

**UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE SAN
FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E
INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EL EDIFICIO
TAYPI DE LA CIUDAD DE EL ALTO”**

**TRABAJO EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER EN ENERGÍAS
RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

ALUMNO: Ing. ALVARO ADOLFO ALVARADO TARQUI

TUTOR: M.Sc. Ing. RICAR CADENA SUXO

Sucre, septiembre del 2026

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito para la obtención del título de magister en energías Renovables y Eficiencia energética de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

Ing. Alvaro Adolfo Alvarado Tarqui

Sucre, septiembre del 2026

Agradecimientos

Primeramente agradecer a Dios, por hacer que todo esto esté sucediendo.

A mi tutor M. Sc. Richar Cadena Suxo quien fue fundamental para la conclusión del presente trabajo de grado.

Al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación de la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier De Chuquisaca, que con su enseñanza han logrado inculcar una actitud investigadora para el desarrollo de nuestro país.

Al Rector del Instituto Tecnológico “Bolivia Mar”
Lic. Felipe Chuquimia K.

De Corazón Gracias

Dedicado a:

Mi esposa Vanessa, a mis hijos Madai y Jair, por su apoyo incondicional y por ser la inspiración para poder concluir con el presente trabajo de grado.

Alvaro Adolfo Alvarado Tarqui

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiv
1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.1.1. Contexto Global	2
1.1.2. Contexto Nacional.....	3
1.1.3. Contexto local.....	3
1.1.4. Relevancia Técnica.....	3
1.2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4.1. Justificación Técnica.....	6
1.4.2. Justificación Económica.....	7
1.4.3. Justificación Ambiental	7
1.5. HIPÓTESIS.....	8
1.6. OBJETIVOS.....	8
1.6.1. Objetivo General	8
1.6.2. Objetivos Específicos	8
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9
2.1. MARCO CONTEXTUAL Y NORMATIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	9
2.1.1. Eficiencia energética y sostenibilidad en el sector edilicio.....	11
2.1.2. Sistema de gestión de la energía: Norma ISO 50001	11
2.1.3. Políticas y programas de Eficiencia Energética en Bolivia	12
2.1.4. Marco normativo para Generación de electricidad y energías renovables	13
2.1.5. Generación Distribuida y uso de energías renovables en edificaciones --	14
2.1.6. Plan para el Desarrollo de las Energías Alternativas 2025	16
2.1.7. Antecedentes y situación actual de la eficiencia energética en Bolivia --	17
2.1.8. Desarrollo de la Estrategia Nacional de Eficiencia Energética	18
2.1.9. Potencial energético procedente de Energías Alternativas	19
2.2. MARCO CONCEPTUAL	20

2.2.1.	El sector edilicio como consumidor de energía -----	20
2.2.2.	Edificaciones sustentables y uso racional de la energía -----	21
2.2.3.	Eficiencia energética en la edificación -----	22
2.2.4.	Indicadores de Eficiencia Energética en edificios -----	23
2.2.5.	Estrategias de Eficiencia Energética aplicables en edificios -----	25
2.2.6.	Automatización de edificios en términos de Eficiencia Energética -----	26
2.3.	INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EDIFICACIONES -	27
2.3.1.	Energías renovables aplicadas al sector edilicio -----	27
2.3.2.	Energía solar fotovoltaica en edificaciones-----	28
2.3.3.	Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios educativos-----	30
2.4.	BENEFICIOS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES -----	31
2.4.1.	Beneficios energéticos y ambientales -----	32
2.4.2.	Beneficios económicos y reducción de costos operativos -----	32
2.4.3.	Impacto en el confort y en el proceso de enseñanza-aprendizaje-----	34
2.5.	ESTADO DEL ARTE DE INVESTIGACIONES SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA E INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EDIFICACIONES -----	34
2.5.1.	Investigaciones internacionales -----	34
2.5.2.	Investigaciones latinoamericanas -----	36
2.5.3.	Investigaciones nacionales -----	37
2.5.4.	Análisis comparativo de las investigaciones revisadas -----	38
3.	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA-----	40
3.1.	ENFOQUE METODOLÓGICO-----	40
3.1.1.	Enfoque de investigación-----	40
3.1.2.	Tipo de investigación -----	41
3.1.3.	Diseño de investigación -----	41
3.1.4.	Método de investigación -----	42
3.1.5.	Técnicas e instrumentos de recopilación de información-----	42
3.2.	ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO Y DE LA DEMANDA ASOCIADA	43
3.3.	METODOLOGÍA PARA LA PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA -----	44
3.3.1.	Revisión bibliográfica y normativa -----	45
3.3.2.	Análisis de los sistemas eléctricos del edificio-----	46
3.3.3.	Propuesta y evaluación de estrategias de eficiencia energética-----	46

3.4. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTVOLTAICO-----	47
3.4.1. Recolección y análisis de información técnica y solar-----	47
3.4.2. Dimensionamiento y configuración del sistema fotovoltaico-----	48
3.4.3. Verificación y validación técnica del sistema diseñado -----	49
3.5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA-----	50
3.5.1. Estimación de costos de inversión -----	50
3.5.2. Determinación del ahorro energético y económico-----	50
3.5.3. Período de recuperación de la inversión (Payback) -----	51
3.5.4. Análisis de escenarios económicos -----	51
4. CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN -----	52
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO CLIMÁTICO Y AMBIENTAL --	52
4.1.1. Altitud y ubicación geográfica -----	52
4.1.2. Condiciones climáticas locales -----	53
4.1.3. Radiación solar y potencial energético renovable -----	54
4.2. DIAGNOSTICO GENERAL DEL CASO DE ESTUDIO -----	55
4.2.1. Contexto urbano y área de influencia-----	55
4.2.2. Características generales del ITBM-----	59
4.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y ARQUITECTÓNICAS-----	60
4.3.1. Descripción arquitectónica general -----	60
4.3.2. Orientación geográfica-----	63
4.3.3. Zonificación funcional y energética del edificio-----	64
4.3.4. Inventario técnico de cargas y equipos por zona-----	65
4.3.5. Relación entre zonas funcionales y estrategias de eficiencia energética -	67
4.4. ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA -----	68
4.4.1. Cuadros de cargas y resumen de cargas eléctricas-----	68
4.4.2. Resumen de cargas general -----	72
4.4.3. Perfil estimado de uso energético -----	74
4.4.4. Variación de caída de tensión-----	75
4.5. BALANCE ENERGÉTICO DEL EDIFICIO -----	77
4.5.1. Estimación de consumos por sistema-----	77
4.5.2. Balance anual proyectado -----	84
4.6. EVALUACIÓN DE INDICADORES ENERGÉTICOS -----	85
4.6.1. Indicadores técnicos-----	85
4.6.2. Indicadores económicos -----	87

4.6.3.	Indicadores ambientales -----	89
4.6.4.	Análisis comparativo con referencias internacionales de eficiencia energética-----	91
4.7.	PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA -----	94
4.7.1.	Enfoque general de intervención -----	96
4.7.2.	Estrategia de iluminación eficiente -----	97
4.7.2.1.	Tecnología de alta eficiencia energética-----	98
4.7.2.2.	Control mediante sensores y sectorización-----	98
4.7.2.3.	Diseño arquitectónico de iluminación eficiente -----	99
4.7.2.4.	Mantenimiento de luminarias -----	101
4.7.2.5.	Modelación del ahorro energético de iluminación por diseño eficiente	102
4.7.3.	Estrategia de control térmico y optimización de la envolvente -----	102
4.7.3.1.	Muros exteriores -----	103
4.7.3.2.	Cubierta y control térmico mediante película de control solar -----	103
4.7.3.3.	Ventanas y vanos -----	104
4.7.3.4.	Aberturas para ventilación-----	106
4.7.4.	Estrategia de automatización y control-----	106
4.7.4.1.	Control por atenuación en zonas críticas de seguridad -----	107
4.7.4.2.	Modelación del ahorro energético con dimming -----	108
4.7.4.3.	Sensores de presencia en áreas de uso intermitente-----	110
4.7.4.4.	Sectorización de circuitos eléctricos -----	110
4.7.4.5.	Programación horaria y supervisión técnica -----	111
4.7.4.6.	Proyección del impacto ambiental asociado -----	111
4.7.5.	Educación energética y buenas prácticas de uso-----	112
4.7.6.	Hoja de ruta para la implementación y seguimiento -----	113
4.8.	DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO -----	114
4.8.1.	Dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico -----	115
4.8.1.1.	Condiciones del sitio y recurso solar-----	115
4.8.1.2.	Determinación de la demanda energética a cubrir -----	115
4.8.1.3.	Conversión de la demanda anual a demanda diaria-----	116
4.8.1.4.	Cálculo de la potencia pico requerida-----	117
4.8.1.5.	Selección del tipo de módulo fotovoltaico -----	118
4.8.1.6.	Determinación del número de paneles -----	118
4.8.1.7.	Verificación del área disponible -----	119
4.8.1.8.	Estimación de la producción anual -----	120

4.8.1.9.	Verificación del nivel de cobertura-----	120
4.8.2.	Parámetros técnicos de diseño-----	122
4.8.3.	Evaluación ambiental del aporte energético-----	123
4.9.	INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES-----	124
4.9.1.	Contribución del sistema fotovoltaico al edificio-----	125
4.9.2.	Posibilidades de expansión futura-----	125
4.9.3.	Proyección del impacto ambiental a largo plazo-----	126
5.	CAPÍTULO V. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA ----	128
5.1.	COSTO DE INVERSIÓN-----	128
5.1.1.	Alcance de la inversión considerada-----	128
5.1.2.	Formulación del costo total de inversión-----	129
5.2.	AHORRO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO ESTIMADO-----	130
5.2.1.	Definición del consumo objeto de intervención-----	130
5.2.2.	Reducción de la demanda mediante el sistema de atenuación-----	131
5.2.3.	Generación fotovoltaica y cobertura de la demanda remanente-----	131
5.2.4.	Ahorro económico anual estimado-----	132
5.3.	PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN-----	133
5.4.	ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL DE LOS COMPONENTES-----	134
5.4.1.	Degradación de los módulos fotovoltaicos-----	134
5.4.2.	Desempeño, vida útil y reposición del inversor-----	135
5.4.3.	Consideración de la vida útil de otros componentes-----	136
5.5.	ANÁLISIS FINANCIERO MULTIESCENARIO-----	137
5.6.	VALOR RECUPERABLE DE LA INVERSIÓN-----	138
5.7.	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PROPUESTA --	139
6.	CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----	141
6.1.	CONCLUSIONES-----	141
6.2.	VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS-----	143
6.3.	RECOMENDACIONES-----	144
6.4.	TRABAJOS FUTUROS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN --	145
	BIBLIOGRAFÍA-----	146
	ANEXOS-----	150

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	Modelo de sistema de gestión de la energía para esta Norma Internacional.	12
<i>Figura 2</i>	Programa nacional de eficiencia energética	13
<i>Figura 3</i>	Generación distribuida.....	15
<i>Figura 4</i>	Plan de la Energía Eléctrica para el 2025	17
<i>Figura 5</i>	Política PNEE, Estrategia ENEE y Planes Operacionales	18
<i>Figura 6</i>	Mapa de potencial energético procedente de energías alternativas.....	19
<i>Figura 7</i>	Etiqueta de indicador de eficiencia energética	24
<i>Figura 8</i>	Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a red	29
<i>Figura 9</i>	Propuesta de estrategias de eficiencia energética.....	45
<i>Figura 10</i>	El Alto, Meseta altiplánica	52
<i>Figura 11</i>	Climograma	53
<i>Figura 12</i>	Radiación solar día	54
<i>Figura 13</i>	Horas de sol al día	55
<i>Figura 14</i>	Comparativa visual entre la infraestructura actual del ITBM y el nuevo Edificio Taypi proyectado	57
<i>Figura 15</i>	Área de influencia del proyecto.....	58
<i>Figura 16</i>	Ubicación geográfica 16°34'34"S 68°11'48"W, ITBM.....	59
<i>Figura 17</i>	Vista frontal Edificio Taypi.....	61
<i>Figura 18</i>	Plano arquitectónico, Planta Baja.....	61
<i>Figura 19</i>	Plano arquitectónico Primer Piso	62
<i>Figura 20</i>	Plano arquitectónico Segundo Piso	62
<i>Figura 21</i>	Asolamiento por las mañanas	63
<i>Figura 22</i>	Asolamiento por las tardes	64
<i>Figura 23</i>	Potencia instalada Vs. Demandada por piso	74
<i>Figura 24</i>	Curva diaria de consumo eléctrico	75
<i>Figura 25</i>	Comparación de costos energéticos por escenario	89
<i>Figura 26</i>	Emisiones anuales de CO ₂ del edificio Taypi	91
<i>Figura 27</i>	Comparación del consumo específico con referencias internacionales	93
<i>Figura 28</i>	Niveles de intervención en porcentaje.....	95
<i>Figura 29</i>	Luminaria LED seleccionada	98
<i>Figura 30</i>	Lucernarios cenitales.....	100
<i>Figura 31</i>	Doble vidriado hermético	105

<i>Figura 32</i> Puerta posterior (ventilación cruzada).....	106
<i>Figura 33</i> Driver LED regulable compatible con control 0–10 V / DALI.....	107
<i>Figura 34</i> Afiche de concientización en iluminación	112
<i>Figura 35</i> Afiche de concientización en equipos	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Principales marcos normativos y programas de eficiencia energética aplicables al sector edilicio.....</i>	10
Tabla 2	<i>Principales fuentes de energías renovables aplicables al sector edilicio.....</i>	28
Tabla 3	<i>Comparación conceptual entre sistema fotovoltaico para carga total y sistema fotovoltaico para cargas específicas</i>	31
Tabla 4	<i>Relación conceptual entre consumo energético, ahorro anual y reducción de costos operativos en edificios educativos</i>	33
Tabla 5	<i>Tabla climática</i>	55
Tabla 6	<i>Estadística de estudiantes matriculados</i>	56
Tabla 7	<i>Proyección de número de estudiantes al 2030</i>	57
Tabla 8	<i>Análisis estimativo del alcance geográfico institucional</i>	59
Tabla 9	<i>Funciones principales previstas en el Edificio Taypi.....</i>	60
Tabla 10	<i>Zonificación funcional y energética de Edificio Taypi.....</i>	65
Tabla 11	<i>Inventario técnico de cargas y equipos por zona</i>	66
Tabla 12	<i>Relación entre zonas funcionales y estrategias energéticas</i>	67
Tabla 13	<i>Cuadro de Carga TD-PB Planta baja.....</i>	69
Tabla 14	<i>Cuadro de Carga TD-P1 Primer piso</i>	70
Tabla 15	<i>Cuadro de Carga TD-P2 Segundo Piso</i>	71
Tabla 16	<i>Resumen general de cargas TD-G</i>	73
Tabla 17	<i>Verificación de caída de tensión en alimentadores secundarios</i>	76
Tabla 18	<i>Verificación de caída de tensión en el alimentador principal</i>	76
Tabla 19	<i>Balance energético Planta Baja</i>	78
Tabla 20	<i>Balance energético Primer Piso.....</i>	80
Tabla 21	<i>Balance energético Segundo Piso</i>	82
Tabla 22	<i>Consumo anual estimado por planta en el Edificio Taypi</i>	84
Tabla 23	<i>Balance energético anual por sistema del Edificio Taypi.....</i>	84
Tabla 24	<i>Indicadores técnicos del edificio</i>	86
Tabla 25	<i>Indicadores económicos del edificio</i>	88
Tabla 26	<i>Indicadores ambientales del edificio Taypi.....</i>	90
Tabla 27	<i>Comparación de indicadores energéticos con referencias internacionales ..</i>	92
Tabla 28	<i>Clasificación de las estrategias de eficiencia energética según nivel de intervención</i>	95

Tabla 29 <i>Esquema metodológico de aplicación de las estrategias de eficiencia energética</i>	97
Tabla 30 <i>Parámetros técnicos de orientación, ventilación e iluminación natural</i>	100
Tabla 31 <i>Esquema de mantenimiento preventivo</i>	101
Tabla 32 <i>Comparación de desempeño térmico y acústico: vidrio simple vs. Doble vidriado hermético</i>	105
Tabla 33 <i>Hoja de ruta para la implementación y seguimiento de las estrategias propuestas</i>	114
Tabla 34 <i>Resumen del dimensionamiento del sistema fotovoltaico</i>	122
Tabla 35 <i>Escenarios de expansión futura del sistema fotovoltaico</i>	126
Tabla 36 <i>Costo estimado de inversión de la propuesta</i>	130
Tabla 37 <i>Proyección de la generación fotovoltaica considerando la degradación</i>	134
Tabla 38 <i>Evaluación económica bajo escenarios financieros</i>	137

ABREVIATURAS

CC.	Corriente Continua.
CA.	Corriente Alterna.
V.	Voltaje.
I.	Intensidad.
FV.	Fotovoltaico.
LC.	Inductivo capacitivo.
NB.	Normativa Boliviana.
Ah.	Amperios hora.
Kw.	Kilowatts.
Kwh.	Kilovatio hora.
W.	Watts
Mtep.	Megatonelada equivalente de petróleo
INE	Instituto Nacional de Estadística
ITBM	Instituto Tecnológico Bolivia Mar
EE	Eficiencia Energética
ER	Energías Renovables
AETN	Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear
ENDE	Empresa Nacional de Electricidad
IBMETRO	Instituto Boliviano de Metrología
IBNORCA	Instituto Boliviano de Normalización y Calidad
ENEE	Estrategia Nacional de Eficiencia Energética
MHE	Ministerio de Hidrocarburos y Energías
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Programe
CII	Corporación Interamericana de Inversiones

AEn	Auditorías Energéticas
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CNDC	Comité Nacional de Despacho de Carga
RTS	Revestimientos Técnicos Sostenibles
PEERR	Programa de Energías Renovables
VMEEA	Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
SGen	Sistema de Gestión de la Energía
IDEn	Indicadores de Desempeño Energético
YPFB	Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos
GD	Generación Distribuida
ET	Tundra templado
DVH	Doble vidrio hermético

RESUMEN

Las edificaciones representan un importante campo de aplicación de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia energética y favorecer la integración de fuentes renovables. En este contexto, el presente trabajo de grado propone estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables para el Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar, ubicado en la ciudad de El Alto, considerando las características climáticas, funcionales y energéticas del proyecto durante su etapa de diseño.

El análisis realizado permitió caracterizar las condiciones del edificio e identificar una demanda energética anual proyectada de 40808,73 kWh/año. A partir de este diagnóstico se plantearon estrategias pasivas, activas y de gestión, entre ellas el aprovechamiento de la iluminación natural, iluminación mediante tecnología LED, control por zonas, sensores de presencia, programación horaria y regulación mediante atenuación (dimming) en áreas seleccionadas. La aplicación del sistema de dimming permitió estimar una reducción aproximada del 40 % del consumo energético de las áreas intervenidas, equivalente a un ahorro de 4047,12 kWh/año.

Para la integración de energía renovable se dimensionó un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, considerando la demanda energética anual total proyectada del edificio. El dimensionamiento determinó una potencia instalada de 24,20 kWp, conformada por 44 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 550 Wp, con un área requerida aproximada de 96,8 m². La generación anual estimada del sistema alcanza aproximadamente 40808,73 kWh/año, permitiendo compensar la demanda energética anual del edificio en términos de balance energético, manteniendo la conexión a la red eléctrica convencional como respaldo ante variaciones entre generación y consumo instantáneo.

La evaluación ambiental y económica complementó el análisis técnico de la propuesta. La generación fotovoltaica permite estimar una reducción potencial de emisiones asociadas al consumo eléctrico convencional de aproximadamente 19,59 toneladas de CO₂/año. Desde el punto de vista económico, la propuesta considera una inversión inicial referencial de Bs 108680 y un ahorro económico anual estimado de Bs 59921,42, obteniéndose un período simple de recuperación de la inversión de 1,81 años bajo las condiciones tarifarias y supuestos adoptados.

Asimismo, se incorporó un análisis del comportamiento del sistema durante su vida útil, considerando una degradación anual referencial de los módulos fotovoltaicos del 0,5 %, la reposición del inversor durante el año 15 y un valor recuperable al finalizar el horizonte de evaluación de 25 años, con el propósito de representar de manera más realista el desempeño económico del sistema.

En conjunto, las estrategias propuestas permiten establecer una alternativa integral de intervención energética para el Edificio Taypi, basada en la combinación de medidas pasivas, activas y de gestión con generación fotovoltaica conectada a la red. La propuesta integra criterios técnicos, ambientales y económicos, proporcionando una referencia aplicable a futuras infraestructuras educativas que se encuentren en etapa de diseño.

