
107            Serial.println("Sent with success");
108        }
109        else {
110            Serial.println("Error sending the data");
111        }
112    }
113 }
114

```

Código 3: sensor y actuador prototipo 2.

```

PROTOTIPO_PWMconControl.ino
1  #include <esp_now.h>
2  #include <esp_wifi.h>
3  #include <WiFi.h>
4  #include "BH1750FVI.h"
5
6  BH1750FVI trabajo(0x23);
7  BH1750FVI ventana(0x5C);
8
9  // Set your Board ID (ESP32 Sender #1 = BOARD_ID 1, ESP32 Sender #2 = BOARD_ID 2, etc)
10 #define BOARD_ID 1
11
12 //MAC Address of the receiver
13 uint8_t broadcastAddress[] = {0xFC,0xB4,0x67,0x67,0xAC,0x00};
14
15 //Structure example to send data
16 //Must match the receiver structure
17 typedef struct struct_message {
18     int id;
19     float luz_trabajo;
20     float luz_ventana;
21     String funcion;
22     char set_point;
23 } struct_message;
24
25
26 esp_now_peer_info_t peerInfo;
27
28 //Create a struct_message called myData
29 struct_message myData;
30
31 struct_message recvData;
32
33 //variables de uso
34 String estado;
35 char OP;
36
37 // callback function that will be executed when data is received
38 void OnDataRecv(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t *incomingData, int len) {
39     // Copiamos la dirección MAC a un array local para evitar problemas
40     uint8_t mac[6];
41     memcpy(mac, mac_addr, 6);
42
43     memcpy(&recvData, incomingData, sizeof(recvData));
44     Serial.print("Estado recibido de: ");
45     for (int i = 0; i < 6; i++) {
46         Serial.print(mac[i], HEX);
47         if (i < 5) Serial.print(":");
48     }
49     Serial.println(" - ");
50     Serial.println(recvData.funcion);
51     Serial.println(recvData.set_point);
52 }
53
54
55 unsigned long previousMillis = 0; // Stores last time temperature was published
56 const long interval = 10*1000; // Interval at which to publish sensor readings
57 unsigned long previousMillis1 = 0;
58 unsigned int readingId = 0;
59
60 // Insert your SSID
61 constexpr char WIFI_SSID[] = "Lab Sep";
62
63 int32_t getWiFiChannel(const char *ssid) {
64     if (int32_t n = WiFi.scanNetworks()) {
65         for (uint8_t i=0; i<n; i++) {
66             if (!strcmp(ssid, WiFi.SSID(i).c_str())) {
67                 return WiFi.channel(i);
68             }
69         }
70     }
71     return 0;
72 }
73
74 // callback when data is sent
75 void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
76     Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
77     Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery Fail");
78 }
79
80 const int PWM = 1; // Pin GPIO1
81 const int Freq = 800; // Frecuencia PWM deseada (800Hz)
82 const int Resolution = 8; // Resolución de 8 bits (valores de 0 a 255)

```

```

83 float mesa = 0.0;
84 float exterior = 0.0;
85
86 // Parámetros del sistema
87 float TARGET_LUX = 500.0; // Nivel deseado en plano de trabajo
88 const float MIN_PWM = 20.0; // Mínimo PWM para evitar parpadeo (10%)
89 const float MAX_PWM = 255.0; // Máximo PWM (100%)
90 const float COMPENSATION_FACTOR = 1; // Factor de compensación empírico
91 const float SENSOR_DISTANCE = 0.05; // 0.05 metros
92 const float WORK_DISTANCE = 0.2; // 1.1 metros para obtencion de plano de trabajo a 0.8 metros
93
94 // Variables de control
95 float error_integral = 0;
96 unsigned long last_control_time = 0;
97 const int CONTROL_INTERVAL = 1000; // Intervalo de control (ms)
98
99 void setup() {
100 //Init Serial Monitor
101 Serial.begin(115200);
102
103 Wire.begin(); // activar el i2c
104
105 trabajo.powerOn(); // se prende el sensor
106 trabajo.setContHighRes(); // se configura el sensor
107
108 ventana.powerOn(); // se prende el sensor
109 ventana.setContHighRes(); // se configura el sensor
110
111 // Set device as a Wi-Fi Station and set channel
112 WiFi.mode(WIFI_STA);
113
114 int32_t channel = getWiFiChannel(WIFI_SSID);
115
116 WiFi.printDiag(Serial); // Uncomment to verify channel number before
117 esp_wifi_set_promiscuous(true);
118 esp_wifi_set_channel(channel, WIFI_SECOND_CHAN_NONE);
119 esp_wifi_set_promiscuous(false);
120 WiFi.printDiag(Serial); // Uncomment to verify channel change after
121
122 // Init ESP-NOW
123 if (esp_now_init() != ESP_OK) {
124 | Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
125 | return;
126 | }
127
128 // Once ESPNow is successfully Init, we will register for Send CB to
129 // get the status of Trasmitted packet
130 esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
131
132 esp_now_register_recv_cb(esp_now_recv_cb_t(OnDataRecv));
133
134 // Register peer
135 memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
136 peerInfo.encrypt = false;
137
138 // Add peer
139 if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK){
140 | Serial.println("falla en enlace peer");
141 | return;
142 | }
143 ledcSetup(0, Freq, Resolution); // Canal 0, 500Hz, 8 bits
144 ledcAttachPin(PWM, 0); // Asignar el pin al canal PWM
145 ledcWrite(0, MAX_PWM);
146 delay(10*1000);
147 recvData.funcion = "on";
148 }
149
150 void loop(){
151 unsigned long currentMillis = millis();
152 if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
153 | // Save the last time a new reading was published
154 | previousMillis = currentMillis;
155 | //Set values to send
156 | myData.id = BOARD_ID;
157 | myData.luz_trabajo = trabajo.getLux();
158 | myData.luz_ventana = ventana.getLux();
159 | myData.funcion = estado;
160 | myData.set_point = OP;
161
162 | Serial.print("Iluminacion vertical: ");

```

```

163 Serial.print(myData.luz_trabajo);
164 Serial.print("Iluminacion horizontal: ");
165 Serial.print(myData.luz_ventana);
166
167 //Send message via ESP-NOW
168 esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
169 if (result == ESP_OK) {
170     Serial.println("Sent with success");
171 }
172 else {
173     Serial.println("Error sending the data");
174 }
175 }
176
177 if (currentMillis - previousMillis1 >= 1000) {
178     previousMillis1 = millis();
179
180     estado = recvData.funcion;
181     OP = recvData.set_point;
182
183     if (OP == 'A'){
184         TARGET_LUX = 300;
185     }
186     else {
187         TARGET_LUX = 500;
188     }
189     mesa = trabajo.getLux();
190     mesa = mesa * COMPENSATION_FACTOR;
191     exterior = ventana.getLux();
192     // 2. Convertir a lux a 0.8m usando ley inversa del cuadrado
193     float lux_at_workplane = mesa * pow(SENSOR_DISTANCE/WORK_DISTANCE, 2);
194
195     float error = TARGET_LUX - lux_at_workplane - (exterior) * 0.4;
196     error_integral += error * 0.05; // Término integral
197     error_integral = constrain(error_integral, -100, 100); //anti windup
198     float pwm = 127.5 + (error * 0.35 ) + error_integral;
199     float new_pwm = constrain(pwm , MIN_PWM, MAX_PWM); // 127.5 es el punto medio (50%)
200     if (estado == "off"){
201         ledcWrite(0, 0);
202         Serial.println(" apagado");
203     }
204     else if (pwm < 20 ){
205         ledcWrite(0, MIN_PWM) ;
206     }
207     else if (exterior < 50){
208         ledcWrite(0, 252);
209         Serial.println(" noche ");
210     }
211     else {
212         ledcWrite(0, new_pwm);
213         Serial.print(new_pwm);
214         Serial.println(" ciclo");
215         float luz_total = lux_at_workplane - exterior * 0.3;
216         Serial.print(luz_total);
217         Serial.println(" prediccion");
218     }
219 }
220
221 }
222

```

Código 4: receptor prototipo 2

prototipo_receptorPWM.ino

```

1 // URL
2 //https://script.google.com/macros/s/AKfycbyPoUcEymvPA4rjF9UZSA7ynvxsBUNOTUz2t0EIJ_JMeOoDcnbe3yjU8gi8f4tCQ27gQw/exec
3 //---WiFi definitions---
4 #include <HTTPClient.h>
5 #include <esp_now.h>
6 #include <WiFi.h>
7 //#include <RBDdimmer.h>
8
9 //define outputPin 4
10 //define zerocross 2 // for boards with CHANGEABLE input pins
11
12
13 // Replace with your network credentials (STATION)
14 const char* ssid = "Lab Sep";
15 const char* password = "crlgep2018";
16 const char* serverName = "https://script.google.com/macros/s/AKfycbyPoUcEymvPA4rjF9UZSA7ynvxsBUNOTUz2t0EIJ_JMeOoDcnbe3yjU8gi8f4tCQ27gQw/exec";
17
18 unsigned long timeRead = 0;
19 int espera = 1 * 60000; // se sube 1 minuto
20 float temp = 0.0;
21 float hum = 0.0;
22 char modo;
23 String state;
24 int seteo;
25
26 //dimmerLamp dimmer(outputPin, zerocross);
27
28 // Structure example to receive data
29 // Must match the sender structure
30 typedef struct struct_message {
31     int id;
32     float luz_trabajo;
33     float luz_ventana;
34     String funcion;
35     char set_point;
36 } struct_message;
37
38
39 struct_message receivedData;
40
41
42 // callback function that will be executed when data is received
43 void onDataRecv(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t *incomingData, int len) {
44     // Copiamos la dirección MAC a un array local para evitar problemas
45     uint8_t mac[6];
46     memcpy(mac, mac_addr, 6);
47
48     memcpy(&receivedData, incomingData, sizeof(receivedData));
49     Serial.print("Luz recibida de: ");
50     for (int i = 0; i < 6; i++) {
51         Serial.print(mac[i], HEX);
52         if (i < 5) Serial.print(":");
53     }
54     Serial.println(" - ");
55     Serial.print(receivedData.luz_trabajo);
56     Serial.println(" lux mesas");
57     Serial.print(receivedData.luz_ventana);
58     Serial.println(" lux ventana");
59
60     // Controlar LED (brillo inverso a la luz)
61     // int brightness = map(receivedData.lux, 0, 600, 100, 0); // Mapear 0-1000 lux a 100%-0% brillo
62     // brightness = constrain(brightness, 0, 100); // Asegurar que está dentro del rango
63     // dimmer.setPower(brightness); // name.setPower(0%-100%)
64
65 }
66
67 void setup() {
68     // Initialize Serial Monitor
69     Serial.begin(115200);
70     //inicia el dimmer
71     // dimmer.begin(NORMAL_MODE, ON); //dimmer initialisation: name.begin(MODE, STATE)
72
73     // Set the device as a Station and Soft Access Point simultaneously
74     WiFi.mode(WIFI_AP_STA);
75
76
77     // Set device as a Wi-Fi Station
78     WiFi.begin(ssid, password);
79     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
80         delay(1000);
81         Serial.println("Setting as a Wi-Fi Station..");
82     }

```