Palabras clave: Eficiencia energética en edificios (Building Energy Efficiency), Sistema solar fotovoltaico (Photovoltaic System), Regulación por atenuación (Dimming Control), Integración de energías renovables (Renewable Energy Integration), Gestión energética (Energy Management), Edificios educativos (Educational Buildings).

ABSTRACT

Buildings represent an important field for the application of strategies aimed at improving energy efficiency and promoting the integration of renewable energy sources. In this context, this thesis proposes energy efficiency strategies and renewable energy integration for the Taypi Building of the Bolivia Mar Technological Institute, located in the city of El Alto, considering the climatic, functional, and energy characteristics of the project during its design stage.

The analysis carried out allowed the characterization of the building conditions and the identification of a projected annual energy demand of 40808,73 kWh/year. Based on this diagnosis, passive, active, and energy management strategies were proposed, including the use of natural lighting, LED lighting technology, zoning control, occupancy sensors, scheduling, and dimming regulation in selected areas. The implementation of the dimming system allowed an estimated reduction of approximately 40% in the energy consumption of the intervened areas, equivalent to an annual energy saving of 4047,12 kWh/year.

For renewable energy integration, a grid-connected photovoltaic solar system was sized considering the total projected annual energy demand of the building. The design resulted in an installed photovoltaic capacity of 24,20 kWp, consisting of 44 monocrystalline photovoltaic modules of 550 Wp each, requiring an approximate area of 96.8 m². The estimated annual photovoltaic generation reaches approximately 40808,73 kWh/year, allowing the compensation of the building's annual energy demand in terms of energy balance, while maintaining the conventional electrical grid as backup for variations between instantaneous generation and consumption.

The environmental and economic assessment complemented the technical analysis of the proposal. Photovoltaic generation allows the estimation of a potential reduction of approximately 19,59 tons of CO₂/year associated with conventional electricity consumption. From an economic perspective, the proposal considers a reference initial investment of Bs 108680 and an estimated annual economic saving of Bs 59921,42, obtaining a simple payback period of 1.81 years under the tariff conditions and assumptions adopted in the study.

Additionally, an analysis of the system's long-term behavior was incorporated, considering a reference annual photovoltaic degradation rate of 0.5%, inverter

replacement during year 15, and a recoverable value at the end of the 25 year evaluation period, in order to provide a more realistic representation of the system's economic performance throughout its useful life.

Overall, the proposed strategies establish an integrated energy intervention alternative for the Taypi Building, based on the combination of passive, active, and management measures with grid-connected photovoltaic generation. The proposal integrates technical, environmental, and economic criteria, providing a reference framework applicable to future educational infrastructure projects during the design stage.

Keywords: Building Energy Efficiency, Photovoltaic System, Dimming Control, Renewable Energy Integration, Energy Management, Educational Buildings.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El crecimiento del consumo energético y de las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles ha convertido a la eficiencia energética en uno de los principales desafíos para el desarrollo sostenible. En la región andina conformada por Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, el consumo final de energía alcanzó aproximadamente 97 Mtep. (Megatoneladas equivalentes de petróleo) durante la gestión 2019, de los cuales el 16,17 % corresponde al sector edilicio (OLADE, 2019). Estos datos reflejan el importante potencial que poseen las edificaciones para reducir el consumo de energía y contribuir a la mitigación del impacto ambiental.

En respuesta a esta problemática, diversos países han impulsado políticas orientadas al uso racional de la energía y a la incorporación de fuentes renovables. En Bolivia, estas acciones se desarrollan desde el año 2008 mediante programas públicos, campañas de concienciación y la adopción progresiva de tecnologías energéticamente más eficientes. Sin embargo, la incorporación de criterios de eficiencia energética desde la etapa de diseño continúa siendo limitada, particularmente en edificaciones destinadas al sector educativo.

En este escenario, los edificios públicos y educativos adquieren una importancia estratégica, ya que además de representar una demanda significativa de energía, ofrecen la posibilidad de convertirse en modelos de sostenibilidad para futuras infraestructuras. El Instituto Tecnológico Bolivia Mar, ubicado en la ciudad de El Alto, ha experimentado un crecimiento sostenido de su población estudiantil, situación que motivó la proyección del Edificio Taypi, con una superficie aproximada de 4394,87 m², constituyéndose en el caso de estudio de la presente investigación.

Si bien en Bolivia y en otros países de Latinoamérica existen investigaciones relacionadas con la eficiencia energética en edificaciones y con la aplicación de sistemas solares fotovoltaicos, la mayoría aborda estas temáticas de manera independiente o en edificaciones ya construidas.

En consecuencia, aún son limitados los estudios que integren estrategias de eficiencia energética, automatización de la iluminación y generación fotovoltaica desde la etapa

de diseño de edificios educativos, incorporando simultáneamente criterios técnicos, ambientales y económicos.

En función de ello, la presente investigación tiene como objetivo proponer estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables para el Edificio Taypi, considerando las condiciones climáticas y operativas de la ciudad de El Alto. Para alcanzar este propósito, se realizó el diagnóstico de la demanda energética del edificio y se planteó una propuesta basada en la optimización del sistema de iluminación mediante tecnología LED, control por dimming e integración de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. Finalmente, se evaluó la viabilidad técnica, ambiental y económica de las estrategias planteadas.

El principal aporte del estudio radica en integrar estas soluciones dentro de una propuesta única para una infraestructura educativa en etapa de diseño. De esta manera, la investigación constituye una referencia técnica para futuros proyectos que busquen mejorar el desempeño energético de edificaciones similares mediante la aplicación conjunta de medidas de eficiencia energética y energías renovables.

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. Contexto Global

A nivel mundial, las ciudades representan aproximadamente el 78% del consumo total de energía y generan más del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero, pese a ocupar menos del 2% de la superficie terrestre. (ONU-Hábitat, 2020)

En respuesta a esta situación, los gobiernos y organismos internacionales han implementado una serie de estrategias destinadas a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar la participación de las energías renovables. Para 2022, la capacidad instalada de energías renovables a nivel global alcanzó 3,372 GW, con un crecimiento anual del 9%. (IRENA, 2022)

En este contexto, la eficiencia energética se ha convertido en un eje fundamental para disminuir el consumo energético y reducir las emisiones de carbono, especialmente en el sector edilicio, que representa el 28% del consumo final de energía mundial.

1.1.2. Contexto Nacional

En Bolivia, el sector energético se caracteriza por una alta dependencia de los hidrocarburos, los cuales representaron el 77% de la matriz energética primaria en 2020 (INE, 2021). Sin embargo, el país ha iniciado esfuerzos por diversificar su matriz energética y fomentar la eficiencia energética.

Desde 2008, el programa “Electricidad para Vivir con Dignidad” marcó el inicio de una serie de políticas públicas enfocadas en mejorar el acceso a la energía y reducir el consumo energético. Posteriormente, en 2011, se implementaron campañas de concienciación y distribución de lámparas eficientes, lo que contribuyó a disminuir el consumo residencial. En 2022, el gobierno boliviano también destacó la importancia de las energías renovables, con proyectos en energía solar, eólica e hidroeléctrica, que alcanzaron una capacidad instalada de aproximadamente 304 MW (MHE, 2022)

El sector edilicio, que consume el 16% de la energía final en Bolivia, presenta grandes oportunidades para la implementación de estrategias de eficiencia energética. En particular, las construcciones públicas y educativas son identificadas como prioritarias debido a su potencial para servir como ejemplos de sostenibilidad. (INE, 2021)

1.1.3. Contexto local

El edificio Taypi, ubicado en la ciudad de El Alto a más de 4,000 msnm, representa una oportunidad para aplicar estrategias de eficiencia energética y energías renovables en el contexto boliviano. Su diseño debe considerar las condiciones ambientales locales, como la alta irradiación solar y las bajas temperaturas, para maximizar la eficiencia de los sistemas energéticos y minimizar el impacto ambiental. Además, su condición como infraestructura educativa refuerza la importancia de implementar soluciones sostenibles que puedan servir de modelo para futuras construcciones.

1.1.4. Relevancia Técnica

La eficiencia energética y las energías renovables se han convertido en herramientas clave para enfrentar los desafíos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad de las edificaciones. En el ámbito edilicio, las estrategias de eficiencia energética incluyen:

- Optimización del aislamiento térmico para reducir las pérdidas de calor.
- Uso de tecnologías eficientes, como luminarias LED y sistemas de control automático para calefacción y ventilación.
- Incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles fotovoltaicos, para satisfacer parte o la totalidad de la demanda energética.

En regiones de gran altitud, como la ciudad de El Alto, factores como la elevada irradiación solar y las bajas temperaturas nocturnas requieren un enfoque específico en el diseño de los sistemas energéticos. La implementación de paneles solares fotovoltaicos en estas áreas resulta altamente eficiente debido a los altos índices de irradiación solar, que pueden superar los 6158 Wh/m²/día.

1.2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La dependencia de fuentes convencionales de energía en los edificios representa un desafío para la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos. En el caso de las instituciones educativas, esta situación adquiere especial relevancia debido a que sus instalaciones deben responder a una demanda energética creciente, al mismo tiempo que pueden constituirse en espacios demostrativos de buenas prácticas ambientales.

En este contexto, el nuevo Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar, ubicado en la ciudad de El Alto, se proyecta para atender actividades académicas, administrativas y prácticas relacionadas principalmente con las carreras de Mecánica Automotriz y Gastronomía. Estas actividades implican el uso de iluminación, equipos eléctricos y sistemas destinados al funcionamiento de talleres y ambientes de formación, generando una demanda energética que debe ser considerada desde la etapa de diseño.

La ausencia de estrategias de eficiencia energética incorporadas desde esta fase puede conducir a un mayor consumo de electricidad durante la vida útil del edificio y limitar las posibilidades de optimización posterior. Por ello, resulta necesario identificar los sistemas con mayor incidencia en la demanda energética y plantear medidas que permitan reducir su consumo sin afectar las condiciones de funcionamiento, seguridad y circulación de los usuarios. De manera particular, la iluminación de pasillos, gradas y espacios exteriores constituye un sistema de interés debido a sus prolongados periodos de operación.

A esta problemática se suma el elevado potencial solar disponible en la ciudad de El Alto, condición que representa una oportunidad para incorporar fuentes de generación renovable al edificio. La integración de un sistema solar fotovoltaico permitiría aprovechar este recurso para atender parte de la demanda eléctrica, reduciendo la dependencia de la red convencional y contribuyendo simultáneamente a la disminución de las emisiones asociadas al consumo de energía.

En consecuencia, el problema de investigación se centra en la necesidad de determinar cómo la incorporación de estrategias de eficiencia energética y un sistema de generación fotovoltaica, planteados desde la fase de diseño del Edificio Taypi, puede contribuir a optimizar su desempeño energético. Para ello, además del análisis técnico de las alternativas propuestas, resulta necesario establecer su viabilidad económica, de manera que las soluciones planteadas respondan a criterios de eficiencia, sostenibilidad y factibilidad de implementación.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el impacto energético, económico y ambiental de la implementación, en fase de diseño, de estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables en el edificio Taypi, perteneciente al Instituto Tecnológico Bolivia Mar de la ciudad de El Alto?

1.4. JUSTIFICACIÓN

La actual crisis de los recursos con fines energéticos producto de la clara dependencia internacional y nacional hacia fuentes de origen no renovable, precisa replantear el modelo de gestión de los mismos, con el objetivo de reducir el creciente uso de combustibles de origen fósil y garantizar un uso adecuado de los recursos empleados.

El aumento poblacional y los cambios de modos de vida conllevan a elevar los niveles de consumo y de servicios. En el ámbito edilicio, en la medida en que la satisfacción de las necesidades de confort de los usuarios depende cada vez menos de la respuesta arquitectónica, aumenta la dependencia de sistemas e instalaciones que consumen energía en gran medida obtenida principalmente a partir del uso de recursos no renovables.

Conceptos como el uso racional de la energía (URE), la disminución del consumo, la EE, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros, se utilizan a diario pero generalmente con escaso conocimiento por parte de quienes los transmiten, puesto suele confundirse el término eficiencia con eficacia, sin tener en cuenta que se puede ser eficaz consiguiendo un determinado objetivo y totalmente ineficiente si se utiliza una cantidad innecesaria de recursos para lograrlo. (Plazas_López, 2006)

Es por lo expuesto que la introducción de estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables en el sector edilicio, incentivará a más investigaciones similares ya que se consideran parámetros de diseño acordes a las necesidades actuales, a su vez se analiza la viabilidad económica del diseño que se plantea en el presente trabajo. Al respecto se destaca que, cuando se habla de la eficiencia energética e integración de energías renovables en la edificación, se habla también del uso racional de la energía, esto es, sin sacrificar el confort de los usuarios.

1.4.1. Justificación Técnica

La implementación de estrategias de eficiencia energética (EE) y la integración de energías renovables en el sector edilicio de la ciudad de El Alto, Bolivia, es esencial para abordar los desafíos técnicos derivados del elevado consumo energético en la ciudad, que depende en gran medida de fuentes no renovables.

El crecimiento urbano, el aumento de la población y el cambio en los patrones de consumo han incrementado la demanda de servicios y confort, lo que implica un mayor consumo de energía, especialmente en edificaciones que no están optimizadas para el uso eficiente de los recursos.

En este contexto, el Instituto Tecnológico Bolivia Mar constituye un espacio estratégico para aplicar y adaptar tecnologías eficientes, como sistemas fotovoltaicos, a las necesidades locales. El aprovechamiento de estas tecnologías y de las energías renovables permite optimizar el rendimiento de las instalaciones y contribuir a un entorno edilicio más sostenible.

1.4.2. Justificación Económica

En el ámbito económico, la implementación de estrategias de eficiencia energética y energías renovables en El Alto tiene un impacto significativo en la reducción de costos operativos a largo plazo. A pesar de que la inversión inicial en soluciones tecnológicas como paneles solares, aislantes térmicos y sistemas eficientes de calefacción puede ser alta, el ahorro en el consumo energético de la red convencional, especialmente en una ciudad como El Alto, se convierte en una ventaja económica considerable.

La integración de estas soluciones en el Instituto Tecnológico Bolivia Mar no solo representa una inversión en la sostenibilidad del centro educativo, sino también en la viabilidad económica del proyecto, ya que se podrían aprovechar incentivos fiscales locales para proyectos de energías renovables.

1.4.3. Justificación Ambiental

Desde una perspectiva ambiental, la transición hacia la eficiencia energética y la integración de energías renovables en las edificaciones de El Alto, y específicamente en el Instituto Tecnológico Bolivia Mar, es una necesidad urgente para mitigar los impactos ambientales derivados del consumo energético tradicional.

El Alto, debido a su altitud y clima frío, enfrenta mayores demandas energéticas para calefacción, lo que genera una elevada huella de carbono debido a la quema de combustibles fósiles. Implementar estrategias de eficiencia energética y energías renovables en este contexto no solo reduciría el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también contribuiría a la preservación de los recursos naturales.

La integración de sistemas fotovoltaicos y tecnologías eficientes de calefacción reduciría la dependencia de la red convencional, contribuyendo a disminuir la contaminación del aire en áreas urbanas como El Alto y promoviendo un entorno más saludable para la comunidad educativa y los habitantes.

Al adoptar estas soluciones, el Instituto Tecnológico Bolivia Mar no solo se alinearía con los objetivos de sostenibilidad globales, sino que también podría ser un referente para futuras iniciativas de construcción sostenible en la ciudad.

1.5. HIPÓTESIS

La introducción de estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables en el edificio Taypi, perteneciente al Instituto Tecnológico Bolivia Mar de la ciudad de El Alto, en fase de diseño, conllevará a una disminución de la demanda energética, conducente a un menor impacto ambiental y ahorro de los recursos.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo General

Proponer estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables, a través de un análisis técnico y normativo desde la fase de diseño, para optimizar el consumo eléctrico y promover la sostenibilidad ambiental en el Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar de la ciudad de El Alto.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico energético del caso de estudio mediante el análisis de sus características climáticas, arquitectónicas, energéticas y funcionales.
- Plantear estrategias de eficiencia energética desde la fase de diseño en el caso de estudio, priorizando los sistemas con mayor incidencia en el consumo energético.
- Diseñar un sistema solar fotovoltaico para el caso de estudio, que permita cubrir la demanda energética anual proyectada del Edificio Taypi.
- Evaluar la viabilidad económica del diseño planteado en el caso de estudio mediante indicadores económicos simplificados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONTEXTUAL Y NORMATIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética se ha consolidado a nivel internacional como una estrategia clave para reducir el consumo de energía, mitigar los impactos ambientales asociados al uso intensivo de combustibles fósiles y mejorar la sostenibilidad del sector edilicio. Los edificios representan una porción significativa del consumo energético global, principalmente debido a los sistemas de iluminación, climatización y equipamiento eléctrico, por lo que su diseño y operación eficiente resultan determinantes en el contexto de la transición energética y el desarrollo sostenible. (OLADE, 2019)

En este marco, diversos organismos internacionales y normativas técnicas han establecido lineamientos orientados a promover el uso racional de la energía en edificaciones. Entre ellos, destaca la Norma ISO 50001, que propone la implementación de sistemas de gestión energética aplicables a organizaciones de distinto tipo y escala, permitiendo mejorar el desempeño energético de manera sistemática y verificable. (ISO_50001, 2011)

A nivel nacional, Bolivia ha incorporado progresivamente políticas, programas y marcos normativos orientados a la eficiencia energética y al fomento de las energías renovables, con especial énfasis en el sector público y en las edificaciones de uso colectivo. Estas iniciativas reconocen la importancia de que los edificios educativos y estatales funcionen como referentes en el uso eficiente de la energía, integrando criterios técnicos, ambientales y económicos desde la fase de diseño. (MHE, 2022)

En el contexto de la presente investigación, el marco contextual y normativo constituye la base para analizar la incorporación de estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables en el Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar. La aplicación de estos criterios desde la fase de diseño permite no solo optimizar el consumo energético futuro del edificio, sino también orientar decisiones técnicas relacionadas con iluminación eficiente, control por atenuación e implementación de sistemas fotovoltaicos adaptados a las condiciones particulares de la ciudad de El Alto. (IEA, 2015)

Tabla 1

Principales marcos normativos y programas de eficiencia energética aplicables al sector edilicio

Norma / Programa	Alcance	Enfoque principal	Aplicación al sector edilicio
ISO 50001: Sistemas de gestión de la energía	Internacional	Establecer un sistema de gestión para mejorar el desempeño energético, optimizar el uso y consumo de la energía y reducir impactos ambientales.	Aplicable a edificaciones públicas y privadas, permite gestionar de manera sistemática el consumo energético durante la operación del edificio.
Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien (Ley N°300)	Nacional (Bolivia)	Promover el uso racional de los recursos naturales, la sostenibilidad ambiental y la reducción de impactos ambientales.	Brinda el marco legal para la incorporación de criterios de eficiencia energética y sostenibilidad en edificaciones públicas y educativas.
Programa Nacional de Eficiencia Energética	Nacional (Bolivia)	Reducir el consumo energético mediante acciones de eficiencia, educación y modernización tecnológica.	Incentiva la aplicación de medidas de ahorro energético en edificaciones, especialmente del sector público.
Estrategia Nacional de Eficiencia Energética 2022–2025	Nacional (Bolivia)	Definir lineamientos, objetivos y acciones para mejorar la eficiencia energética en distintos sectores.	Identifica al sector edilicio como un área prioritaria para la implementación de estrategias de eficiencia energética.
Plan para el Desarrollo de las Energías Alternativas 2025	Nacional (Bolivia)	Fomentar la incorporación de energías renovables en la matriz energética nacional.	Promueve la integración de sistemas fotovoltaicos y otras fuentes renovables en edificaciones.
Indicadores de Eficiencia Energética (IEA)	Internacional	Establecer indicadores para evaluar el desempeño energético en distintos sectores.	Sirve como referencia para el análisis comparativo del consumo energético en edificaciones.
Lineamientos ASHRAE para edificios	Internacional	Optimizar el diseño y operación de sistemas energéticos en edificaciones.	Referencia técnica para el diseño eficiente de sistemas de iluminación y otros sistemas energéticos.

Nota. Elaboración Propia con base en ISO_50001 (2011), Ley N°300 (2012), OLADE (2019), IEA (2015), ASHRAE (2019), MHE (2022), Energías Alternativas (2014), 2026.