```

83 Serial.print("Station IP Address: ");
84 Serial.println(WiFi.localIP());
85 Serial.print("Wi-Fi Channel: ");
86 Serial.println(WiFi.channel());
87 Serial.print("Direccion mac: ");
88 Serial.println(WiFi.macAddress());
89
90 // Init ESP-NOW
91 if (esp_now_init() != ESP_OK) {
92     Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
93     return;
94 }
95 // Once ESPNow is successfully Init, we will register for recv CB to
96 // get recv packer info
97 esp_now_register_recv_cb(esp_now_recv_cb_t(OnDataRecv));
98
99 }
100
101 void loop() {
102     if (millis() > espera + timeRead){
103         temp = receivedData.luz_trabajo;//se obtienen los datos del sensor
104         hum = receivedData.luz_ventana;
105         state = receivedData.funcion;
106         modo = receivedData.set_point;
107
108         timeRead = millis();
109         Serial.println(temp);
110         Serial.println(hum);
111         Serial.println(modo);
112         Serial.println(state);
113
114         if (modo == 'A'){
115             seteo = 300;
116         }
117         else {
118             seteo = 500;
119         }
120         sendToGoogleSheet();
121     }
122 }
123 void sendToGoogleSheet() {
124     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
125         HTTPClient http;
126         http.begin(serverName);
127         http.addHeader("Content-Type", "application/json");
128
129         String jsonData = "{\"temp\":\\"" + String(temp) + "\", \"hum\":\\"" + String(hum) + "\",\"state\":\\"" + String(state) + "\",\"seteo\":\\"" + String(seteo) + "\"}";
130
131         int httpResponseCode = http.POST(jsonData);
132
133         if (httpResponseCode > 0) {
134             String response = http.getString();
135             Serial.println(httpResponseCode);
136             Serial.println(response);
137         } else {
138             Serial.print("Wrong request POST: ");
139             Serial.println(httpResponseCode);
140         }
141
142         http.end();
143     }
144 }
145

```

Código 5: Sensores finales.

```

Final_esclavos_CALIBRACION.ino
1  #include <esp_wifi.h>
2  #include <esp_now.h>
3  #include <WiFi.h>
4  #include <Wire.h>
5  #include "BH1750FVI.h"
6
7  // Sensores
8  BH1750FVI panel(0x23);
9  BH1750FVI ventana(0x5C);
10
11 // Estructura de datos
12 typedef struct sensor_data {
13     int id; // ID del esclavo
14     float luz_ventana; // Lectura hacia ventana
15     float luz_panel; // Lectura hacia panel LED
16 } sensor_data;
17
18 sensor_data misDatos;
19
20 // MAC del maestro
21 uint8_t masterMac[] = {0xFC,0xB4,0x67,0x67,0xAC,0x00};
22
23 // Configuración del esclavo
24 const int ID_ESCLAVO = 1; // CAMBIAR POR CADA DISPOSITIVO (1-5)
25
26 constexpr char WIFI_SSID[] = "Escuela Colonia Arabe ";
27
28 int32_t getWiFiChannel(const char *ssid) {
29     if (int32_t n = WiFi.scanNetworks()) {
30         for (uint8_t i=0; i<n; i++) {
31             if (!strcmp(ssid, WiFi.SSID(i).c_str())) {
32                 return WiFi.channel(i);
33             }
34         }
35     }
36     return 0;
37 }
38
39 void setup() {
40     Serial.begin(115200);
41     WiFi.mode(WIFI_STA);
42
43     // Inicializar sensores
44     Wire.begin(); // activar el i2c

```

```
45
46 panel.powerOn(); // se prende el sensor
47 panel.setContHighRes(); // se configura el sensor
48
49 ventana.powerOn(); // se prende el sensor
50 ventana.setContHighRes(); // se configura el sensor
51
52 int32_t channel = getWiFiChannel(WIFI_SSID);
53
54 WiFi.printDiag(Serial); // Uncomment to verify channel number before
55 esp_wifi_set_promiscuous(true);
56 esp_wifi_set_channel(channel, WIFI_SECOND_CHAN_NONE);
57 esp_wifi_set_promiscuous(false);
58 WiFi.printDiag(Serial); // Uncomment to verify channel change after
59
60
61 // Configurar datos iniciales
62 misDatos.id = ID_ESCLAVO;
63
64 // Inicializar ESP-NOW
65 if (esp_now_init() != ESP_OK) {
66     Serial.println("Error inicializando ESP-NOW");
67     return;
68 }
69
70 // Registrar maestro
71 esp_now_peer_info_t peerInfo;
72 memcpy(peerInfo.peer_addr, masterMac, 6);
73 peerInfo.channel = 0;
74 peerInfo.encrypt = false;
75
76 if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
77     Serial.println("Error registrando maestro");
78     return;
79 }
80
81 // Registrar callback de recepción
82 esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
83
84 Serial.print("Esclavo ");
85 Serial.print(ID_ESCLAVO);
86 Serial.println(" inicializado. Listo para recibir solicitudes.");
87 }
88
```

```

89 void loop() {
90     // Leer sensores continuamente
91
92     float vent = ventana.getLux (
93     if (vent >= 300){
94         vent = vent - 20;
95     }
96     else if (vent >= 400){
97         vent = vent - 40;
98     }
99     else if (vent >= 500){
100         vent = vent - 60;
101     }
102     else if (vent >= 600){
103         vent = vent - 70;
104     }
105     else if (vent >= 700){
106         vent = vent - 100;
107     }
108     else if (vent >= 900){
109         vent = vent - 120;
110     }
111     else if (vent >= 1500){
112         vent = vent - 165;
113     }
114
115     float panl = panel.getLux();
116     if (panl >= 300){
117         panl = panl - 20;
118     }
119     else if (panl >= 400){
120         panl = panl - 40;
121     }
122     else if (vent >= 500){
123         panl = panl - 60;
124     }
125     else if (vent >= 600){
126         panl = panl - 70;
127     }
128     else if (vent >= 700){
129         panl = panl - 100;
130     }
131     else if (vent >= 900){
132         panl = panl - 120;
133     }
134     else if (vent >= 1500){
135         panl = panl - 165;
136     }
137     else if (vent >= 3000){
138         panl = panl - 300;
139     }
140     misDatos.luz_ventana = vent;
141     misDatos.luz_panel = panl;
142
143     delay(500); // Pequeña pausa entre lecturas
144 }
145
146 // Callback cuando se recibe un mensaje
147 void OnDataRecv(const uint8_t *mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
148     // Cualquier mensaje recibido es una solicitud de datos
149     enviarDatos();
150 }
151
152 void enviarDatos() {
153     esp_err_t resultado = esp_now_send(masterMac, (uint8_t *)&misDatos, sizeof(misDatos));
154
155     if (resultado == ESP_OK) {
156         Serial.println("Datos enviados al maestro");
157     } else {
158         Serial.println("Error enviando datos");
159     }
160 }
161

```

Código 6: controlador implementado en escuela Colonia Árabe

```

Final_controlador.ino
1 //https://script.google.com/macros/s/AKfycby_93GAnfbeZq3TXoJhw5M21FbheKCT6HthX2cuxONzqaUh-dZ_DjmlLiK4Z-BzN47oqQA/exec
2 #include <esp_now.h>
3 #include <WiFi.h>
4 #include <freertos/FreeRTOS.h>
5 #include <freertos/task.h>
6 #include <RBDdimmerESP32.h>
7 #include <HTTPClient.h>
8 #include "ACS712.h"
9
10 // sensibilidad para 5A
11 ACS712 manual(35, 5.0, 4095, 185);
12 float calibracion = 96;
13
14 dimmerLampESP32 dimmerV(25,33);
15 //dimmerLampESP32 dimmerM(26,33);
16 //dimmerLampESP32 dimmerP(27,33);
17
18 const char* ssid = "Escuela Colonia Arabe ";
19 const char* password = "cvd886new";
20 const char* serverName = "https://script.google.com/macros/s/AKfycby_93GAnfbeZq3TXoJhw5M21FbheKCT6HthX2cuxONzqaUh-dZ_DjmlLiK4Z-BzN47oqQA/exec";
21
22 char modo;
23 float iSistem;
24
25 // Estructura para almacenar datos de sensores
26 typedef struct sensor_data {
27     int id; // ID del esclavo
28     float luz_ventana; // Lectura hacia ventana
29     float luz_panel; // Lectura hacia panel LED
30 } sensor_data;
31
32 // MAC de los esclavos (REEMPLAZAR CON TUS MAC REALES)
33 uint8_t slaveMac[][6] = {
34     {0x64, 0xE8, 0x33, 0x88, 0x3E, 0x68}, // Esclavo 1 - Fila 1 VENTANA Principal
35     {0x64, 0xE8, 0x33, 0x87, 0xC8, 0xB8}, // Esclavo 2 - Fila 1 VENTANA Secundario
36     {0x64, 0xE8, 0x33, 0x88, 0x41, 0x24}, // Esclavo 3 - Fila 2 MURO Principal
37     {0xDC, 0x06, 0x75, 0xA9, 0xB0, 0xEC}, // Esclavo 4 - Fila 2 MURO Secundario
38     {0x64, 0xE8, 0x33, 0x88, 0x31, 0x60} // Esclavo 5 - Fila 3 PIZARRA
39 };
40
41 // Array para almacenar datos de todos los esclavos
42 sensor_data esclavos[5];
43 bool datosRecibidos[5] = {false, false, false, false, false};
44

```