2.1.1. Eficiencia energética y sostenibilidad en el sector edilicio

El sector edilicio constituye uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial, debido a la operación continua de sistemas de iluminación, climatización y equipamiento eléctrico. Esta realidad ha motivado que la eficiencia energética sea considerada un pilar fundamental dentro de los enfoques de sostenibilidad aplicados a edificaciones, ya que permite reducir la demanda energética sin comprometer la funcionalidad ni el confort de los usuarios. En este sentido, la eficiencia energética se concibe no solo como una medida tecnológica, sino como una estrategia integral que articula diseño, operación y gestión del edificio. (IEA, 2015)

Desde una perspectiva sostenible, la aplicación de criterios de eficiencia energética en edificaciones contribuye directamente a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, al uso racional de los recursos naturales y a la reducción de costos operativos en el ciclo de vida del edificio.

En particular, los edificios públicos y educativos adquieren un rol estratégico, ya que su impacto trasciende el aspecto técnico y se proyecta como un ejemplo formativo y replicable para la sociedad. Diversos estudios en América Latina señalan que la implementación de medidas de eficiencia energética en edificaciones educativas genera beneficios ambientales, económicos y sociales de manera simultánea. (García J. & Rivera M., 2020)

Asimismo, el enfoque de eficiencia energética en el sector edilicio ha evolucionado desde intervenciones puntuales hacia estrategias integrales que se incorporan desde la fase de diseño. Estas estrategias incluyen la optimización de la envolvente, el aprovechamiento de la iluminación natural, la selección eficiente de sistemas de iluminación artificial y la integración progresiva de energías renovables. Bajo este enfoque, la eficiencia energética se convierte en un componente esencial para el desarrollo de edificaciones sostenibles, especialmente en contextos urbanos y climáticos particulares como los de las ciudades altas, donde las condiciones ambientales influyen de manera directa en el desempeño energético. (UMSA, 2020)

2.1.2. Sistema de gestión de la energía: Norma ISO 50001

La Norma Internacional ISO 50001 establece los lineamientos para que las organizaciones implementen un sistema de gestión de la energía orientado a mejorar

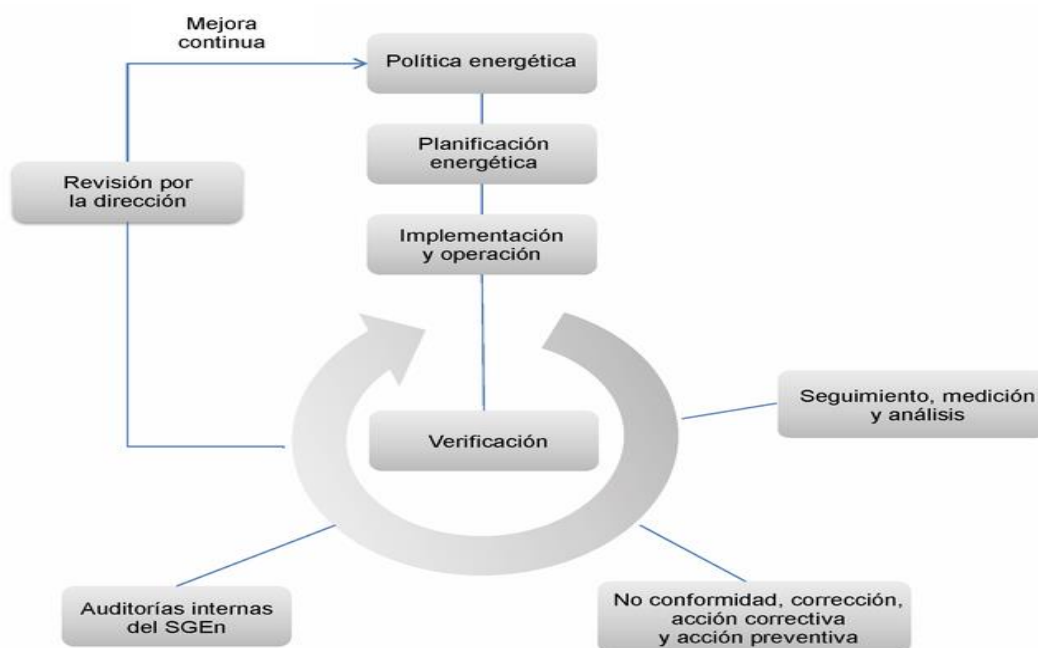
de manera continua su desempeño energético, considerando la eficiencia energética, el uso y el consumo de la energía. (ISO_50001, 2011)

Su aplicación permite reducir los costos energéticos y los impactos ambientales asociados, incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante una gestión sistemática basada en políticas, objetivos, metas y planes de acción. Esta norma es aplicable a organizaciones de todo tipo y tamaño, independientemente de su contexto geográfico o social, y su eficacia depende principalmente del compromiso de la alta dirección y de la participación de todos los niveles de la organización. (ISO_50001, 2011)

Esta Norma Internacional se basa en el ciclo de mejora continua Planificar, Hacer, Verificar, Actuar (PHVA) e incorpora la gestión de la energía a las prácticas habituales de la organización tal como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Modelo de sistema de gestión de la energía para esta Norma Internacional



Nota. ISO_50001, 2011

2.1.3. Políticas y programas de Eficiencia Energética en Bolivia

Con el Decreto Supremo No. 29466 de 5 de marzo de 2008, se aprueba El Programa Nacional de Eficiencia Energética, como parte del Programa “Electricidad para vivir

con dignidad”, con la finalidad de establecer acciones políticas y ejecutar proyectos que buscan optimizar el uso racional eficiente y eficaz de la energía.

La visión de este decreto establece que: “El País está caracterizado por un sector eléctrico eficiente y que cuenta con una infraestructura que es capaz de satisfacer la demanda interna, facilitando el acceso universal al servicio público de electricidad con equidad, aprovechando las fuentes energéticas disponibles de forma racional y sostenible; se ha logrado establecer una legislación ambiental y se ha iniciado un proceso de exportación de electricidad a los países vecinos, con participación de los sectores privado y público; logrando situar a Bolivia como el centro energético Sudamericano, preservando la soberanía y seguridad energética nacional.”

Figura 2

Programa nacional de eficiencia energética



Nota. Elaboración propia, 2026.

En este marco el Programa Nacional de Eficiencia Energética, pretende cumplir con esta visión a través de su implementación y de la acción conjunta de sus actores: sector público, privado, gobiernos locales y sociedad civil.

2.1.4. Marco normativo para Generación de electricidad y energías renovables

En Bolivia, el marco normativo para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables se consolida con la promulgación del Decreto Supremo N° 2048, emitido

el 2 de julio de 2014. Este decreto tiene como objetivo principal promover la diversificación de la matriz energética nacional, incentivando el uso de fuentes renovables como la energía solar, eólica, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas. De esta manera, se busca reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados a la generación convencional de electricidad. (Decreto supremo Nro. 2048, 2014)

El decreto establece condiciones regulatorias que permiten la incorporación progresiva de proyectos de generación eléctrica renovable al Sistema Interconectado Nacional, reconociendo su aporte a la sostenibilidad energética del país. Asimismo, plantea la necesidad de crear un entorno favorable para el desarrollo de este tipo de proyectos, considerando tanto aspectos técnicos como económicos, con el fin de asegurar su viabilidad a largo plazo y su compatibilidad con el sistema eléctrico existente.

Uno de los aspectos centrales del Decreto Supremo N° 2048 es la definición de un sistema de remuneración para la energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables. Para ello, la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad establece un valor de ajuste por adaptabilidad, el cual se aplica al precio nodo de la energía generada. Este mecanismo tiene como finalidad compensar las particularidades técnicas y económicas de las energías renovables, permitiendo que estas tecnologías puedan competir en el mercado eléctrico nacional en condiciones más equitativas. (Decreto supremo Nro. 2048, 2014)

2.1.5. Generación Distribuida y uso de energías renovables en edificaciones

El Decreto Supremo N° 4477, promulgado el 24 de marzo de 2021 en Bolivia, establece las condiciones generales para regular la actividad de Generación Distribuida en los sistemas de distribución de energía eléctrica del país. La Generación Distribuida se define como un sistema de generación descentralizado, instalado en el lugar de consumo, de pequeña a mediana escala, utilizando fuentes renovables y conectando a la red de distribución para inyectar sus excedentes de generación. Este enfoque busca reducir la dependencia de combustibles fósiles, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar la eficiencia energética. (Decreto Supremo Nro. 4477, 2021)

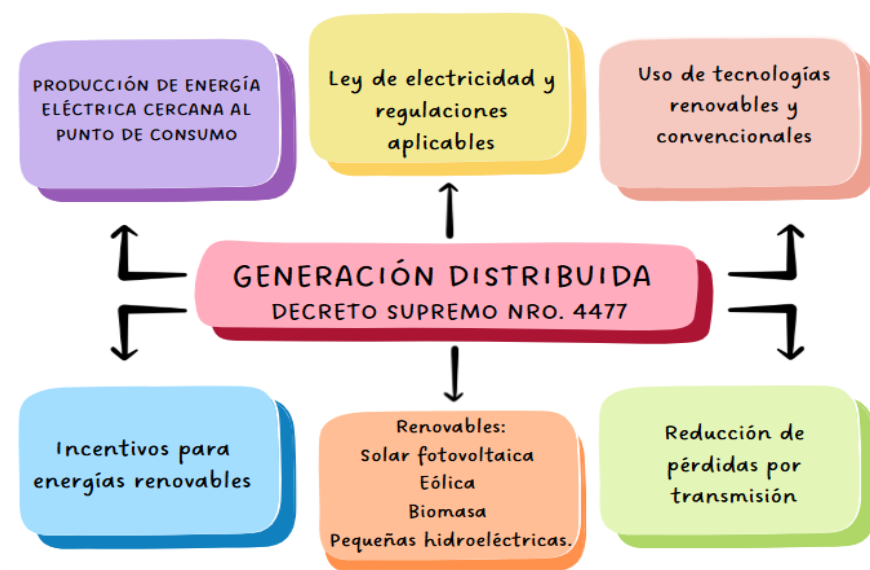
El decreto clasifica la potencia instalada para la Generación Distribuida en tres categorías:

- **Nanogeneración Distribuida:** Potencia instalada menor o igual a 10 kW.
- **Microgeneración Distribuida:** Potencia instalada mayor a 10 kW y menor o igual a 50 kW.
- **Minigeneración Distribuida:** Potencia instalada mayor a 50 kW y menor o igual a 350 kW.

Estas categorías permiten una regulación más precisa y adecuada a las características de cada tipo de instalación.

Para la incorporación de la Generación Distribuida, el decreto establece que el distribuidor autorizará la conexión de la instalación a su red de distribución. Toda instalación debe ser realizada por empresas instaladoras especializadas, debidamente registradas y habilitadas. Además, cuando un generador distribuido desee inyectar su excedente de energía eléctrica, el distribuidor u operadores eléctricos estarán a cargo de la conexión y adecuación, incluyendo la colocación del equipo de medición y otros accesorios necesarios. Los costos en los que incurra el distribuidor serán deducidos de la retribución del generador distribuido, según lo establecido por el Ente Regulador del sector eléctrico.

Figura 3
Generación distribuida



Nota. Elaboración propia en base al decreto supremo 4477_2021, 2026.

En cuanto a la retribución por la energía eléctrica inyectada a la red de distribución, el Ente Regulador del sector eléctrico establecerá, mediante Resolución Administrativa, el mecanismo de retribución considerando criterios como el desarrollo del mercado eléctrico, las categorías de consumo y la energía consumida por el generador distribuido. Este mecanismo busca incentivar la participación de los usuarios en la generación de energía renovable y garantizar una compensación justa por la energía que aportan a la red. (Decreto Supremo Nro. 4477, 2021)

2.1.6. Plan para el Desarrollo de las Energías Alternativas 2025

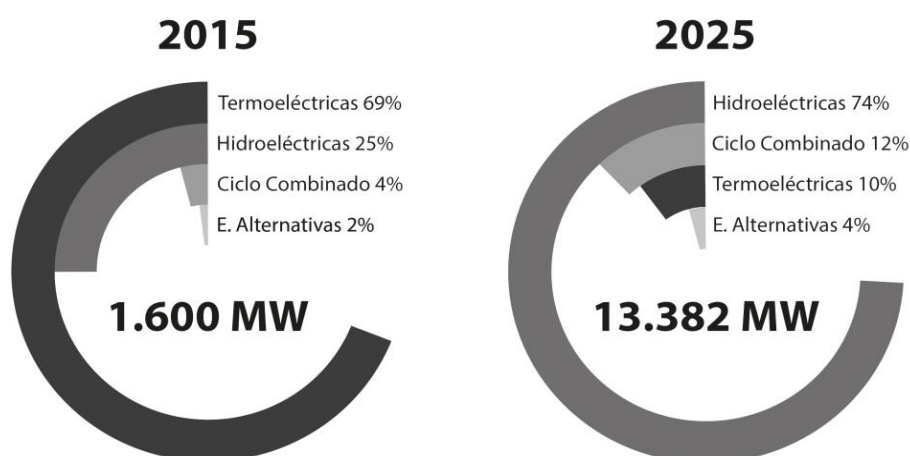
En el marco de la política de energías renovables para el sector eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia, el Ministerio de Hidrocarburos y Energías, a través del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, presenta el Plan para el Desarrollo de Energías Alternativas en Bolivia 2025, preparado con las directrices de la Agenda Patriótica del Bicentenario y el Plan de Electricidad del Estado Plurinacional de Bolivia 2025.

El Plan para el Desarrollo de las Energías Alternativas 2025 tiene como objetivo principal diversificar la matriz energética de Bolivia, promoviendo el uso de fuentes de energía renovables como la solar, eólica, biomasa e hidroeléctrica de pequeña escala.

Este plan busca reducir la dependencia de los combustibles fósiles, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética en el país. La implementación de este plan se enmarca en el compromiso de Bolivia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y su intención de contribuir a la lucha global contra el cambio climático.

En este sentido, el Plan 2025 también establece metas concretas para aumentar la participación de las energías alternativas en la generación total de electricidad en el país. Se prevé que para 2025, Bolivia alcance un porcentaje significativo de su capacidad de generación eléctrica a partir de fuentes renovables, lo que no solo contribuirá al cuidado del medio ambiente, sino también a la creación de empleo y al desarrollo de nuevas tecnologías en el sector energético.

Figura 4
Plan de la Energía Eléctrica para el 2025



Nota. <https://fundacionsolon.org/2017/11/01/elplandeenergiaelectricaparael2025/>, 2025.

2.1.7. Antecedentes y situación actual de la eficiencia energética en Bolivia

En 1994 se iniciaron las actividades del Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP) en Bolivia para el desarrollo de tres componentes fundamentales en el sector de la energía, todos ellos con fuerte impacto sobre el medio ambiente y la democratización al acceso a la energía, a nombrar: i) la energía rural, entendida como la ampliación del acceso a la energía a las poblaciones rurales a través del uso de distintas tecnologías que se adapten a las características de dichas poblaciones, entre ellas la energía fotovoltaica; ii) el aprovechamiento de la biomasa en condiciones racionales, incluía el uso de leña y residuos industriales a nivel de los hogares y de la actividad productiva; finalmente iii) la eficiencia energética, con especial énfasis en los sectores productivos como el industrial manufacturero. (Energías, 2022)

Como parte de sus actividades se llevan a cabo las primeras experiencias de auditorías energéticas en la industria manufacturera con la participación de expertos internacionales, quienes, además de llevar adelante las auditorías, capacitan a personal local.

El año 2008 da inicio al Programa Nacional de Eficiencia Energética, cuyas primeras actividades se concentraron en el sector residencial promoviendo la sustitución de 9 millones de lámparas incandescentes por lámparas de neón “ahorradoras”, con ello se

estima que se pasa de 92 a 100 MW; asimismo, se hace incidencia en el desplazamiento del consumo fuera de las horas pico. (MHE, 2022)

La Corporación Interamericana de Inversiones (CII) crea el programa GREEN PYME para proporcionar a las empresas servicios de asesoramiento tales como capacitación y auditorías energéticas, a fin de ayudar a aumentar su competitividad mediante la reducción de sus costos de energía, al mismo tiempo que reduce la emisión de gases de efecto invernadero que genera la actividad empresarial, contribuyendo de esta manera a reducir el calentamiento global. (MHE, 2022)

2.1.8. Desarrollo de la Estrategia Nacional de Eficiencia Energética

La Estrategia Nacional de Eficiencia Energética tiene el propósito de establecer una visión y ruta sobre cómo avanzar en la creación de condiciones favorables para la penetración y consolidación de la EE (Eficiencia Energética) en el país, desde una situación base consensuada. Fungirá como instrumento de arranque, ejecución y monitoreo de la Política de EE y también contribuyendo favorablemente al cumplimiento de la Agenda Patriótica 2025.

Figura 5

Política PNEE, Estrategia ENEE y Planes Operacionales



Nota. MHE, 2022

La Estrategia define y organiza las acciones que, en función de los objetivos estratégicos, deben monitorearse. No es función de la Estrategia definir una planificación exhaustiva ni un diseño detallado de los programas de EE. En cambio, sí debe generar un marco y enfoque de cómo organizar y orientar los esfuerzos de un ecosistema de actores. El diseño de la Estrategia parte de un diagnóstico de una situación base y definirá indicadores de desempeño, con los cuales poder monitorear el correcto avance, ajustar o corregir su curso (MHE, 2022)

2.1.9. Potencial energético procedente de Energías Alternativas

El potencial de las fuentes de energías alternativas en Bolivia se encuentra distribuido en todo el territorio nacional. La energía solar es aplicable en general en todas las regiones pero con mayor preeminencia en la del altiplano; la energía eólica es predominantemente en los departamentos de Cochabamba, Santa Cruz y en parte del altiplano; mientras que los recursos geotérmicos estudiados a la fecha son promisorios en el sudoeste de Potosí y las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa se encuentra principalmente en la zona oriental en los departamentos de Santa Cruz, Beni, Pando y el norte de La Paz. (Energías_Alternativas, 2014)

Figura 6

Mapa de potencial energético procedente de energías alternativas



Nota. MHE, 2022

Por su parte, el recurso hídrico se halla en las diferentes cuencas y ríos y su mayor potencial reside en las zonas cercanas al denominado nudo de Apolobamba en el departamento de La Paz, que es el punto donde la Cordillera de Los Andes se divide en Cordillera Real y Cordillera Occidental. Destaca que existe también un considerable potencial en los ríos de Cochabamba, Santa Cruz y otros departamentos. (Energías_Alternativas, 2014)

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. El sector edilio como consumidor de energía

En América Latina y el Caribe, el sector edilio representa aproximadamente el 28% del consumo total de energía, situándose como el segundo mayor consumidor después del sector transporte. (CEPAL, 2024) En países como Argentina, este sector es responsable del 40% del consumo energético y del 37% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). (Garzón, 2023)

En Bolivia, aunque el sector industrial ha mostrado un crecimiento significativo en el consumo energético, el sector residencial también consume una porción considerable de energía, principalmente en forma de gas natural, electricidad y gas licuado de petróleo (GLP).

Estas cifras subrayan la importancia de implementar medidas de eficiencia energética en el sector edilio para reducir el consumo de recursos naturales y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en la región.

En el mundo, el sector de las edificaciones es el mayor sector que contribuye con un tercio de las emisiones globales de contaminantes. Las edificaciones residenciales y comerciales consumen el 40% de la energía, 25% del agua, 40% de los recursos globales y 60% de la electricidad. (Alvarez_García, 2013)

El uso de la energía es para calentamiento, enfriamiento de espacios, ventilación, agua, calentamiento de agua, etc. Para la construcción de edificaciones, los recursos que se utilizan son el 20% de agua, 40% de energía y 30% recursos minerales, y por lo tanto, las edificaciones emiten: 40% de dióxido de carbono, 30% de residuos sólidos y 20% de agua residual. En total se emplean 20% de los recursos para la construcción y 80% para la operación y uso de la edificación. (Alvarez_García, 2013)

Actualmente, debido a que los recursos son finitos y contaminan hay una preocupación seria de considerar en el diseño de las edificaciones la influencia del clima. Así, en la actualidad el aprovechamiento de los recursos naturales, en particular la energía solar debe incluirse en cada paso del diseño de una edificación. Con esta idea surge el concepto de Edificación Sustentable. (Alvarez_García, 2013)

2.2.2. Edificaciones sustentables y uso racional de la energía

Las edificaciones sustentables son aquellas diseñadas, construidas y operadas de manera que minimicen el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, desde la planificación hasta su demolición o reutilización. Estas edificaciones no solo buscan reducir el consumo de recursos naturales, sino también optimizar su eficiencia energética, gestionar adecuadamente el agua y promover el uso de materiales ecológicos. (ONU-Hábitat, 2020)

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 40% del consumo global de energía y de la emisión de gases de efecto invernadero (ONU-Hábitat, 2020), lo que subraya la necesidad urgente de adoptar prácticas más sostenibles en este ámbito.

Además, las edificaciones sustentables integran aspectos de diseño que favorecen el uso de la luz natural, la ventilación cruzada y el aislamiento térmico adecuado, lo cual contribuye significativamente a la reducción del consumo de energía para calefacción y refrigeración.

De acuerdo con un informe de la International Energy Agency (IEA), los edificios de bajo consumo energético pueden reducir hasta un 50% de la demanda de energía en comparación con los edificios convencionales, lo que representa un ahorro significativo a nivel económico y ambiental (IEA, 2015). Así, la implementación de prácticas sustentables en la edificación se convierte en un componente esencial en la lucha contra el cambio climático.

Las normativas y certificaciones internacionales, como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) y Passivhaus, juegan un papel crucial en la promoción de edificaciones sustentables. Estas certificaciones brindan un marco para evaluar y mejorar el rendimiento ambiental de los edificios, asegurando que se

cumplan los estándares más exigentes en términos de eficiencia energética, reducción de residuos, calidad del aire interior y uso de recursos renovables. (USGBC, 2021)

La adopción de estos estándares no solo mejora la sostenibilidad de los edificios, sino que también incrementa su valor en el mercado, ya que los consumidores y las empresas valoran cada vez más los beneficios ambientales y económicos asociados con las edificaciones sustentables. (USGBC, 2021)

2.2.3. Eficiencia energética en la edificación

La eficiencia energética en la edificación es un enfoque fundamental para reducir el consumo de energía en los edificios, maximizando el rendimiento de los recursos energéticos utilizados y minimizando el impacto ambiental. Se refiere a la implementación de tecnologías y prácticas que permiten que un edificio consuma la menor cantidad de energía posible para satisfacer sus necesidades, sin sacrificar el confort de los ocupantes. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2015), la mejora de la eficiencia energética en los edificios es una de las estrategias más efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático.

Para constructores y desarrolladores, la cantidad de dinero que se puede ahorrar mediante la implementación de medidas de eficiencia energética depende de varios factores, como el tipo de medidas implementadas, el tamaño y uso del edificio, y los costos de energía en la región. Sin embargo, se estima que los ahorros pueden oscilar entre un 20% y un 50% en los costos de energía. (Niño, 2023)

La eficiencia energética se refiere a la optimización del consumo de energía para lograr un mayor rendimiento con una menor cantidad de recursos energéticos utilizados.

La eficiencia energética en la construcción tiene un impacto ambiental positivo significativo. Al reducir el consumo de energía, se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero y se contribuye a la mitigación del cambio climático. Además, la eficiencia energética también reduce la necesidad de extraer y consumir recursos naturales no renovables. Otros beneficios incluyen, un mayor confort y bienestar en el interior de los edificios, una mayor durabilidad de los sistemas y equipos, y una mejora en la calidad del aire interior. (Niño, 2023)

Algunos ejemplos de medidas de eficiencia energética en la construcción incluyen:

- Uso de sistemas de climatización y ventilación eficientes, que reducen la pérdida o ganancia de calor en los edificios.
- Instalación de ventanas de doble acristalamiento para mejorar el aislamiento térmico y acústico.
- Uso de electrodomésticos y equipos con certificación de eficiencia energética.
- Implementación de sistemas de gestión energética y control inteligente para optimizar el consumo de energía en los edificios.

2.2.4. Indicadores de Eficiencia Energética en edificios

Los indicadores de eficiencia energética en edificios son herramientas fundamentales para evaluar el desempeño energético de los edificios y para medir el impacto de las políticas y estrategias implementadas en la mejora de la eficiencia energética. Estos indicadores permiten a los profesionales del sector, a los gobiernos y a los usuarios finales identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para optimizar el consumo de energía.

A nivel global, se han desarrollado diversos indicadores para evaluar la eficiencia energética, como el consumo energético por unidad de superficie, el rendimiento de los sistemas de climatización, iluminación y otros equipos, y el análisis de la huella de carbono del edificio. En América Latina, el uso de estos indicadores está ganando importancia a medida que los países reconocen la necesidad de optimizar sus recursos energéticos para enfrentar el crecimiento urbano y la demanda de energía. (Sánchez F. & López M, 2021)

En Bolivia, los indicadores de eficiencia energética son esenciales para comprender cómo los edificios contribuyen al consumo general de energía en el país. El Ministerio de Energía y la Autoridad de Regulación y Fiscalización de Electricidad y Tecnología (AE) han comenzado a desarrollar métricas nacionales para evaluar la eficiencia energética en la edificación, centrándose en aspectos como el consumo específico de energía (energía utilizada por metro cuadrado de superficie construida) y el coeficiente de eficiencia energética de los sistemas de calefacción y refrigeración. (MHE, 2022)

Estos indicadores permiten realizar un seguimiento del rendimiento energético de los edificios y sirven como base para la implementación de políticas públicas orientadas a la eficiencia energética.

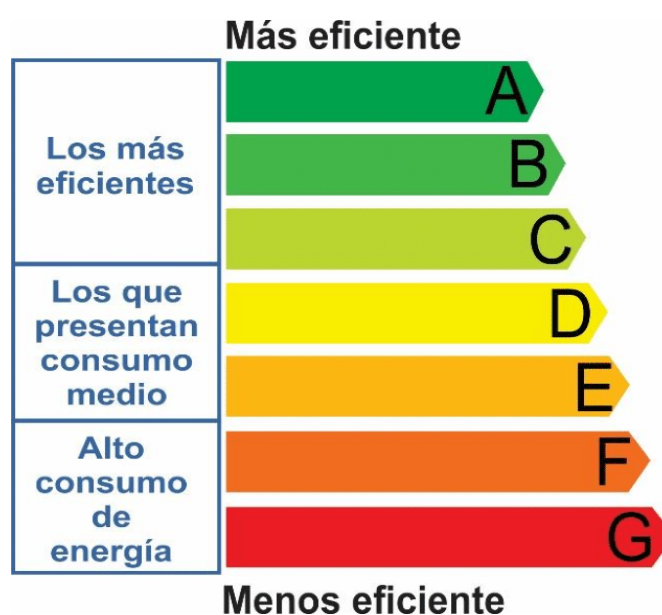
El concepto de eficiencia energética integrada también es clave en el desarrollo de estos indicadores. En este enfoque, no solo se evalúa el consumo energético de los edificios, sino también el impacto de las energías renovables integradas en el sistema edilicio, como los paneles solares o los sistemas de recolección de agua lluvia.

Según un informe de la Red Latinoamericana de Energía (2020), la combinación de fuentes de energía renovables y la eficiencia energética se está convirtiendo en un indicador clave para medir el desempeño energético de los edificios en la región. La implementación de este tipo de indicadores permite a las autoridades y a las empresas de energía evaluar no solo la cantidad de energía consumida, sino también cómo los edificios contribuyen a la sostenibilidad energética en el contexto regional.

En cuanto a los indicadores más comunes utilizados en la región, destacan aquellos que evalúan la intensidad energética, es decir, la cantidad de energía utilizada por cada unidad de producto o actividad realizada dentro del edificio, como la iluminación, climatización y otros usos específicos. (UMSA, 2020)

Figura 7

Etiqueta de indicador de eficiencia energética



Nota. Paucarchuco, 2021.

Estos indicadores proporcionan una visión más detallada del comportamiento energético de los edificios y ayudan a los profesionales a implementar soluciones más efectivas para reducir el consumo de energía sin comprometer el confort de los ocupantes.

En el caso de Bolivia, un estudio realizado por la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) en 2020 concluyó que los edificios en las ciudades más altas del país presentan una eficiencia energética relativamente baja debido a la falta de aislamiento adecuado y a la alta demanda de calefacción, lo que hace que los indicadores de eficiencia energética sean aún más críticos para la mejora en la calidad de vida. (UMSA, 2020)

2.2.5. Estrategias de Eficiencia Energética aplicables en edificios

En los últimos años, hemos visto cómo la eficiencia energética en edificios es una obligación para nuestro planeta, pero también para que el gasto en energía se reduzca. En un artículo de (RTS, 2021) se ve ocho maneras de mejorar la eficiencia energética en los edificios, las mismas se detallan a continuación:

a) Uso de iluminación de bajo consumo

Las bombillas de bajo consumo son una forma de ahorrar en la factura de la luz sin renunciar a la cantidad de luz de la que pueden disfrutar los edificios. Hay dos tipos de bombillas, las LED y las de bajo consumo.

b) Doble vidrio en las ventanas

El doble vidrio en las ventanas permite ahorrar energía al conservar mejor tanto el aire acondicionado como la calefacción dentro de los edificios.

c) Cambiar la energía tradicional por energías renovables

Hacer un uso, por ejemplo de los paneles solares también hará que tu edificio sea mucho más eficiente al usar la energía solar.

d) Hacer uso de la luz natural y usar cristales inteligentes

La luz natural permite que tu edificio no necesite hacer uso intensivo de la luz artificial, creando así espacios mucho más cómodos. Además, para aislar los espacios del calor, puedes usar cristales inteligentes que se oscurecen cuando la luz del sol incide en ellos.

e) Utilizar sistemas de refrigeración y calefacciones eco-eficientes e individuales

Es mucho más fácil y efectivo que cada zona tenga un sistema de estas características que se pueda encender de forma individual, y que consuma menos. De esta forma, los espacios en los que no sea necesario su uso, no estarán gastando energía.

f) Plantas y vegetación

Colocar plantas y vegetación también ayuda a refrescar los edificios, con lo que el ahorro en aire acondicionado puede ser notable.

g) Sistemas de ahorro de agua

El ahorro de recursos naturales también es importante para hacer edificios eficientes. Por ello, lo mejor es instalar en los grifos dispositivos para hacer que el agua no se desperdicie.

h) Aislamiento para mejorar la eficiencia energética en edificios

Si bien es cierto que se pueden usar materiales que permitan aislar térmicamente, es más fácil, y sin obra, usar Revecork. Sin duda, es una de las soluciones más fáciles para que tu edificio sea más eficiente. Este producto es un recubrimiento con base de corcho que consigue que una estancia quede perfectamente aislada. (RTS, 2021)

2.2.6. Automatización de edificios en términos de Eficiencia Energética

La automatización aplicada a la eficiencia energética en edificaciones se orienta a optimizar el funcionamiento de los sistemas que consumen energía, mediante mecanismos de control que respondan a las condiciones reales de uso del edificio. En este contexto, no es necesario implementar sistemas complejos de gestión integral, sino soluciones específicas que permitan regular el consumo energético de manera eficiente y técnicamente viable, como ocurre con la automatización de los sistemas de iluminación. (Saltos, 2021)

En el ámbito de la iluminación, la automatización se materializa principalmente a través de tecnologías de regulación del flujo luminoso (dimming), las cuales permiten ajustar la potencia de las luminarias LED en función de criterios como el horario de uso, la ocupación del espacio o las necesidades de seguridad. Este tipo de control

posibilita reducir el consumo eléctrico sin afectar el confort visual, siendo especialmente adecuado para pasillos, gradas y áreas comunes en edificios educativos, donde la iluminación debe permanecer operativa durante amplios periodos, pero no siempre a su máxima potencia. (McGibney, 2016)

Desde el punto de vista funcional, los sistemas de iluminación con dimming incorporan sensores, drivers regulables y dispositivos de control que permiten una gestión flexible y eficiente del alumbrado. Estas soluciones generan datos básicos de operación y consumo que facilitan la supervisión del sistema y la identificación de oportunidades de mejora, contribuyendo a la reducción de costos operativos y al uso racional de la energía eléctrica. De esta manera, la automatización mediante dimming se constituye en una estrategia concreta y accesible para mejorar la eficiencia energética del edificio, sin requerir la implementación de sistemas avanzados de automatización integral. (Enel_X, 2024)

2.3. INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EDIFICACIONES

La integración de energías renovables en edificaciones se ha consolidado como una estrategia fundamental para reducir la dependencia de fuentes convencionales, disminuir las emisiones asociadas al consumo energético y mejorar la sostenibilidad del entorno construido. En el sector edilicio, estas tecnologías permiten complementar las estrategias de eficiencia energética, aportando energía limpia directamente en el punto de consumo y contribuyendo a una gestión energética más racional y descentralizada, especialmente en edificios públicos y educativos (OLADE, 2019).

2.3.1. Energías renovables aplicadas al sector edilicio

El sector edilicio presenta un alto potencial para la aplicación de energías renovables, debido a la disponibilidad de superficies aptas para la captación energética, como cubiertas y fachadas, y a la previsibilidad de sus patrones de consumo.

Entre las principales fuentes renovables utilizadas en edificaciones se encuentran la energía solar fotovoltaica, la solar térmica, la eólica de pequeña escala y, en menor medida, el aprovechamiento de biomasa. Estas tecnologías permiten cubrir parcial o totalmente determinadas demandas energéticas, reduciendo el consumo proveniente de la red eléctrica convencional. (IEA, 2015)

En particular, la energía solar destaca como la alternativa más viable para su aplicación en edificios, debido a su modularidad, facilidad de integración arquitectónica y adaptabilidad a distintos contextos climáticos. En regiones con elevados niveles de radiación solar, como el altiplano boliviano, la incorporación de sistemas solares en edificaciones resulta especialmente favorable, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental, reforzando la transición hacia modelos energéticos más sostenibles. (OLADE, 2019).

Desde una perspectiva funcional, la aplicación de energías renovables en edificios no busca necesariamente el autoabastecimiento total, sino el apoyo a cargas específicas y estratégicas, tales como iluminación, servicios comunes o equipamiento de uso continuo. Este enfoque permite optimizar la relación costo-beneficio de las instalaciones renovables y facilita su integración progresiva dentro de la infraestructura existente o proyectada del edificio (Energías_Alternativas, 2014).

Tabla 2

Principales fuentes de energías renovables aplicables al sector edilicio

Fuente de energía renovable	Aplicación en edificaciones	Ventajas principales	Limitaciones
Solar fotovoltaica	Generación de electricidad para iluminación y servicios comunes	Modular, limpia, fácil integración en cubiertas	Dependencia de la radiación solar
Solar térmica	Producción de agua caliente sanitaria	Alta eficiencia térmica	Uso limitado según demanda
Eólica de pequeña escala	Generación complementaria de electricidad	Aprovecha vientos locales	Requiere condiciones de viento favorables
Biomasa	Producción de energía térmica	Aprovechamiento de residuos	Requiere suministro constante

Nota. Elaboración propia, 2026.

2.3.2. Energía solar fotovoltaica en edificaciones

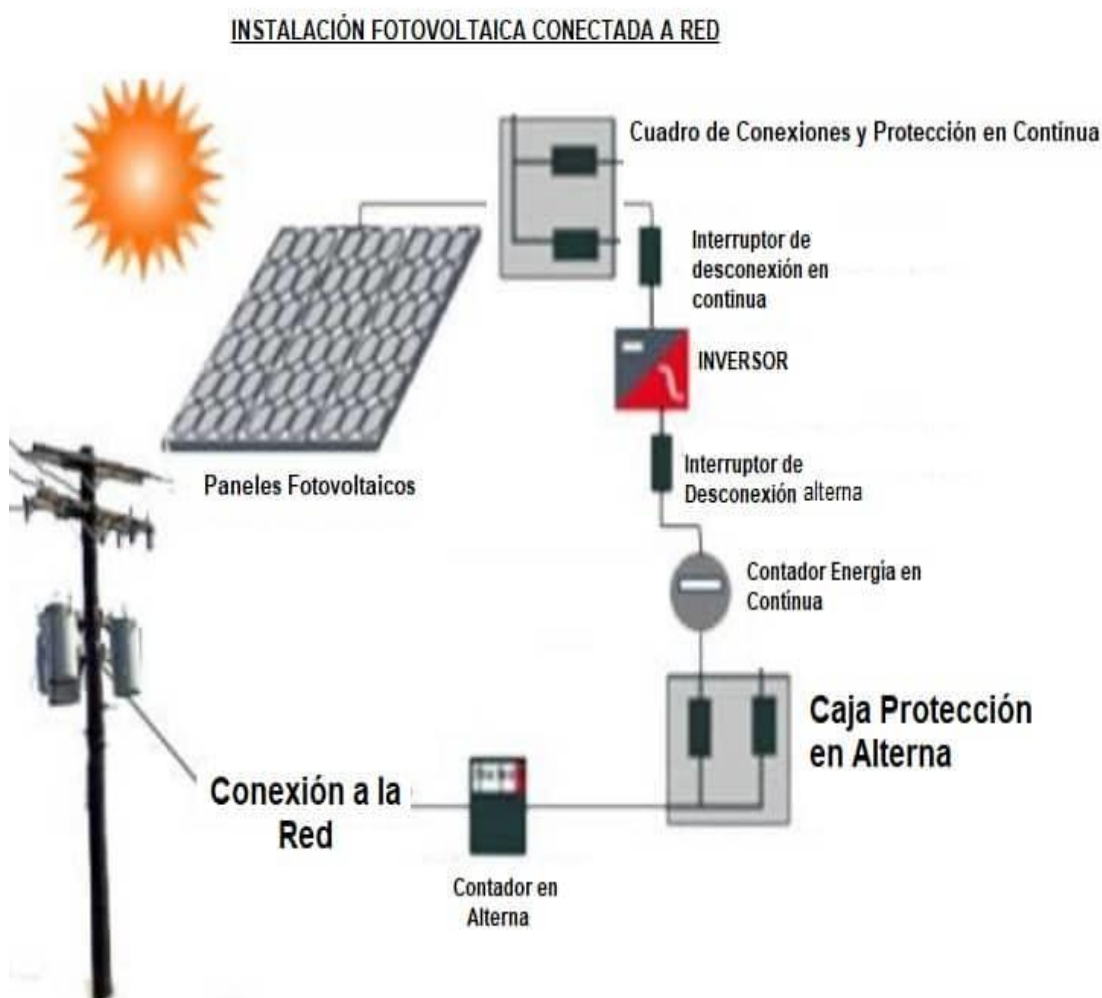
La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de módulos fotovoltaicos, los cuales pueden

integrarse de forma eficiente en edificaciones a través de cubiertas, fachadas u otras superficies disponibles. Esta tecnología se ha consolidado como una de las alternativas más utilizadas en el sector edilicio, debido a su carácter modular, su bajo impacto ambiental durante la operación y la posibilidad de adaptarse a diferentes escalas de consumo energético (Duffie & Beckman, 2013).

En el contexto de las edificaciones, los sistemas fotovoltaicos no necesariamente buscan cubrir la totalidad de la demanda eléctrica, sino aportar energía limpia a cargas específicas y predecibles. Esta estrategia resulta especialmente adecuada para usos como la iluminación, los servicios comunes o equipamientos de operación continua, permitiendo reducir el consumo de energía proveniente de la red y mejorar los indicadores de eficiencia energética del edificio. (Otón, 2009)

Figura 8

Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a red



Nota. <http://areatecnologia.com/electricidad/instalacion-fotovoltaica>, 2026.

Desde el punto de vista técnico, los sistemas fotovoltaicos aplicados a edificaciones pueden operar de manera conectada a la red eléctrica (on-grid), aprovechando la infraestructura existente para inyectar o consumir energía según la disponibilidad solar. Este esquema facilita la integración del sistema, reduce la necesidad de almacenamiento y mejora la viabilidad económica del proyecto, especialmente en edificios ubicados en zonas urbanas con acceso al sistema eléctrico convencional (IEA, 2015).

2.3.3. Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios educativos

La integración de sistemas fotovoltaicos en edificios educativos representa una estrategia particularmente adecuada, debido a los patrones de consumo energético relativamente predecibles y a la función formativa que este tipo de infraestructuras cumple dentro de la sociedad. (Garcia L., 2019)

En estos edificios, la incorporación de energías renovables no solo responde a criterios técnicos y económicos, sino también a un enfoque pedagógico, al convertir al propio edificio en un ejemplo tangible de uso racional de la energía y sostenibilidad ambiental. (Garcia L., 2019)

Desde el punto de vista funcional, los sistemas fotovoltaicos en centros educativos suelen destinarse a la alimentación de cargas específicas, como iluminación de áreas comunes, pasillos, gradas y espacios exteriores, donde los horarios de uso son extensos y, en muchos casos, independientes de la ocupación directa de aulas. Esta selectividad en la integración permite optimizar el tamaño del sistema, mejorar su rendimiento y garantizar una mayor coherencia entre la energía generada y la energía consumida (Garcia J. & Rivera M., 2020).

En contextos urbanos como la ciudad de El Alto, donde las edificaciones educativas cuentan con superficies de cubierta disponibles y elevados niveles de radiación solar, la integración de sistemas fotovoltaicos en techos se presenta como una solución técnica viable.