```

45 // Variables control PI
46 const float Kp = 0.35, Ki = 0.05;
47 float error[3] = {0, 0, 0};
48 float integral[3] = {0, 0, 0};
49 const float setpoint = 500.0; // Nivel de luz deseado
50
51 // Sincronización
52 SemaphoreHandle_t xMutex;
53 SemaphoreHandle_t xSemaphore;
54 TaskHandle_t taskComHandle = NULL;
55 TaskHandle_t taskCtrlHandle = NULL;
56
57 // Callback de recepción (se ejecuta en Core 1)
58 void onDataRecv(const uint8_t *mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
59     sensor_data *newData = (sensor_data *)incomingData;
60     int slaveIndex = -1;
61
62     // Buscar qué esclavo envió los datos
63     for (int i = 0; i < 5; i++) {
64         if (memcmp(mac, slaveMac[i], 6) == 0) {
65             slaveIndex = i;
66             break;
67         }
68     }
69
70     if (slaveIndex != -1) {
71         if (xSemaphoreTake(xMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
72             esclavos[slaveIndex] = *newData;
73             datosRecibidos[slaveIndex] = true;
74             Serial.print("Datos recibidos de esclavo ");
75             Serial.println(slaveIndex + 1);
76             xSemaphoreGive(xMutex);
77         }
78     }
79 }
80
81 // Tarea de comunicación (Core 0)
82 void taskComunicacion(void *pvParameters) {
83     while (1) {
84         static unsigned long ultimoPedido = 0;
85         const unsigned long intervalo = 10000; // 10 segundos entre ciclos
86
87         if (millis() - ultimoPedido >= intervalo) {
88             ultimoPedido = millis();
89
90             // Resetear banderas de recepción
91             if (xSemaphoreTake(xMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
92                 memset(datosRecibidos, false, sizeof(datosRecibidos));
93                 xSemaphoreGive(xMutex);
94             }
95
96             // Solicitar datos secuencialmente
97             for (int i = 0; i < 5; i++) {
98                 Serial.print("Solicitando datos a esclavo ");
99                 Serial.println(i+1);
100
101                 // Enviar solicitud
102                 uint8_t solicitud = 1;
103                 esp_err_t resultado = esp_now_send(slaveMac[i], &solicitud, sizeof(solicitud));
104
105                 if (resultado != ESP_OK) {
106                     Serial.print("Error enviando solicitud a esclavo ");
107                     Serial.println(i+1);
108                 }
109
110                 // Pequeña pausa entre solicitudes
111                 delay(50);
112             }
113
114             // Notificar al core de control que puede procesar
115             xSemaphoreGive(xSemaphore);
116         }
117         delay(20); // Pequeña pausa para evitar sobrecarga
118     }
119 }
120
121 // Tarea de control (Core 1)
122 void taskControl(void *pvParameters) {
123     while (1) {
124         // Esperar notificación para procesar
125         if (xSemaphoreTake(xSemaphore, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
126             // Esperar a que lleguen los datos (con timeout)
127             unsigned long inicioEspera = millis();
128             bool todosRecibidos = false;
129
130             while ((millis() - inicioEspera < 1000) && !todosRecibidos) {

```