Además, cuando estos sistemas se articulan con estrategias de eficiencia energética como el uso de iluminación LED y control por atenuación se logra potenciar el impacto energético del sistema fotovoltaico, reforzando el desempeño global del edificio sin necesidad de cubrir la totalidad de la demanda eléctrica (IEA, 2015).

Tabla 3

Comparación conceptual entre sistema fotovoltaico para carga total y sistema fotovoltaico para cargas específicas

Criterio de comparación	Sistema fotovoltaico para carga total del edificio	Sistema fotovoltaico para cargas específicas
Alcance del sistema	Busca cubrir la totalidad o gran parte de la demanda eléctrica del edificio	Se orienta a abastecer únicamente sistemas definidos (iluminación de pasillos, gradas y áreas exteriores)
Potencia instalada requerida	Alta, debido a la diversidad y simultaneidad de cargas eléctricas	Moderada, al limitarse a cargas con consumo estable y predecible
Inversión inicial	Elevada, por mayor número de módulos, inversores y equipos auxiliares	Menor, al optimizar el tamaño del sistema según la demanda objetivo
Complejidad técnica	Alta, requiere mayor coordinación con todos los sistemas eléctricos del edificio	Media, con integración más sencilla a sistemas específicos
Dependencia de la red eléctrica	Menor, pero con mayor exigencia de respaldo y control	Complementaria, opera en conjunto con la red convencional
Flexibilidad de diseño	Limitada, debido a restricciones de espacio y costos	Alta, permite implementación por etapas o ampliaciones futuras
Viabilidad económica	Condicionada por altos costos iniciales y tiempos de retorno prolongados	Más favorable, con períodos de recuperación más cortos
Coherencia con estrategias de eficiencia energética	Requiere previamente una optimización integral del edificio	Se integra directamente con medidas como iluminación LED y control por atenuación (dimming)
Aplicabilidad en edificios educativos	Menos frecuente por restricciones presupuestarias	Altamente adecuada para instituciones educativas públicas
Enfoque del proyecto	Maximizar generación	Optimizar consumo y aporte renovable

Nota. Elaboración propia, 2026.

2.4. BENEFICIOS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES

La aplicación de estrategias de eficiencia energética y la integración de energías renovables en edificaciones no solo responde a criterios técnicos de optimización del

consumo, sino que constituye una herramienta integral para mejorar el desempeño ambiental, económico y funcional de los edificios. (IEA, 2015)

En el caso del sector educativo, estos beneficios adquieren un valor adicional, ya que impactan directamente en la calidad de los espacios de aprendizaje y en la formación de una cultura energética responsable. La combinación de tecnologías eficientes y fuentes renovables permite avanzar hacia modelos edificatorios más sostenibles y coherentes con los desafíos energéticos actuales. (IEA, 2015)

2.4.1. Beneficios energéticos y ambientales

Desde el punto de vista energético, la implementación de medidas de eficiencia permite reducir de forma directa la demanda eléctrica de los edificios, optimizando el uso de la energía sin afectar la funcionalidad de los espacios. La incorporación de iluminación LED, sistemas de control por atenuación y la sectorización de cargas contribuyen a disminuir las horas efectivas de consumo y a mejorar el desempeño energético global del edificio. (Sánchez F. & López M, 2021)

En términos ambientales, la reducción del consumo eléctrico se traduce en una disminución indirecta de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en contextos donde la matriz energética aún depende parcialmente de combustibles fósiles. La integración de sistemas fotovoltaicos refuerza este beneficio al sustituir energía convencional por energía limpia y renovable, reduciendo la huella ambiental asociada al funcionamiento del edificio. (ONU-Hábitat, 2020)

Adicionalmente, el uso de energías renovables en edificaciones educativas contribuye al cumplimiento de políticas ambientales nacionales y compromisos internacionales relacionados con el cambio climático. Estas acciones fortalecen el rol del sector edilicio como actor clave en la transición energética, demostrando que es posible compatibilizar desarrollo, eficiencia y protección ambiental. (OLADE, 2019)

2.4.2. Beneficios económicos y reducción de costos operativos

Uno de los beneficios más relevantes de la eficiencia energética en edificaciones educativas es la reducción progresiva de los costos operativos asociados al consumo de energía eléctrica. La disminución de la demanda energética, especialmente en sistemas de iluminación de uso prolongado como pasillos, gradas y áreas exteriores,

permite generar ahorros económicos sostenidos en el tiempo, lo cual resulta especialmente significativo para instituciones públicas con recursos limitados. (IEA, 2015)

A su vez, la integración de sistemas fotovoltaicos contribuye a reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y a mitigar el impacto de eventuales incrementos tarifarios, al cubrir una parte del consumo con generación propia, mejorando así la estabilidad económica del edificio a lo largo de su vida útil. (IEA, 2015)

Desde una perspectiva de gestión, la reducción de costos operativos libera recursos económicos que pueden ser destinados a otras necesidades institucionales, como mantenimiento, equipamiento o mejoras académicas, fortaleciendo la sostenibilidad financiera del edificio a largo plazo. (European Commission, 2020)

Tabla 4

Relación conceptual entre consumo energético, ahorro anual y reducción de costos operativos en edificios educativos

Aspecto analizado	Situación sin estrategias de eficiencia energética	Situación con estrategias de eficiencia energética y FV
Consumo energético anual	Elevado, asociado a sistemas de iluminación y equipos operando sin control optimizado	Reducido, mediante iluminación eficiente, control por atenuación (dimming) y generación fotovoltaica
Uso de la red eléctrica	Dependencia total de la red convencional	Dependencia parcial, con aporte de generación propia
Ahorro energético anual	Inexistente	Presente, como resultado de la reducción del consumo y del aporte renovable
Costo operativo anual	Alto y variable, sujeto a incrementos tarifarios	Menor y más estable en el tiempo
Impacto económico a largo plazo	Incremento sostenido de gastos operativos	Reducción progresiva de los costos operativos
Gestión presupuestaria institucional	Limitada capacidad de planificación	Mayor previsibilidad y optimización de recursos económicos
Sostenibilidad financiera	Baja	Alta, al combinar eficiencia energética y energías renovables

Nota. Elaboración propia, 2026.

2.4.3. Impacto en el confort y en el proceso de enseñanza-aprendizaje

Las estrategias de eficiencia energética no solo generan beneficios técnicos y económicos, sino que también influyen directamente en el confort de los usuarios del edificio. Un adecuado diseño de la iluminación, con niveles de iluminancia controlados y uniformes, mejora las condiciones visuales en pasillos, gradas y áreas comunes, reduciendo la fatiga visual y aumentando la percepción de seguridad (UNESCO, 2020).

En el ámbito educativo, las condiciones ambientales del edificio inciden en el rendimiento académico y en el bienestar de estudiantes y docentes. Espacios correctamente iluminados y gestionados energéticamente contribuyen a crear entornos más adecuados para el aprendizaje, favoreciendo la concentración y el desarrollo de las actividades académicas (García L., 2019).

Finalmente, la presencia visible de tecnologías eficientes y de sistemas de generación renovable convierte al edificio en una herramienta educativa en sí misma. De esta manera, el centro educativo no solo consume energía de forma más responsable, sino que también promueve valores de sostenibilidad y conciencia ambiental entre su comunidad académica (UNESCO, 2020).

2.5. ESTADO DEL ARTE DE INVESTIGACIONES SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA E INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EDIFICACIONES

2.5.1. Investigaciones internacionales

Primer antecedente. Cui et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada "A Multi-Stage Decision Framework for Optimal Energy Efficiency Measures of Educational Buildings: A Case Study of Chongqing", publicada en la revista Processes. El objetivo del estudio fue desarrollar un marco de decisión para seleccionar estrategias óptimas de eficiencia energética en edificios educativos mediante criterios técnicos, económicos y ambientales.

Los autores emplearon simulaciones energéticas y herramientas de evaluación multicriterio para comparar diferentes alternativas de intervención. Los resultados demostraron que la combinación de varias estrategias de eficiencia energética permite

obtener mayores reducciones del consumo eléctrico y de las emisiones de CO₂ que la aplicación aislada de cada medida.

Este estudio constituye un antecedente relevante para la presente investigación debido a que confirma la importancia de abordar la eficiencia energética mediante un enfoque integral. No obstante, se centra en la rehabilitación de edificios existentes y no incorpora la integración de un sistema fotovoltaico conectado a la red ni el control de iluminación mediante dimming, aspectos que sí forman parte de la propuesta desarrollada para el Edificio Taypi.

Segundo antecedente. Park et al. (2022) desarrollaron la investigación titulada "Energy Savings Potential of Lighting Control Systems in Educational Buildings: A Case Study", publicada en la revista *Energies* (MDPI), indexada en Scopus y Web of Science. El objetivo del estudio fue evaluar el impacto de diferentes estrategias de control inteligente de iluminación en edificios educativos, mediante la implementación de sensores de presencia, sensores de iluminación natural y sistemas de regulación automática del flujo luminoso (dimming).

Para el desarrollo de la investigación, los autores realizaron simulaciones energéticas y mediciones experimentales en un edificio universitario, comparando el consumo eléctrico del sistema de iluminación antes y después de incorporar estrategias de automatización. Los resultados evidenciaron reducciones del consumo energético entre el 25 % y el 45 %, dependiendo del nivel de ocupación de los ambientes y de la disponibilidad de iluminación natural.

Este antecedente guarda una relación directa con la presente investigación, debido a que demuestra la efectividad de los sistemas de control automático de iluminación para disminuir el consumo energético sin afectar las condiciones de confort visual de los usuarios.

No obstante, el estudio se limita al análisis del sistema de iluminación y no considera la integración con sistemas fotovoltaicos ni la evaluación conjunta de indicadores técnicos, económicos y ambientales. En contraste, la presente investigación propone una estrategia integral que combina iluminación eficiente mediante tecnología LED, control por dimming e incorporación de un sistema fotovoltaico conectado a la red para el Edificio Taypi.

2.5.2. Investigaciones latinoamericanas

Antecedente 1. Aristizábal y González (2022) desarrollaron la investigación titulada "Energía solar fotovoltaica en instituciones educativas: caso de estudio ITM campus Robledo", publicada en la revista Semestre Económico. El objetivo del estudio fue evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red en el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), sede Robledo, en Colombia. Para ello, los autores analizaron diferentes escenarios de cobertura de la demanda eléctrica mediante generación fotovoltaica y evaluaron indicadores económicos y ambientales asociados a cada alternativa.

Los resultados demostraron que la incorporación del sistema fotovoltaico permite reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono asociadas al consumo de energía eléctrica de la red, además de generar beneficios económicos derivados de la disminución del consumo energético convencional. El estudio concluye que la alternativa más conveniente corresponde a un escenario de cobertura intermedia, debido a su mejor equilibrio entre inversión inicial, costos de operación y rentabilidad financiera.

Este antecedente presenta una estrecha relación con la presente investigación, ya que ambos estudios analizan la integración de sistemas fotovoltaicos en instituciones educativas mediante una evaluación técnica, económica y ambiental.

Sin embargo, la investigación desarrollada en el ITM se centra exclusivamente en la incorporación de energía solar fotovoltaica, mientras que el presente trabajo propone una estrategia integral que combina medidas de eficiencia energética, iluminación LED, control mediante dimming e integración de un sistema fotovoltaico conectado a la red para el Edificio Taypi, considerando además las condiciones climáticas particulares de la ciudad de El Alto.

Antecedente 2. Duarte et al. (2021) desarrollaron la investigación titulada "Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings", publicada en la revista Journal of Building Engineering (Elsevier), indexada en Scopus y Web of Science. El objetivo del estudio fue desarrollar una metodología basada en Building Information Modeling (BIM) y simulaciones energéticas para optimizar la eficiencia energética de edificios educativos ubicados en

la región amazónica de Brasil. Para ello, los autores evaluaron estrategias relacionadas con el aprovechamiento de la iluminación natural y la ventilación natural, con el propósito de reducir el consumo de energía sin afectar el confort térmico y visual de los usuarios.

Los resultados mostraron que el aprovechamiento de la luz natural permitió reducir el consumo energético entre un 8 % y un 12 %, mientras que la utilización de ventilación natural logró disminuciones adicionales del 7 % al 9 % en el consumo asociado a climatización. Asimismo, los autores concluyen que la integración entre herramientas BIM y simulaciones energéticas constituye una alternativa eficaz para evaluar medidas de eficiencia energética desde las etapas iniciales del diseño de edificaciones educativas.

Este antecedente presenta una estrecha relación con la presente investigación, ya que ambos estudios buscan mejorar el desempeño energético de edificaciones educativas mediante estrategias implementadas desde la fase de diseño.

Sin embargo, el trabajo desarrollado en Brasil se enfoca principalmente en la optimización pasiva del edificio mediante iluminación y ventilación natural, mientras que la presente investigación incorpora además estrategias activas de eficiencia energética, como iluminación LED, control mediante dimming e integración de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, adaptadas a las condiciones climáticas de gran altitud de la ciudad de El Alto.

2.5.3. Investigaciones nacionales

Antecedente 1. Montano Saavedra, Arequipa Saravia y Limachi Ochoa (2020) desarrollaron la investigación titulada "Análisis de la eficiencia en la producción de energía eléctrica para la Central Solar Fotovoltaica de 50 kW conectada a la red en el campus universitario Cota Cota, ubicada en la ciudad de La Paz, Bolivia", publicada en la revista ENERLAC. Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe.

El estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño energético de una central solar fotovoltaica de 50 kW instalada en el campus universitario de Cota Cota de la Universidad Mayor de San Andrés, considerando variables como irradiación solar, temperatura ambiente, energía generada y energía inyectada a la red eléctrica bajo el esquema de generación distribuida.

Los resultados evidenciaron que el sistema fotovoltaico alcanzó una eficiencia cercana al 17 %, destacando la influencia de factores como la limpieza de los módulos, el efecto de sombras y las condiciones ambientales sobre el rendimiento del sistema. Asimismo, los autores resaltan que la elevada radiación solar del altiplano boliviano constituye una condición favorable para la generación fotovoltaica, aunque el adecuado mantenimiento del sistema resulta determinante para conservar su desempeño energético.

Este antecedente constituye una referencia importante para la presente investigación, ya que demuestra la viabilidad técnica de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red en condiciones climáticas similares a las de la ciudad de El Alto. Sin embargo, el estudio se limita al análisis del desempeño de una planta fotovoltaica, mientras que la presente investigación integra estrategias de eficiencia energética, control mediante *dimming* y un sistema fotovoltaico en una infraestructura educativa.

2.5.4. Análisis comparativo de las investigaciones revisadas

La revisión de las investigaciones internacionales, latinoamericanas y nacionales evidencia un creciente interés por el desarrollo de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia energética en edificaciones mediante la incorporación de tecnologías más eficientes y el aprovechamiento de fuentes de energía renovable. En la mayoría de los estudios se reportan resultados favorables relacionados con la reducción del consumo energético, la disminución de emisiones de CO₂ y la mejora del desempeño energético de los edificios.

A nivel internacional, las investigaciones se caracterizan por emplear metodologías avanzadas de simulación energética, herramientas de optimización y sistemas inteligentes de gestión para evaluar diferentes alternativas de intervención. En Latinoamérica predominan estudios enfocados en la integración de sistemas fotovoltaicos y en la implementación de medidas de eficiencia energética en instituciones educativas.

En Bolivia, en cambio, la producción científica sobre esta temática aún es limitada y se concentra principalmente en el análisis del desempeño de sistemas fotovoltaicos, con escasas investigaciones que integren estrategias de eficiencia energética aplicadas al sector edilicio.

De manera general, se observa que la mayoría de los trabajos analizados abordan de forma independiente la eficiencia energética o la generación fotovoltaica. Son pocos los estudios que integran ambas estrategias dentro de una misma propuesta de intervención y menos aún aquellos desarrollados para edificaciones educativas ubicadas en regiones de gran altitud, donde las condiciones climáticas influyen directamente en el comportamiento energético del edificio y en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

En este contexto, la presente investigación busca contribuir a la reducción de esta brecha mediante una propuesta integral para el Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar, combinando iluminación eficiente con tecnología LED, control mediante dimming e integración de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. Además, incorpora una evaluación técnica, económica y ambiental que permite valorar la viabilidad de las estrategias propuestas y proporciona una metodología aplicable a futuras edificaciones educativas con características similares.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

El presente capítulo describe la metodología empleada para el desarrollo del estudio de eficiencia energética y diseño del sistema fotovoltaico aplicado al Edificio Taypi. La metodología adoptada combina el análisis técnico energético del edificio, la identificación de estrategias de eficiencia energética y el diseño de un sistema solar fotovoltaico orientado a un uso específico, complementado con una evaluación de viabilidad económica.

El enfoque metodológico se estructura en etapas secuenciales, permitiendo garantizar coherencia entre el diagnóstico energético inicial, la propuesta técnica desarrollada en el Capítulo IV y la evaluación económica presentada en el Capítulo V.

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico orientado al análisis técnico del desempeño energético del Edificio Taypi y a la formulación de una propuesta de eficiencia energética basada en criterios de sostenibilidad. Para ello, se integraron procedimientos de recopilación y análisis de información técnica, evaluación del consumo energético, diseño de un sistema solar fotovoltaico y análisis de viabilidad económica, siguiendo una secuencia lógica que permitió relacionar el diagnóstico inicial con las estrategias propuestas y la evaluación de sus resultados.

El desarrollo metodológico comprende la caracterización del caso de estudio, la estimación de la demanda energética, la identificación de oportunidades de mejora, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, la evaluación técnica de las estrategias de eficiencia energética y el análisis económico de la propuesta. Cada una de estas etapas se fundamenta en información técnica, normativa nacional e internacional y literatura científica, garantizando la consistencia y trazabilidad de los resultados obtenidos.

3.1.1. Enfoque de investigación

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, debido a que el análisis se sustenta en la recopilación, estimación y tratamiento de datos numéricos relacionados con el consumo y la demanda energética del Edificio Taypi. Para ello, se consideran variables como potencia instalada, horas de funcionamiento, consumo energético anual,

generación fotovoltaica, ahorro energético, reducción de emisiones y costos de inversión.

El enfoque cuantitativo permite establecer relaciones entre los parámetros energéticos del edificio y los resultados esperados de las estrategias propuestas. A partir de los datos obtenidos se realizan cálculos y comparaciones entre el escenario base y el escenario con las medidas de eficiencia energética y generación fotovoltaica.

Asimismo, este enfoque permite expresar los resultados mediante indicadores técnicos, ambientales y económicos, facilitando la evaluación objetiva de la propuesta y la determinación de su viabilidad para las condiciones particulares del Edificio Taypi.

3.1.2. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, debido a que utiliza conocimientos y procedimientos técnicos de eficiencia energética, instalaciones eléctricas y generación fotovoltaica para plantear una solución concreta a las condiciones energéticas del Edificio Taypi. El estudio no se limita a la descripción del consumo energético, sino que busca formular estrategias técnicamente viables que puedan ser consideradas en la implementación futura de la infraestructura.

Asimismo, presenta un carácter descriptivo, debido a que se realiza la caracterización de las condiciones arquitectónicas, eléctricas, energéticas y ambientales del caso de estudio. A partir de esta caracterización se identifican los principales sistemas consumidores y las condiciones que influyen en su desempeño energético.

Finalmente, el estudio incorpora un componente proyectivo, puesto que, a partir del diagnóstico realizado, se desarrolla una propuesta de intervención que contempla estrategias de eficiencia energética, control por atenuación e integración de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. La propuesta se formula para una edificación en etapa de diseño y se evalúa mediante criterios técnicos, ambientales y económicos.

3.1.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental, debido a que las variables analizadas no fueron manipuladas directamente en condiciones experimentales. El estudio se desarrolló a partir de la información técnica disponible del Edificio Taypi, sus

características arquitectónicas y eléctricas, las condiciones climáticas del sitio y los parámetros energéticos considerados para la etapa de diseño.

Asimismo, la investigación se desarrolla bajo la modalidad de estudio de caso, tomando al Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar como unidad de análisis. Sobre este caso se realiza la caracterización de la demanda energética, la identificación de oportunidades de eficiencia, la modelación de estrategias de intervención y el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

El análisis se complementa mediante la comparación entre un escenario energético base y escenarios optimizados obtenidos mediante cálculos y modelaciones. De esta manera, se evalúa el comportamiento esperado de las estrategias propuestas sin requerir su implementación física durante el desarrollo de la investigación.

3.1.4. Método de investigación

El método empleado en la investigación es de carácter analítico–propositivo. En una primera etapa se realiza el análisis de las características arquitectónicas, eléctricas, energéticas y ambientales del Edificio Taypi, descomponiendo la demanda energética en los principales sistemas consumidores para identificar aquellos con mayor incidencia y potencial de mejora.

A partir de los resultados obtenidos, se formulan estrategias de eficiencia energética orientadas principalmente a la optimización de la iluminación mediante tecnología LED, control por atenuación y sectorización. De manera complementaria, se desarrolla el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, considerando la demanda energética definida y las condiciones del recurso solar disponible.

Finalmente, las alternativas propuestas se someten a cálculos y comparaciones técnicas, ambientales y económicas, con el propósito de determinar su comportamiento esperado y su viabilidad para las condiciones particulares del Edificio Taypi.

3.1.5. Técnicas e instrumentos de recopilación de información

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de revisión documental, análisis técnico y procesamiento de información, orientadas a recopilar y organizar los datos necesarios para la caracterización energética del Edificio Taypi y el desarrollo de la propuesta.

La revisión documental permitió obtener información de los planos arquitectónicos y eléctricos, cuadros de cargas, distribución de luminarias, características de los equipos y demás documentación técnica disponible del proyecto. Asimismo, se consultaron normas nacionales e internacionales, bibliografía especializada y documentación técnica de los componentes del sistema fotovoltaico.

El análisis técnico permitió interpretar la información recopilada y establecer los parámetros necesarios para la estimación de la demanda energética, la identificación de los sistemas con potencial de mejora y el dimensionamiento de las estrategias propuestas. Para ello se consideraron, entre otros, los datos de potencia instalada, distribución de luminarias, características de los equipos, condiciones de funcionamiento y superficie disponible para la instalación fotovoltaica.

Como instrumentos de apoyo se utilizaron planos arquitectónicos y eléctricos, cuadros de cargas, registros de distribución de luminarias, fichas y documentación técnica de equipos, datos climáticos y solares, así como hojas de cálculo propias desarrolladas para el procesamiento y análisis de la información.

Finalmente, los datos obtenidos fueron sistematizados mediante hojas de cálculo, permitiendo realizar los cálculos de consumo energético, ahorro, generación fotovoltaica, reducción de emisiones y evaluación económica. Este procedimiento permitió mantener la trazabilidad entre la información recopilada, los parámetros utilizados y los resultados presentados en los capítulos posteriores.

3.2. ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO Y DE LA DEMANDA ASOCIADA

En esta etapa se analiza el Edificio Taypi como caso de estudio, considerando sus características arquitectónicas, funcionales y operativas, con el propósito de determinar la demanda anual de energía eléctrica y establecer la base energética para el desarrollo de las estrategias propuestas.

La estimación del consumo energético se realizó a partir de los planos arquitectónicos y eléctricos, cuadros de cargas, distribución de luminarias, características nominales de los equipos y condiciones previstas de funcionamiento. Para cada carga se consideraron la potencia nominal, cantidad de unidades, horas de uso diario y cantidad de días de operación al año.

El consumo anual de cada equipo o sistema se determinó mediante la expresión:

$$E_i = P_i * N_i * H_{d,i} * D_i$$

Donde:

E_i = Consumo anual del equipo o carga i (kWh/año).

P_i = Potencia nominal del equipo o carga (kW).

N_i = Cantidad de unidades.

$H_{d,i}$ = Horas de funcionamiento por día (h/día).

D_i = Cantidad de días de operación al año.

Las horas de funcionamiento y los días de operación se establecieron de acuerdo con el uso previsto de cada ambiente y equipamiento. Para los espacios de funcionamiento continuo se consideraron períodos de operación de hasta 24 horas diarias, mientras que para aulas, talleres, oficinas y otros ambientes se adoptaron horarios de uso acordes con las actividades previstas. En el caso de la iluminación de pasillos, gradas y áreas exteriores, se consideró una operación prolongada, debido a los requerimientos de seguridad y circulación del edificio.

A partir de estos criterios se elaboraron los balances energéticos correspondientes a la Planta Baja, Primer Piso y Segundo Piso, cuyos consumos estimados fueron de 19263,82 kWh/año, 8831,735 kWh/año y 12713,175 kWh/año, respectivamente. La suma de estos valores determina un consumo energético anual estimado de 40808,73 kWh/año para el Edificio Taypi.

El consumo obtenido se clasificó posteriormente en cinco grupos: iluminación, equipos de talleres, equipos gastronómicos, tecnologías de información y comunicación (TICs) y audiovisuales, y servicios generales. Esta clasificación permitió identificar los sistemas con mayor incidencia sobre la demanda y establecer aquellos con mayor potencial de intervención dentro de la propuesta de eficiencia energética.

3.3. METODOLOGÍA PARA LA PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

En esta etapa se establecen las estrategias orientadas a optimizar el consumo energético del Edificio Taypi, considerando las características del anteproyecto, las condiciones

climáticas locales y los sistemas previstos. El enfoque se centra en la identificación de oportunidades de mejora en los sistemas con mayor incidencia en la demanda eléctrica, priorizando medidas de eficiencia energética aplicables desde el diseño.

La metodología se estructura en un proceso de análisis, evaluación y selección de alternativas técnicas, a partir del cual se definen las estrategias desarrolladas en el Capítulo IV, especialmente aquellas relacionadas con la optimización de la iluminación y la integración del sistema fotovoltaico. La secuencia metodológica adoptada se resume en la Figura 9.

Figura 9

Propuesta de estrategias de eficiencia energética



Nota. Elaboración Propia, 2026.

3.3.1. Revisión bibliográfica y normativa

Se realizó una revisión bibliográfica y normativa relacionada con eficiencia energética en edificaciones, sistemas de iluminación, automatización, sistemas de control y generación solar fotovoltaica. Se consideraron libros, artículos científicos, normas técnicas, documentos institucionales y referencias especializadas nacionales e internacionales.

La revisión permitió establecer criterios técnicos para el análisis de la demanda energética, la selección de estrategias de eficiencia y el diseño del sistema fotovoltaico. Asimismo, se consultaron referencias como el IES Lighting Handbook, normas

ASHRAE, documentos del U.S. Department of Energy, normas ISO aplicables y la normativa boliviana relacionada con instalaciones eléctricas y generación distribuida.

La información recopilada se utilizó como fundamento para definir los parámetros técnicos, criterios de selección y procedimientos de cálculo empleados en las etapas posteriores de la investigación.

3.3.2. Análisis de los sistemas eléctricos del edificio

A partir del balance energético determinado en la etapa anterior, se analizaron los principales sistemas consumidores de energía eléctrica del Edificio Taypi, considerando su participación en la demanda anual, características de funcionamiento y posibilidades de intervención.

El análisis permitió identificar los sistemas con mayor incidencia sobre el consumo energético y evaluar su potencial de mejora mediante medidas de eficiencia. Se prestó especial atención a los sistemas de iluminación, particularmente a los sectores de pasillos, gradas y áreas exteriores, debido a sus condiciones de funcionamiento prolongado y a la posibilidad de incorporar mecanismos de regulación y control.

La selección de los sistemas a intervenir se realizó considerando su participación en el consumo, las condiciones de operación previstas, la factibilidad técnica de implementar medidas de eficiencia y los requerimientos de seguridad y funcionamiento del edificio.

3.3.3. Propuesta y evaluación de estrategias de eficiencia energética

A partir del diagnóstico energético y de la revisión de los sistemas consumidores, se definieron las estrategias de eficiencia energética aplicables al Edificio Taypi, priorizando aquellas que presentan condiciones favorables de implementación y potencial de reducción del consumo eléctrico.

La propuesta se concentra principalmente en la iluminación de pasillos, gradas y áreas exteriores, considerando que estos sectores presentan períodos prolongados de funcionamiento. Para estos espacios se plantea el uso de tecnología LED y sistemas de control por atenuación (dimming), permitiendo reducir el nivel de iluminación durante períodos de baja circulación sin requerir el apagado total de las luminarias.

Las estrategias seleccionadas fueron evaluadas mediante cálculos de consumo energético, estimación del ahorro anual y comparación entre el escenario base y el escenario con la medida implementada. Asimismo, se consideraron criterios de seguridad, condiciones de operación, compatibilidad técnica y factibilidad de aplicación en el edificio.

Los resultados de esta evaluación constituyen la base para el desarrollo de las estrategias presentadas en el Capítulo IV, donde se detallan los cálculos técnicos y la modelación del ahorro energético correspondiente.

3.4. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

El diseño del sistema solar fotovoltaico se desarrolló a partir de la demanda energética identificada en el Edificio Taypi y de las condiciones disponibles para el aprovechamiento del recurso solar. El procedimiento considera la estimación de la energía requerida, el análisis del recurso solar, el dimensionamiento de los componentes y la verificación de la configuración propuesta.

El sistema se plantea bajo una configuración conectada a la red eléctrica (on-grid), orientada a cubrir la demanda energética considerada para los sistemas intervenidos. La metodología busca establecer una solución técnicamente compatible con las características del edificio y con las condiciones de disponibilidad comercial de los equipos.

3.4.1. Recolección y análisis de información técnica y solar

Para el diseño del sistema fotovoltaico se recopiló información relacionada con la ubicación del Edificio Taypi, sus características arquitectónicas y eléctricas, la superficie disponible para la instalación de los módulos y las condiciones del recurso solar de la ciudad de El Alto.

Como información de partida se utilizaron los planos arquitectónicos y eléctricos, cuadros de cargas, distribución de luminarias, características de los equipos eléctricos y los resultados del balance energético desarrollado en el presente estudio. Asimismo, se consideraron datos de radiación solar y parámetros técnicos necesarios para estimar la generación fotovoltaica.

Para establecer los supuestos de cálculo se consideraron las condiciones de operación del edificio, la disponibilidad de superficie en cubierta, las características de los módulos fotovoltaicos seleccionados y las condiciones de funcionamiento de un sistema conectado a red. Estos criterios permiten mantener coherencia entre la demanda energética determinada en el diagnóstico y el sistema propuesto.

3.4.2. Dimensionamiento y configuración del sistema fotovoltaico

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico se realiza a partir de la demanda energética anual total proyectada del Edificio Taypi, considerando el consumo global de 40808,73 kWh/año. A partir de este valor se determina la demanda energética diaria y posteriormente se relaciona con las horas sol pico disponible en la ubicación del proyecto y con un factor de desempeño que representa las pérdidas globales asociadas al funcionamiento del sistema.

La potencia pico requerida se determina mediante la relación entre la energía diaria demandada, las horas sol pico del sitio y el Performance Ratio (PR). Para el presente estudio se mantiene un valor de $PR = 0,75$, considerando las pérdidas asociadas a temperatura, suciedad, inversor, cableado y desajustes entre módulos.

Con una demanda energética anual de 40808,73 kWh/año, una radiación solar media de 6,158 kWh/m²·día, equivalente a 6,16 horas sol pico por día, y un PR de 0,75, se obtiene una potencia fotovoltaica requerida aproximada de 24,20 kWp.

Considerando módulos fotovoltaicos monocristalinos de 550 Wp, se determina la necesidad de instalar 44 módulos, obteniéndose una potencia fotovoltaica instalada de 24,20 kWp.

La superficie requerida para los módulos se estima en aproximadamente 96,8 m², considerando una superficie aproximada de 2,2 m² por módulo. Esta superficie representa una fracción reducida de la cubierta disponible del edificio, estimada en aproximadamente 800 m², por lo que existe disponibilidad física suficiente para la instalación del generador fotovoltaico propuesto.

La configuración del sistema se plantea bajo un esquema conectado a red (on-grid), manteniendo la red eléctrica convencional como respaldo ante periodos en los que la generación fotovoltaica sea insuficiente respecto a la demanda instantánea del edificio.

De esta manera, la cobertura estimada se interpreta en términos de energía anual y no como una condición de autonomía eléctrica permanente.

La selección definitiva del inversor y de la configuración de los strings deberá verificarse considerando los parámetros eléctricos de los módulos seleccionados, particularmente tensión de circuito abierto, tensión de máxima potencia, corriente de operación, corriente de cortocircuito, rango de seguimiento del punto de máxima potencia y tensión máxima admisible del inversor.

Finalmente, la energía anual estimada de generación fotovoltaica se compara con la demanda energética anual total del edificio, con el propósito de determinar el nivel de cobertura energética alcanzado y verificar la correspondencia entre la capacidad de generación propuesta y los requerimientos energéticos globales del Edificio Taypi.

3.4.3. Verificación y validación técnica del sistema diseñado

Una vez realizado el dimensionamiento, se verifica la coherencia técnica de los principales parámetros del sistema fotovoltaico. Esta verificación comprende la relación entre la potencia pico del generador y la potencia del inversor, la cantidad y potencia de los módulos, la energía anual estimada y la demanda energética que se pretende cubrir.

También se comprueba la compatibilidad de la configuración propuesta con las condiciones de operación de un sistema conectado a red, considerando la integración del generador fotovoltaico con la instalación eléctrica del edificio.

La validación se realiza mediante la comparación de los resultados obtenidos en los cálculos de dimensionamiento con la demanda energética determinada en el diagnóstico. De esta manera, se verifica que la energía generada estimada sea suficiente para alcanzar el nivel de cobertura previsto y que la configuración seleccionada sea técnicamente coherente con los objetivos de la propuesta.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante el procedimiento de cálculo se contrastan con los parámetros técnicos de los equipos seleccionados y con los criterios establecidos en la normativa y bibliografía técnica utilizada en la investigación. Esta comprobación constituye la base para el desarrollo de la propuesta fotovoltaica presentada en el Capítulo IV.

3.5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA

La evaluación económica tiene como finalidad determinar la viabilidad de la propuesta considerando los costos de implementación y los beneficios económicos derivados del ahorro energético. El análisis se aplica al sistema fotovoltaico y al sistema de control por atenuación (dimming).

Se emplean como principales indicadores el costo total de inversión, el ahorro energético y económico anual y el período simple de recuperación de la inversión. Adicionalmente, se analiza el comportamiento de la propuesta bajo diferentes escenarios económicos.

La evaluación económica tiene como objetivo determinar la factibilidad financiera de la propuesta de eficiencia energética y del sistema fotovoltaico diseñado, considerando exclusivamente los sistemas intervenidos.

3.5.1. Estimación de costos de inversión

El costo de inversión se determina a partir de los componentes necesarios para implementar la propuesta, incluyendo los módulos fotovoltaicos, inversor, estructuras, cableado y protecciones, medidor bidireccional, mano de obra y sistema de control por atenuación.

A los costos directos se adiciona un porcentaje destinado a ingeniería y contingencias, con el propósito de considerar posibles variaciones durante la implementación. Los valores utilizados corresponden a precios referenciales adoptados para el desarrollo del proyecto.

3.5.2. Determinación del ahorro energético y económico

El ahorro energético anual se determina a partir de la reducción estimada en los sistemas intervenidos. Para el sistema de iluminación con dimming se considera el porcentaje de reducción establecido mediante la modelación realizada, mientras que el aporte del sistema fotovoltaico se determina a partir de la energía anual generada.

El ahorro económico se obtiene multiplicando la energía anual ahorrada o sustituida por la tarifa eléctrica considerada en el estudio. De esta manera, se establece el beneficio económico anual asociado a la implementación de la propuesta.

3.5.3. Período de recuperación de la inversión (Payback)

Para evaluar el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial se emplea el período simple de recuperación o Payback, calculado mediante la relación entre el costo total de inversión y el ahorro económico anual esperado.

Este indicador permite establecer de manera sencilla el tiempo necesario para recuperar los recursos invertidos y constituye el principal criterio económico utilizado para valorar la factibilidad de la propuesta.

No se consideran indicadores como el VAN y la TIR, debido a que su aplicación requeriría establecer supuestos adicionales de largo plazo, como tasas de descuento, inflación y evolución futura de costos y tarifas, aspectos que exceden el alcance definido para esta investigación.

3.5.4. Análisis de escenarios económicos

Finalmente, se realiza un análisis bajo diferentes escenarios económicos mediante la variación de la tarifa eléctrica y del costo de inversión. Este procedimiento permite observar cómo podrían modificarse los resultados del Payback ante condiciones diferentes a las consideradas en el escenario base.

Los resultados obtenidos en cada escenario son comparados para determinar la sensibilidad de la viabilidad económica de la propuesta frente a posibles variaciones de las condiciones económicas.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO CLIMÁTICO Y AMBIENTAL

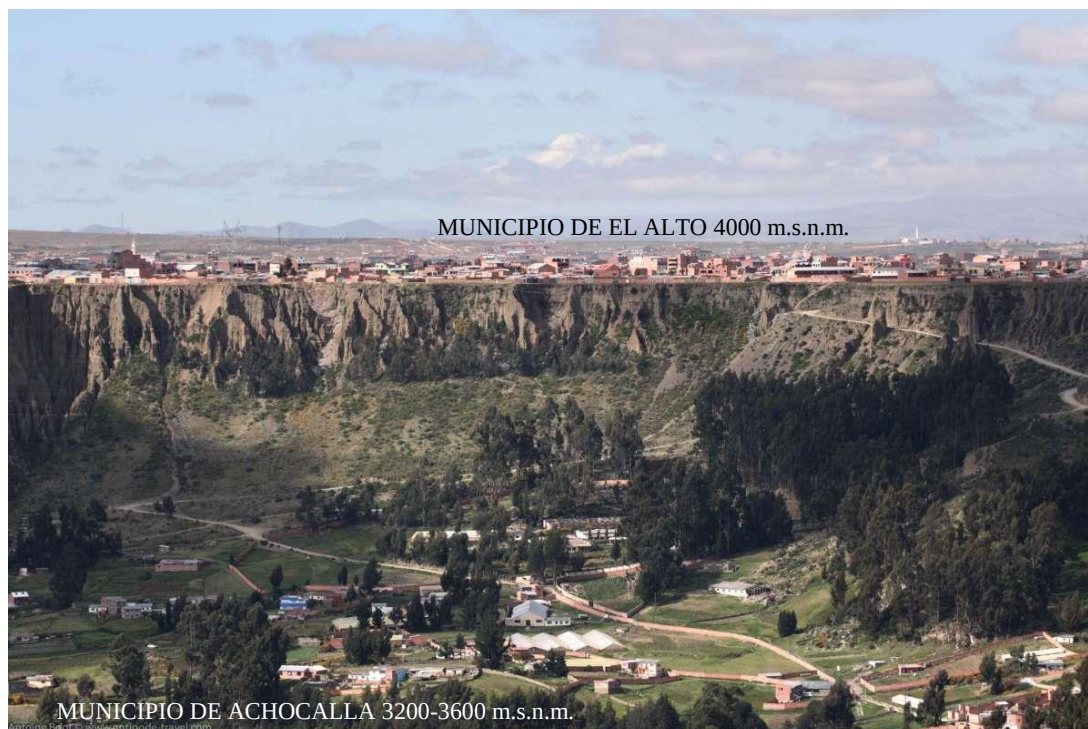
4.1.1. Altitud y ubicación geográfica

El Edificio Taypi, objeto de estudio de la presente investigación, estará emplazado en la ciudad de El Alto, perteneciente al departamento de La Paz, Bolivia. Esta ciudad se encuentra ubicada en una meseta altiplánica a una altitud promedio superior a los 4.000 metros sobre el nivel del mar, lo que influye directamente en variables climáticas clave como la temperatura, la presión atmosférica y la cantidad de oxígeno disponible en el aire.

El Alto se sitúa en las coordenadas geográficas 16°34'34"S de latitud y 68°11'48"W de longitud, en la zona occidental del país, con una superficie que abarca aproximadamente 375 km². La ubicación geográfica y altitud de la ciudad son factores determinantes para el diseño energético de edificaciones, particularmente por su impacto en la eficiencia de sistemas de climatización y generación fotovoltaica.