```

130     while ((millis() - inicioEspera < 1000) && !todosRecibidos) {
131         if (xSemaphoreTake(xMutex, (TickType_t)10) == pdTRUE) {
132             todosRecibidos = true;
133             for (int i = 0; i < 5; i++) {
134                 if (!datosRecibidos[i]) {
135                     todosRecibidos = false;
136                     break;
137                 }
138             }
139             xSemaphoreGive(xMutex);
140         }
141         delay(10);
142     }
143
144     // Procesar datos
145     procesarDatos();
146
147 }
148
149 }
150 }
151
152 void procesarDatos() {
153     // Tomar mutex para acceder a datos
154     if (xSemaphoreTake(xMutex, portMAX_DELAY) != pdTRUE) return;
155
156     // Calcular promedios por fila
157     float promVenFila1 = (esclavos[0].luz_ventana + esclavos[1].luz_ventana) / 2.0; //promedio de las ventanas
158     float promVenFila2 = (esclavos[2].luz_ventana + esclavos[3].luz_ventana) / 2.0;
159
160     float promPaFila1 = (esclavos[0].luz_panel + esclavos[1].luz_panel) / 2.0; // promedio de los paneles
161     float promPaFila2 = (esclavos[2].luz_panel + esclavos[3].luz_panel) / 2.0;
162
163     // Liberar mutex antes de cálculos largos
164     xSemaphoreGive(xMutex);
165
166     // Aplicar control PI
167     int salidaFila1 = calcularPI(promVenFila1, promPaFila1, 0);
168     int salidaFila2 = calcularPI(promVenFila2, promPaFila2, 1);
169     int salidaPizarra = calcularPI(esclavos[4].luz_ventana, esclavos[4].luz_panel, 2);
170
171     dimmerV.setPower(salidaFila1); // actua el dimmer segun el controlador PI
172     //String mensaje = String(salidaFila1) + "," + String(salidaFila2) + "," + String(salidaPizarra);
173     //SerialPort.println(mensaje);
174     //Serial.println("Informacion enviada");
175     // Mostrando datos
176     Serial.println("\n=== DATOS RECIBIDOS ===");
177     for (int i = 0; i < 5; i++) {
178         Serial.println("Esclavo "); Serial.print(i+1);
179         Serial.print(" | Ventana: "); Serial.print(esclavos[i].luz_ventana);
180         Serial.print(" | Panel: "); Serial.print(esclavos[i].luz_panel);
181     }
182
183     Serial.print("Promedio Fila 1: "); Serial.println(promVenFila1);
184     Serial.print("Control Fila 1: "); Serial.println(salidaFila1);
185     Serial.print("Promedio Fila 2: "); Serial.println(promVenFila2);
186     Serial.print("Control Fila 2: "); Serial.println(salidaFila2);
187     Serial.print("Control Pizarra: "); Serial.println(salidaPizarra);
188     Serial.println("=====n");
189
190     static unsigned long timeRead = 0;
191     const unsigned long espera = 60 * 1000; // 60 segundps entre envios de info
192
193     if (millis() > espera + timeRead){
194         timeRead = millis();
195
196         // calcula la corriente del sistema
197         float average = 0;
198         uint32_t start = millis();
199         for (int i = 0; i < 100; i++)
200         {
201             // select appropriate function
202             average += manual.mA_AC_sampling();
203         }
204         float mA = ((average / 100.0) - calibracion)*0.65;
205
206         if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
207             HTTPClient http;
208             http.begin(serverName);
209             http.addHeader("Content-Type", "application/json");
210
211             String jsonData = "{\"promVenFila1\":\"," + String(promVenFila1) + "\",\"promPaFila1\":\"," + String(promPaFila1) + "\",\"promVenFila2\":\"," + String(promVenFila2) + "\",\"promPaFila2\":\"," + String(promPaFila2) + "\",\"pizarraVen\":\"," + String(esclavos[4].luz_ventana) + "\",\"pizarraPanel\":\"," + String(esclavos[4].luz_panel) + "\",\"mA\":\"," + String(mA) + "\"}";
212             int httpResponseCode = http.POST(jsonData);
213
214         }
215     }
216 }

```

```

217     if (httpResponseCode > 0) {
218         String response = http.getString();
219         Serial.println(httpResponseCode);
220         Serial.println(response);
221     } else {
222         Serial.print("Wrong request POST: ");
223         Serial.println(httpResponseCode);
224     }
225
226     http.end();
227 }
228 }
229 }
230 }
231
232 int calcularPI(float ventana, float panel, int fila) {
233
234     const float SENSOR_DISTANCE = 0.05; // 0.05 metros
235     const float WORK_DISTANCE = 0.4; //
236
237     float lux_at_workplane = panel * pow(SENSOR_DISTANCE/WORK_DISTANCE, 2);
238
239     error[fila] = setpoint - lux_at_workplane * 0.6 - (ventana * 0.6) ;
240     integral[fila] += error[fila];
241
242     // Limitar integral para evitar windup
243     integral[fila] = constrain(integral[fila], -50, 50);
244
245     float salida = Kp * error[fila] + Ki * integral[fila];
246     return constrain(salida, 0, 100);
247 }
248
249 void setup() {
250     Serial.begin(115200);
251     WiFi.mode(WIFI_AP_STA);
252
253     dimmerV.begin(NORMAL_MODE, ON);
254     //dimmerM.begin(NORMAL_MODE, ON);
255     //dimmerP.begin(NORMAL_MODE, ON);
256
257     // Inicializar ESP-NOW
258     if (esp_now_init() != ESP_OK) {
259         Serial.println("Error inicializando ESP-NOW");
260         return;
261     }
262
263     esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
264
265     // Registrar todos los esclavos
266     for (int i = 0; i < 5; i++) {
267         esp_now_peer_info_t peerInfo;
268         memset(&peerInfo, 0, sizeof(peerInfo));
269         memcpy(peerInfo.peer_addr, slaveMac[i], 6);
270         peerInfo.channel = 0;
271         peerInfo.encrypt = false;
272
273         if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
274             Serial.print("Error registrando esclavo ");
275             Serial.println(i+1);
276             return;
277         }
278     }
279
280     // Crear elementos de sincronización
281     xMutex = xSemaphoreCreateMutex();
282     xSemaphore = xSemaphoreCreateBinary();
283
284     // Configurar cores
285     xTaskCreatePinnedToCore(
286         taskComunicacion, // Función de la tarea
287         "Comunicacion", // Nombre
288         10000, // Tamaño de pila
289         NULL, // Parámetros
290         1, // Prioridad
291         &taskComHandle, // Handle
292         0 // Core 0
293     );
294
295     xTaskCreatePinnedToCore(
296         taskControl, // Función de la tarea
297         "Control", // Nombre
298         14000, // Tamaño de pila
299         NULL, // Parámetros
300         1, // Prioridad
301         &taskCtrlHandle, // Handle
302         1 // Core 1

```