Figura 10

El Alto, Meseta altiplánica

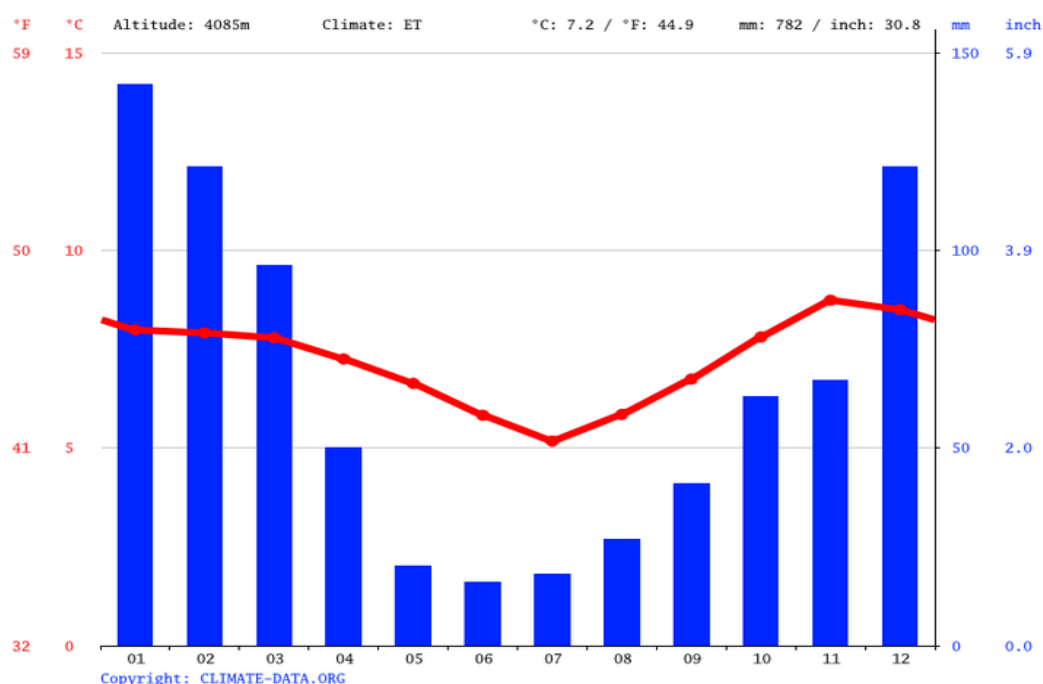


Nota. <https://antipode-bolivia.com/es-mapa-el-alto>, 2026

4.1.2. Condiciones climáticas locales

El clima de El Alto se caracteriza por condiciones frías y secas durante gran parte del año, con temperaturas que pueden descender por debajo de 0 °C durante las noches de invierno. La humedad relativa presenta valores moderados, con mayor sequedad durante los meses de invierno.

Figura 11
Climograma



Nota. Climate_Data, 2025

Las precipitaciones son estacionales y se concentran principalmente durante los meses de verano, mientras que el periodo seco se extiende durante buena parte del invierno. Estas condiciones climáticas deben considerarse en el diseño energético del edificio, particularmente en aspectos relacionados con iluminación, confort térmico y consumo eléctrico.

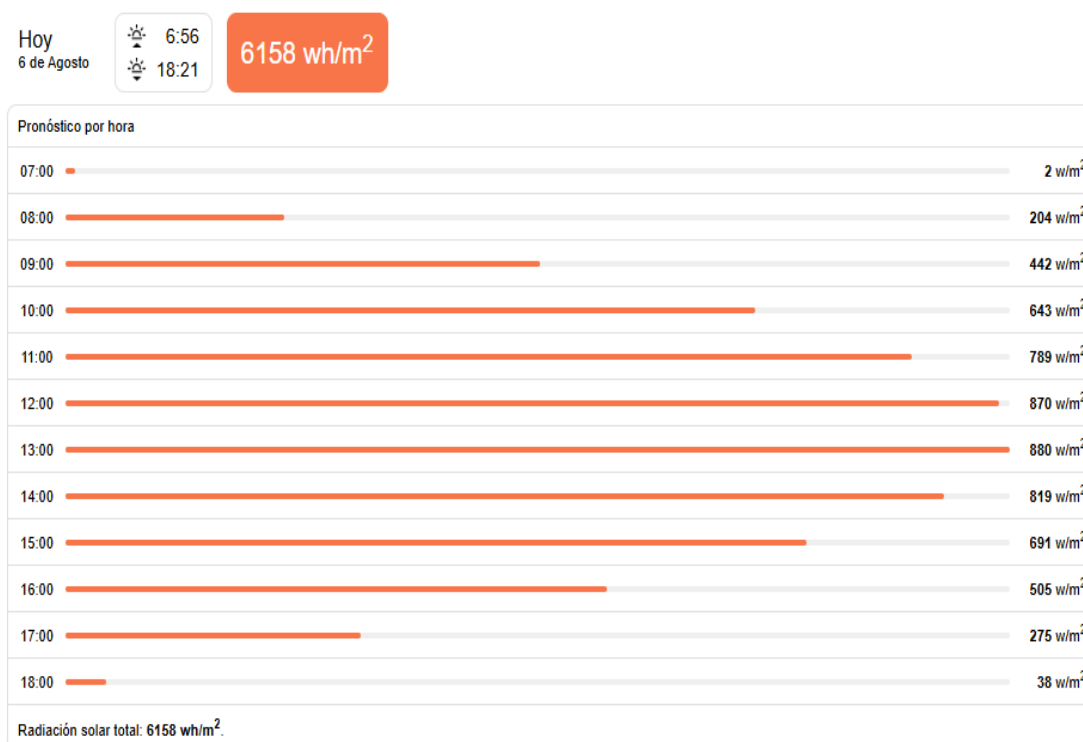
El viento constituye también una característica del entorno climático; sin embargo, debido a que la presente investigación se concentra en estrategias de eficiencia energética y aprovechamiento de energía solar fotovoltaica, este recurso no forma parte de las alternativas energéticas evaluadas.

4.1.3. Radiación solar y potencial energético renovable

El Alto presenta condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía solar debido a su elevada altitud y disponibilidad de radiación solar durante gran parte del año. Para el presente estudio se considera una radiación solar media de aproximadamente $6158 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{día}$, valor que constituye una referencia para el posterior dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Figura 12

Radiación solar día



Nota. Tutiempo Network, 2025

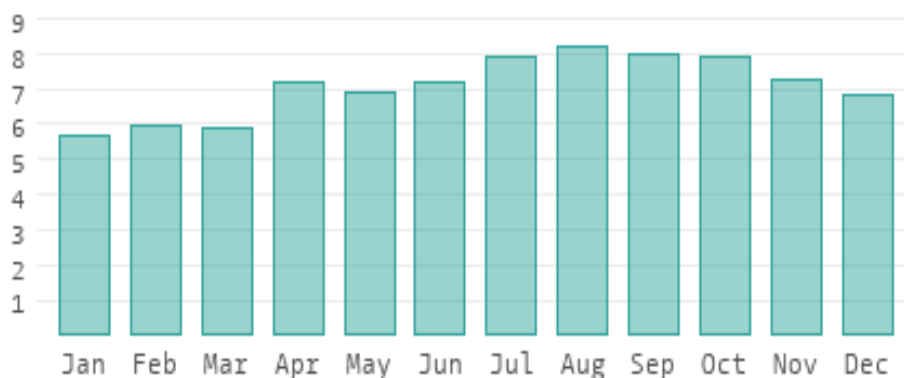
Asimismo, la disponibilidad anual de horas de sol favorece la utilización de sistemas solares conectados a red en edificaciones. Estas condiciones, combinadas con la superficie disponible en la cubierta del Edificio Taypi, permiten considerar la generación fotovoltaica como una alternativa técnicamente aplicable para complementar las estrategias de eficiencia energética propuestas.

En función de estas condiciones, para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se adopta un valor de 6,16 horas sol pico (HSP), utilizado posteriormente para estimar la capacidad de generación requerida. Este parámetro se complementa con un factor de

rendimiento global del sistema, considerando las pérdidas asociadas a temperatura, suciedad, cableado, inversor y demás componentes.

Figura 13

Horas de sol al día



Nota. www.datosmundial.com/america/bolivia/clima.php, 2025.

A continuación se presenta una tabla resumen de la caracterización de factores medio ambientales más relevantes para el presente trabajo de grado.

Tabla 5

Tabla climática

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	8	7.9	7.8	7.2	6.6	5.8	5.2	5.8	6.7	7.8	8.7	8.5
Temperatura min. (°C)	4.5	4.3	4	2.8	1.2	-0.1	-0.8	-0.2	1.2	2.7	3.8	4.5
Temperatura máx. (°C)	12.8	12.8	12.9	12.6	12.6	12.2	11.7	12.4	13.1	13.7	14.4	13.6
Precipitación (mm)	142	121	96	50	20	16	18	27	41	63	67	121
Humedad (%)	82%	82%	81%	75%	59%	53%	54%	57%	62%	67%	67%	77%
Días lluviosos (días)	20	17	17	11	5	3	4	6	10	13	13	17
Horas de sol (horas)	6.5	6.3	6.4	7.3	8.9	9.2	9.1	9.2	8.8	8.7	8.8	7.5

Nota. Adaptado de Climate-Data, 2026.

4.2. DIAGNOSTICO GENERAL DEL CASO DE ESTUDIO

4.2.1. Contexto urbano y área de influencia

El Edificio Taypi se proyecta en la ciudad de El Alto, caracterizada por un crecimiento urbano y poblacional sostenido. Este contexto genera una demanda creciente de

infraestructura educativa y plantea la necesidad de incorporar criterios de eficiencia energética en las nuevas edificaciones.

En este escenario, el Instituto Tecnológico Bolivia Mar requiere ampliar su infraestructura para responder al crecimiento de su población estudiantil. La proyección del Edificio Taypi constituye una oportunidad para incorporar medidas de eficiencia energética y generación fotovoltaica desde la etapa de diseño.

Tabla 6
Estadística de estudiantes matriculados

GESTIÓN	CARRERAS							MATRICULADOS
	ELECTRICIDAD INDUSTRIAL	INDUSTRIAL TEXTIL Y CONFECCIÓN	REDES DE GAS Y SOLDADURA INDUSTRIAL	CONSTRUCCIÓN CIVIL	SISTEMAS INFORMÁTICOS	MECÁNICA AUTOMOTRIZ	GASTRONOMÍA	
2009	0	0	26	12	0	0	0	38
2010	0	0	22	19	97	0	0	138
2011	20	12	35	47	89	0	0	203
2012	21	10	41	18	97	0	0	187
2013	31	17	73	39	123	0	0	283
2014	56	43	88	38	110	0	0	335
2015	47	57	110	73	142	0	0	429
2016	95	91	119	88	142	0	0	535
2017	102	77	113	134	170	0	0	596
2018	158	107	115	147	186	0	0	713
2019	189	125	118	138	251	0	0	821
2020	189	145	126	149	259	0	0	868
2021	175	145	120	140	258	85	0	923
2022	180	140	121	135	249	145	0	970
2023	180	135	130	138	255	165	30	1033
2024	184	130	132	135	260	180	40	1061
2025	178	135	140	142	250	162	60	1067
2026	184	130	150	140	253	170	80	1107

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2026.

El registro histórico muestra un crecimiento progresivo de la población estudiantil, acompañado por la creación de nuevas carreras y el incremento del número de paralelos. Considerando los dos últimos años registrados, se estima un crecimiento promedio del 3,5 %, utilizado como referencia para la proyección de estudiantes.

Tabla 7

Proyección de número de estudiantes al 2030

DETALLE	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
ESTUDIANTES ITBM	1061	1067	1107	1146	1186	1228	1271

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2026.

El Edificio Taypi estará destinado principalmente a las carreras de Mecánica Automotriz y Gastronomía. Para efectos del presente estudio, se considera una población de 300 estudiantes como referencia para la estimación de las condiciones de uso y demanda energética de las nuevas instalaciones.

Sus espacios limitados generan restricciones en la oferta académica y en la capacidad de albergar actividades simultáneas. En este contexto, la proyección del nuevo Edificio Taypi surge como una respuesta estratégica para ampliar la cobertura y mejorar las condiciones de enseñanza y aprendizaje.

Figura 14

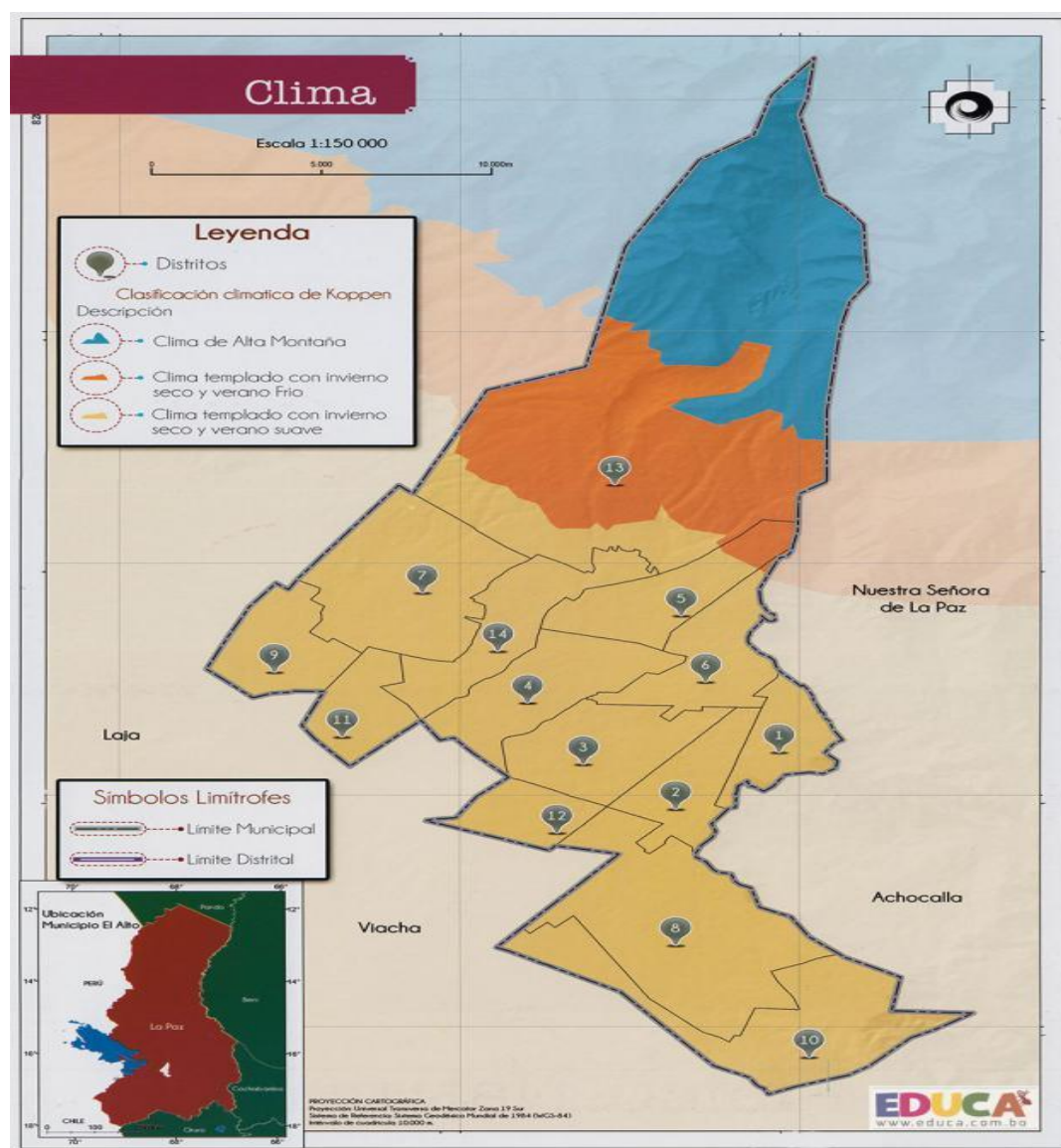
Comparativa visual entre la infraestructura actual del ITBM y el nuevo Edificio Taypi proyectado



Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

El Edificio Taypi se construirá dentro del predio del Instituto Tecnológico Bolivia Mar ITBM, ubicado en el Distrito Municipal 8. Sin embargo, la influencia del proyecto trasciende este distrito, ya que la institución atiende a estudiantes provenientes de los 14 distritos municipales de El Alto. Esta condición le otorga al edificio un impacto territorial amplio y estratégico.

Figura 15
Área de influencia del proyecto



Nota. Educa, 2025

Los registros institucionales muestran que los estudiantes del ITBM provienen de diferentes distritos municipales de El Alto. Considerando la distribución territorial de la población estudiantil y la superficie urbana de la ciudad, estimada en

aproximadamente 375,5 km², se evidencia que el alcance institucional del proyecto no se limita al entorno inmediato del Edificio Taypi.

Con el propósito de caracterizar la procedencia territorial de los estudiantes, se aplicó una encuesta en línea a una muestra de 120 estudiantes matriculados en el ITBM durante la gestión 2026. El formulario fue elaborado mediante Google Forms y permitió identificar el distrito municipal de residencia de los participantes. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Análisis estimativo del alcance geográfico institucional

DISTRITO	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	OTRO
Nro de ESTUDIANTES POR DISTRITO	4	7	20	6	1	5	1	29	0	10	9	17	0	4	7
PORCENTAJE (%)	3,3	5,8	16,7	5,0	0,8	4,2	0,8	24,2	0,0	8,3	7,5	14,2	0,0	3,3	5,8

Nota. Base de datos ITBM, 2026.

4.2.2. Características generales del ITBM

El Instituto Tecnológico Bolivia Mar es una institución pública de educación superior técnica orientada a la formación de profesionales en áreas industriales, tecnológicas y productivas. Su infraestructura ha experimentado un proceso de crecimiento asociado al incremento de la matrícula, las carreras ofertadas y las necesidades académicas y administrativas.

Figura 16

Ubicación geográfica 16°34'34"S 68°11'48"W, ITBM



Nota. Propia con base de Google Earth, 2025

El Edificio Taypi ha sido concebido como una infraestructura destinada a concentrar funciones académicas, administrativas y operativas del ITBM. Debido a que se encuentra en etapa de diseño, constituye una oportunidad para incorporar criterios de eficiencia energética y generación fotovoltaica desde la concepción del proyecto, evitando que estas medidas dependan de intervenciones posteriores sobre una infraestructura ya construida.

Tabla 9

Funciones principales previstas en el Edificio Taypi

Área	Función principal	Beneficiarios directos
Atención al estudiante	Aulas, laboratorios, talleres	Estudiantes
Administración	Gestión institucional, coordinación, Inscripción, trámites académicos	Personal administrativo
Reuniones	Sesiones docentes, reuniones de coordinación	Docentes, autoridades
Archivo	Custodia de documentos y registros	Personal administrativo

Nota. Elaboración propia, 2026

El edificio proyectado contará con espacios administrativos, académicos y de apoyo institucional. Al encontrarse aún en etapa de diseño, su planificación permite incorporar medidas de eficiencia energética y generación fotovoltaica de manera integrada, aspecto que constituye una de las principales ventajas de la propuesta desarrollada en esta investigación.

4.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y ARQUITECTÓNICAS

4.3.1. Descripción arquitectónica general

El Edificio Taypi se proyecta como una estructura moderna y funcional, diseñada para centralizar diversas actividades administrativas y de atención al estudiante en un solo espacio. Con una superficie construida estimada de 4394,87 m², el edificio contará con varios niveles que albergarán áreas de uso común, oficinas administrativas, aulas y espacios para soporte institucional.

Su concepción arquitectónica busca optimizar la circulación interna, asegurando que los usuarios puedan desplazarse de forma fluida entre las distintas dependencias.

Asimismo, se contempla la integración de zonas de espera confortables, iluminación natural abundante y una distribución estratégica de ambientes para maximizar la eficiencia del espacio disponible.