```

303     );
304
305     Serial.println("Maestro inicializado. Dual Core activado.");
306
307     // CONECTARSE AL WIFI
308     WiFi.begin(ssid, password);
309     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
310         delay(1000);
311         Serial.println("Setting as a Wi-Fi Station..");
312     }
313     Serial.print("Station IP Address: ");
314     Serial.println(WiFi.localIP());
315     Serial.print("Wi-Fi Channel: ");
316     Serial.println(WiFi.channel());
317
318     //SerialPort.begin(9600, SERIAL_8N1, 18, 17); // tx = 18 rx=17
319 }
320
321 void loop() {
322     // dimmerV.setPower(100); // actua el dimmer segun el controlador PI
323     //dimmerM.setPower(50);
324     //dimmerP.setPower(20);
325
326 }
327

```

Código 7: Datalogger utilizado para calibración de sensores.

```

datalogger.ino
1  // url nueva para calibracion
2  //https://script.google.com/macros/s/AKfycbzyATza5Vs9qoEAPfZ3ZU1AZdvS1DVsfHfy55T1g995JYZgcHybf6_5-dH69-TWmJ_VOWg/exec
3  #include <esp_wifi.h>
4  #include <WiFi.h>
5  #include "BH1750FVI.h"
6  #include <HTTPClient.h>
7
8  BH1750FVI largo(0x23);
9
10 unsigned long previousMillis = 0; // Stores last time temperature was published
11 const long espera = 60000; // Interval at which to publish sensor readings
12
13 float gy30 = 0.0;
14 float gy302 = 0.0;
15
16 // Replace with your network credentials (STATION)
17 const char* ssid = "Lab Sep";
18 const char* password = "crlgep2018";
19 const char* serverName = "https://script.google.com/macros/s/AKfycbzyATza5Vs9qoEAPfZ3ZU1AZdvS1DVsfHfy55T1g995JYZgcHybf6_5-dH69-TWmJ_VOWg/exec";
20
21 void setup() {
22     Serial.begin(115200);
23     // Set the device as a Station and Soft Access Point simultaneously
24     WiFi.mode(WIFI_AP_STA);
25     // Set device as a Wi-Fi Station
26     WiFi.begin(ssid, password);
27     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
28         delay(1000);
29         Serial.println("Setting as a Wi-Fi Station..");
30     }
31     Serial.print("Station IP Address: ");
32     Serial.println(WiFi.localIP());
33     Serial.print("Wi-Fi Channel: ");
34     Serial.println(WiFi.channel());
35     Serial.print("Direccion mac: ");
36     Serial.println(WiFi.macAddress());
37
38     Wire.begin(); // activar el i2c
39
40     largo.powerOn(); // se prende el sensor
41     largo.setContHighRes(); // se configura el sensor
42 }
43
44 void loop() {

```

datalogger.ino

```

44 void loop() {
45   if (millis() - previousMillis >= 500){
46     gy30 = largo.getLux ();
47     if (gy30 >= 300){
48       gy30 = gy30 - 20;
49     }
50     else if (gy30 >= 400){
51       gy30 = gy30 - 40;
52     }
53     else if (gy30 >= 500){
54       gy30 = gy30 - 60;
55     }
56     else if (gy30 >= 600){
57       gy30 = gy30 - 70;
58     }
59     else if (gy30 >= 700){
60       gy30 = gy30 - 100;
61     }
62     Serial.println(gy30);
63   }
64   if ( millis() - previousMillis >= espera) {
65     Serial.print("gy30: ");
66     Serial.println(gy30);
67
68     previousMillis = millis();
69     sendToGoogleSheet();
70   }
71 }
72
73 void sendToGoogleSheet() {
74   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
75     HTTPClient http;
76     http.begin(serverName);
77     http.addHeader("Content-Type", "application/json");
78
79     String jsonData = "{\"gy30\": \"" + String(gy30) + "\", \"gy302\": \"" + String(gy302) + "\"}";
80
81     int httpResponseCode = http.POST(jsonData);
82
83     if (httpResponseCode > 0) {
84       String response = http.getString();
85       Serial.println(httpResponseCode);
86       Serial.println(response);
87     } else {
88       Serial.print("Wrong request POST: ");
89       Serial.println(httpResponseCode);
90     }
91
92     http.end();
93   }
94 }
95

```

Anexo E: Materiales y costos.

Tabla E1: Lista de materiales y costos de la implementación. Elaboración propia.

producto	precio unitario	cantidad	precio total	link de compra	Grupo
esp 32 38P USB C	\$ 9.000	1	\$ 9.000	https://afel.cl/pro	control
adaptador 38p riel din	\$ 4.000	1	\$ 4.000	https://afel.cl/pro	control
módulo dimmer 16A 600V	\$ 12.597	1	\$ 12.597	https://articulo.mg	control
sensor luz gy-302	\$ 2.300	6	\$ 13.800	https://afel.cl/pro	control
fuelle de alimentación 5v	\$ 15.000	1	\$ 15.000	https://afel.cl/pro	control
emisor/receptor 433Mhz	\$ 6.000	1	\$ 6.000	https://afel.cl/pro	control
sensor corriente	\$ 2.500	1	\$ 2.500	https://afel.cl/pro	control
sensor de distancia	\$ 1.500	2	\$ 3.000	https://afel.cl/pro	control
ESP32-C3	\$ 10.000	5	\$ 50.000	https://afel.cl/pro	control
AC-DC 5V 700mA	\$ 4.500	5	\$ 22.500	https://afel.cl/pro	control
terminales	\$ 700	5	\$ 3.500	compra en ccp	control
interruptor triple	\$ 4.890	1	\$ 4.890	https://www.sodir	materiales
selector de 3 posiciones	\$ 5.790	1	\$ 5.790		materiales
tablero 24 módulos	\$ 20.296	1	\$ 20.296		tablero
canaletas 2 m	\$ 890	11	\$ 9.790	https://sodimac.fo	materiales
cajas chuqui	\$ 1.290	6	\$ 7.740	https://www.sodir	materiales
tapa caja ciega plastica 6U	\$ 2.030	6	\$ 12.180	https://sodimac.fo	materiales
junta 90° canaleta	\$ 790	2	\$ 1.580	https://sodimac.fo	materiales
regleta azul	\$ 1.890	1	\$ 1.890		tablero
regleta blanca	\$ 1.890	1	\$ 1.890		tablero
junta T canaleta	\$ 790	2	\$ 1.580	https://sodimac.fo	materiales
curva plana canaleta	\$ 990	2	\$ 1.980		materiales
junta final	\$ 590	2	\$ 1.180	https://sodimac.fo	materiales
termomagnético 6A 1p	\$ 3.990	1	\$ 3.990	https://www.sodir	tablero
diferencial 30mA o 25ma	\$ 16.990	1	\$ 16.990	https://www.sodir	tablero
Porta fusible	\$ 2.900	1	\$ 2.900	https://www.sodir	tablero
Luz piloto	\$ 3.190	1	\$ 3.190	https://www.sodir	tablero
fusible 2A 10x38mm	\$ 440	1	\$ 440	https://www.sodir	tablero
borneras	\$ 590	3	\$ 1.770		tablero
caja estanca 80x80	\$ 1.080	4	\$ 4.320	https://www.sodir	materiales
cable rojo eva 1,5 mm 25 metros	\$ 7.067	1	\$ 7.067		materiales
cable azul eva 1,5mm 25 metros	\$ 7.067	1	\$ 7.067		materiales
cable blanco eva 1,5 mm 50 metros	\$ 16.246	1	\$ 16.246	https://www.sodir	materiales
cable verde eva 1,5 mm 50 metros	\$ 14.812	1	\$ 14.812		materiales
cable rojo eva 1,5 mm 50 metros	\$ 14.812	1	\$ 14.812	https://www.sodir	materiales
cable bajada tipo cordón 3 hilos x 1mm	\$ 1.090	10	\$ 10.900	https://www.sodir	materiales
panel led 300 x 1200 48w	\$ 17.270	8	\$ 138.160	https://powerener	luminarias
Dimmer manual	\$ 27.920	3	\$ 83.760	https://powerener	luminarias
driver led dimmer 48w	\$ 18.810	8	\$ 150.480	https://powerener	luminarias
kit para colgar	\$ 15.560	8	\$ 124.480	https://powerener	luminarias
amarra cables 25 unidades	\$ 1.190	1	\$ 1.190		materiales
terminales	\$ 390	4	\$ 1.560		materiales
conectores tipo tapa	\$ 14.590	1	\$ 14.590		materiales
persianas motorizadas	\$ 860.000	1	\$ 860.000		persianas
TOTAL :			\$ 1.691.407		

Tabla E2: Desglose de gastos según categoría de utilización de los materiales. Elaboración propia.

desglose de gastos		
control	\$ 141.897	8%
materiales	\$ 139.274	8%
tablero	\$ 53.356	3%
luminarias	\$ 496.880	29%
persiana	\$ 860.000	51%
total	\$ 1.691.407	100%