Figura 17

Vista frontal Edificio Taypi

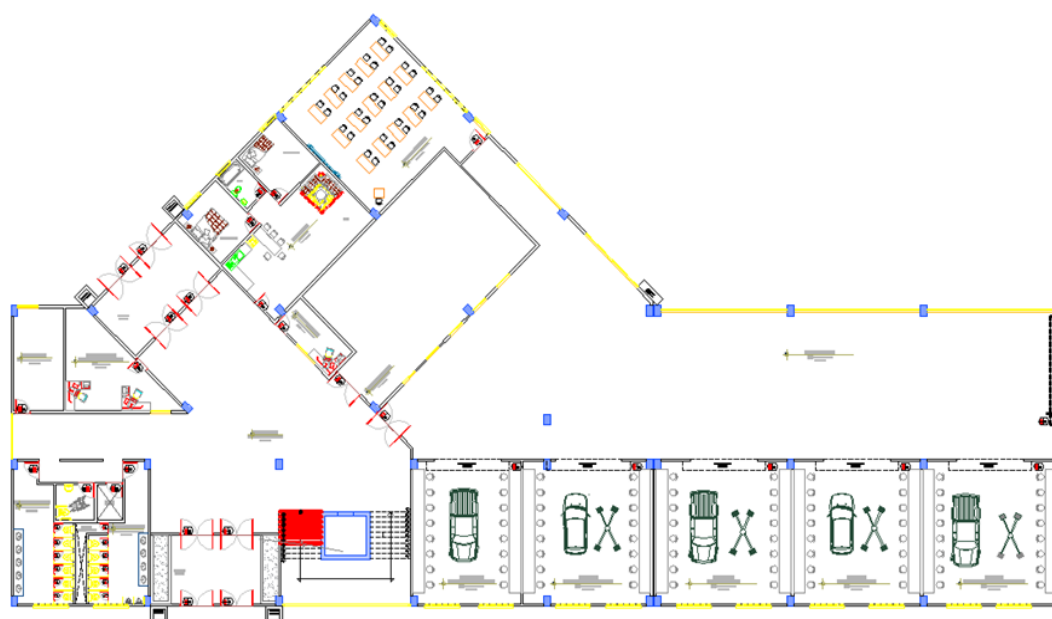


Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

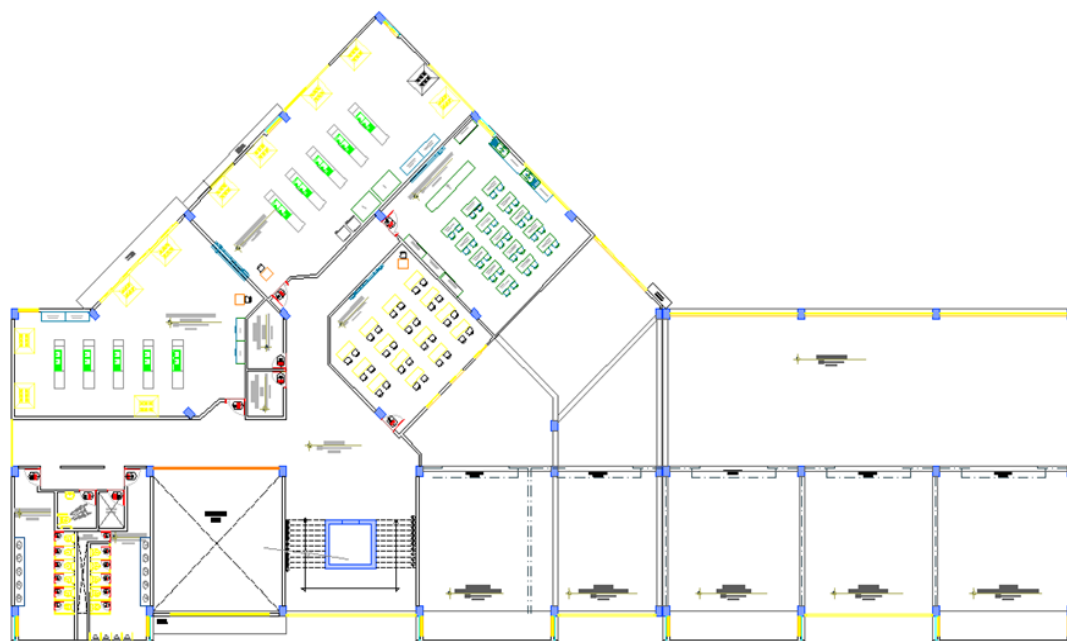
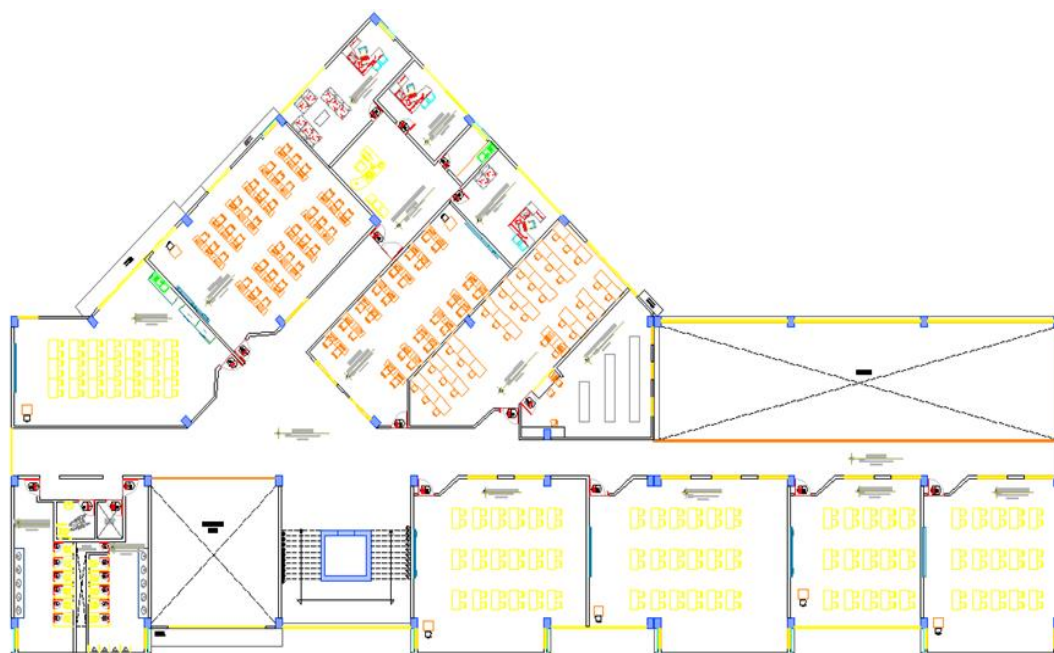
Conforme el proyecto ejecutivo, la edificación consta de Planta baja que está destinado para la Carrera de Mecánica Automotriz, el Primer Piso que está ocupado por Mecánica Automotriz y la carrera de Gastronomía, el Segundo Piso está ocupado por la carrera de Gastronomía.

Figura 18

Plano arquitectónico, Planta Baja



Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

Figura 19*Plano arquitectónico Primer Piso**Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025***Figura 20***Plano arquitectónico Segundo Piso**Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025*

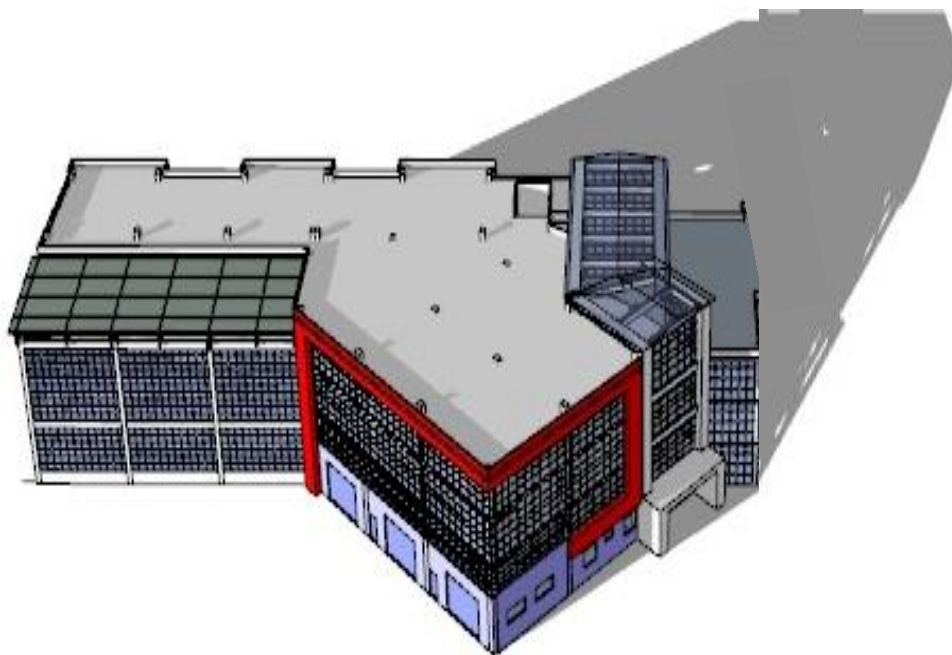
4.3.2. Orientación geográfica

La orientación se ha planificado considerando las condiciones climáticas predominantes de la ciudad de El Alto y los principios del diseño bioclimático. La disposición volumétrica y la ubicación de sus fachadas buscan optimizar el aprovechamiento de la radiación solar durante los meses fríos y, al mismo tiempo, minimizar la incidencia directa en los periodos de mayor calor, logrando así un equilibrio térmico que reduzca la necesidad de climatización artificial. Este planteamiento no solo responde a criterios de eficiencia energética, sino también a la generación de espacios interiores más confortables y saludables para los usuarios, aprovechando al máximo los recursos naturales disponibles.

El edificio se orienta con sus fachadas largas hacia el norte y sur, lo que permite un mejor control del asoleamiento mediante protecciones solares fijas o móviles. Esta configuración facilita el ingreso de radiación solar baja durante el invierno y limita la sobreexposición en verano. En las fachadas este y oeste, donde la radiación es más intensa y difícil de controlar, se proyecta el uso muros con menor proporción de vanos, reduciendo así las ganancias térmicas no deseadas.

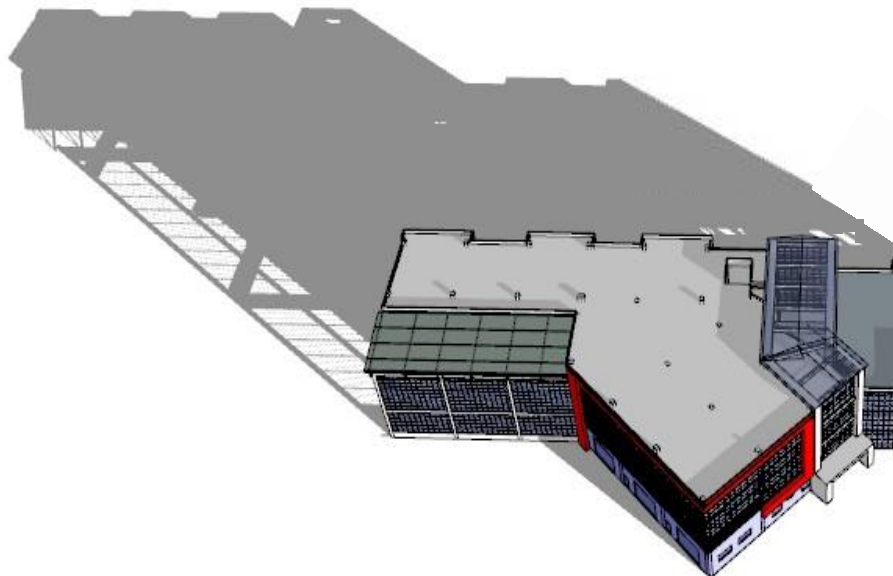
Figura 21

Asolamiento por las mañanas



Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025

Figura 22
Asolamiento por las tardes



Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025

4.3.3. Zonificación funcional y energética del edificio

La identificación funcional de las áreas del Edificio Taypi permite relacionar la distribución arquitectónica con las características de uso y con las necesidades energéticas previstas. Debido a que el edificio se encuentra en etapa de diseño, esta zonificación se establece a partir de las funciones previstas para sus ambientes y de la información considerada en los cuadros de carga y el balance energético.

Desde el punto de vista energético, las zonas de circulación y seguridad, como pasillos, gradas y áreas exteriores, presentan requerimientos particulares de iluminación, mientras que aulas, oficinas, laboratorios y talleres concentran cargas asociadas a iluminación, equipos eléctricos y actividades académicas. Esta diferenciación permite establecer criterios específicos para la aplicación de las estrategias propuestas.

La zonificación constituye, por tanto, un vínculo entre las características arquitectónicas del edificio, el inventario de cargas y las estrategias de eficiencia energética. Su identificación permite orientar las medidas de intervención hacia las áreas donde las condiciones de uso y las características de las cargas justifican su aplicación.

Tabla 10*Zonificación funcional y energética de Edificio Taypi*

Zona o área	Función principal	Característica de uso	Estrategias energéticas asociadas
Aulas	Actividad académica	Uso principalmente diurno	Acciones pasivas: iluminación natural y orientación; acciones activas: iluminación LED y control por zonas
Laboratorios	Actividad académica y práctica	Uso programado	Acciones activas: iluminación LED y sectorización; acciones de gestión: mantenimiento y uso racional de la energía
Talleres	Formación práctica	Uso programado	Acciones activas: iluminación LED y control por zonas; acciones de gestión: mantenimiento y uso racional
Oficinas	Actividades administrativas	Uso horario	Acciones pasivas: iluminación natural; acciones activas: iluminación LED y control por zonas
Pasillos	Circulación	Uso frecuente	Acciones activas: iluminación LED, sectorización y control por atenuación (dimming)
Gradas	Circulación y seguridad	Uso intermitente	Acciones activas: iluminación LED, sensores de presencia y control por atenuación (dimming)
Áreas exteriores	Circulación y seguridad	Uso principalmente nocturno	Acciones activas: iluminación LED y control por atenuación; acciones de gestión: programación horaria
Áreas gastronómicas	Actividades académicas y prácticas	Uso programado	Acciones activas: iluminación LED y control por zonas; acciones de gestión: mantenimiento y uso racional
Servicios generales	Apoyo al funcionamiento del edificio	Uso variable	Acciones de gestión: monitoreo energético y mantenimiento preventivo

Nota. Elaboración propia, 2026.

Las estrategias mencionadas en la presente zonificación serán desarrolladas técnicamente en el apartado 4.7, donde se detallan sus características, criterios de aplicación y resultados energéticos.

4.3.4. Inventario técnico de cargas y equipos por zona

El inventario técnico permite complementar la zonificación mediante la identificación de las principales cargas eléctricas asociadas a cada área del Edificio Taypi. La información se obtiene de los cuadros de carga y del balance energético desarrollado

para las tres plantas, considerando los equipos, potencia instalada, cantidad de unidades, horas de utilización, días de operación y consumo anual estimado.

Tabla 11

Inventario técnico de cargas y equipos por zona

Zona	Principales cargas o equipos	Característica energética	Relación con las estrategias propuestas
Aulas	Luminarias, computadoras y equipos audiovisuales	Uso académico programado	Iluminación LED, aprovechamiento de iluminación natural y control por zonas
Laboratorios	Luminarias y equipos eléctricos	Uso programado	Iluminación LED, control por zonas y mantenimiento
Talleres	Luminarias, maquinaria y equipos	Cargas asociadas a actividades prácticas	Iluminación LED, control por zonas y mantenimiento
Oficinas	Luminarias y equipos informáticos	Uso horario	Iluminación LED, iluminación natural y control por zonas
Pasillos	Paneles LED	Funcionamiento prolongado	Iluminación LED y control por atenuación (dimming)
Gradas	Paneles LED	Funcionamiento prolongado/intermitente	Iluminación LED, sensores de presencia y dimming
Áreas exteriores	Iluminación exterior	Funcionamiento principalmente nocturno	Iluminación LED, dimming y programación horaria
Áreas gastronómicas	Equipos gastronómicos e iluminación	Uso asociado a actividades académicas	Iluminación LED, control por zonas y mantenimiento
Servicios generales	Equipos e iluminación auxiliar	Uso variable	Mantenimiento, programación y monitoreo energético

Nota. Elaboración propia, 2026.

Entre las principales cargas identificadas se encuentran las luminarias LED, equipos informáticos y audiovisuales, equipos gastronómicos, maquinaria y equipos destinados a los talleres, además de las cargas correspondientes a servicios generales. La incidencia de cada grupo depende de la función del ambiente y de su régimen de utilización.

Particularmente, los pasillos y gradas presentan una condición diferenciada debido a su función de circulación y seguridad. En el balance energético se identifica para estas áreas un uso prolongado de la iluminación, por lo que constituyen sectores directamente relacionados con las estrategias de iluminación eficiente y control por atenuación.

El inventario permite establecer la relación entre las cargas existentes, su comportamiento energético y las medidas propuestas, evitando considerar el edificio únicamente como una unidad global de consumo. Esta caracterización constituye la base para posteriormente relacionar cada estrategia con las zonas donde resulta técnicamente aplicable.

4.3.5. Relación entre zonas funcionales y estrategias de eficiencia energética

La identificación de las zonas funcionales y de las principales cargas eléctricas permite establecer una relación directa entre las características de cada espacio y las estrategias de eficiencia energética planteadas para el Edificio Taypi.

Tabla 12

Relación entre zonas funcionales y estrategias energéticas

Zona o área	Estrategias energéticas asociadas
Aulas	Acciones pasivas: iluminación natural y orientación; acciones activas: iluminación LED y control por zonas
Laboratorios	Acciones activas: iluminación LED y sectorización; acciones de gestión: mantenimiento y uso racional de la energía
Talleres	Acciones activas: iluminación LED y control por zonas; acciones de gestión: mantenimiento y uso racional
Oficinas	Acciones pasivas: iluminación natural; acciones activas: iluminación LED y control por zonas
Pasillos	Acciones activas: iluminación LED, sectorización y control por atenuación (dimming)
Gradas	Acciones activas: iluminación LED, sensores de presencia y control por atenuación (dimming)
Áreas exteriores	Acciones activas: iluminación LED y control por atenuación; acciones de gestión: programación horaria
Áreas gastronómicas	Acciones activas: iluminación LED y control por zonas; acciones de gestión: mantenimiento y uso racional
Servicios generales	Acciones de gestión: monitoreo energético y mantenimiento preventivo

Nota. Elaboración propia, 2026.

La Tabla 12 resume la correspondencia entre las principales zonas identificadas y las estrategias energéticas planteadas, estableciendo el vínculo entre el diagnóstico funcional y la propuesta técnica.

Esta relación considera la función del ambiente, su régimen de utilización y el tipo de carga predominante.

En aulas, oficinas y espacios académicos se priorizan el aprovechamiento de la iluminación natural, la utilización de luminarias LED y el control por zonas. En laboratorios, talleres y áreas gastronómicas adquieren mayor importancia la sectorización, el mantenimiento y el uso racional de los equipos de acuerdo con los períodos efectivos de utilización.

4.4. ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

El análisis de la demanda energética del Edificio Taypi se realizó considerando la información levantada en los cuadros de carga eléctrica por piso y el cuadro general, así como las proyecciones de uso horario del edificio. Este procedimiento permitió establecer la potencia instalada, la potencia demandada, el perfil de consumo y la verificación de parámetros técnicos esenciales como la caída de tensión.

Los datos obtenidos son fundamentales para garantizar que el sistema eléctrico pueda operar de manera segura y eficiente.

4.4.1. Cuadros de cargas y resumen de cargas eléctricas

El dimensionamiento del sistema eléctrico del Edificio Taypi parte del análisis detallado de las cargas instaladas en cada nivel. El levantamiento incluyó iluminación, tomacorrientes, equipos especiales, organizados por circuitos y fases.

La información se estructuró en cuadros de cargas por pisos, facilitando la identificación de los sectores con mayor densidad de consumo eléctrico.

Tabla 13*Cuadro de Carga TD-PB Planta baja*

Nro Cto	DESCRIPCIÓN	ILUMINACION (W)					TOMA CORRIENTE	TOMA DE FUERZA		DEMANDA POR FASE W			PROT. POLOS AMP.	CONDUCTOR AWG TW CU	DUCTO PVC (pulg).
		PANEL LED				REFLECT	200 W	2000 W	5000 W	FASE R - N	FASE S - N	FASE T - N			
		1X18	1X32	1X34	1X33	1X200									
1	ILUMINACION	9	31	1		5				2188			1X16	2x14	5 / 8 "
2	ILUMINACION	7		31		4					1980		1X16	2x14	5 / 8 "
3	ILUMINACION				30	4						1790	1X16	2x14	5 / 8 "
4	TOMACORRIENTES						16			3200			1X20	3x12	3 / 4"
5	TOMACORRIENTES						15				3000		1X20	3x12	3 / 4"
6	TOMACORRIENTES						12					2400	1X20	3x12	3 / 4"
7	FUERZA DUCHA								1			5000	1X32	3x10	3 / 4"
8	FUERZA (BOMBA DE AGUA)							1			2000		1X32	3x10	
SUB TOTALES										5388	6980	9190			
POTENCIA INSTALADA (KW) = 21,56 FACTOR DE DEMANDA = 0,6 POTENCIA DEMANDADA (KW) = 12,93 FACTOR DE POTENCIA = 0,9 POTENCIA DEMANDADA (KVA) = 14,37															
ALIMENTADOR = 4x8AWG+1x8AWG BREACKER = 3Px32-40 AMP. ICC = 6 KA 600 V DUCTO = PVC 1"															

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

Tabla 14*Cuadro de Carga TD-P1 Primer piso*

Nro Cto	DESCRIPCIÓN	ILUMINACION (W)					TOMA CORRIENTE	TOMA DE FUERZA		DEMANDA POR FASE W			PROT. POLOS AMP.	CONDUCTOR AWG TW CU	DUCTO PVC (pulg).
		PANEL LED				REFLECTOR	200 W	2000 W	5000 W	FASE R - N	FASE S - N	FASE T - N			
		1X18	1X32	1X34	1X33	1X200									
1	ILUMINACION		42							1344			1X16	2x14	5 / 8 "
2	ILUMINACION				8						264		1X16	2x14	5 / 8 "
3	ILUMINACION	5	18	17								1244	1X16	2x14	5 / 8 "
4	TOMACORRIENTES						12			2400			1X20	3x12	3 / 4"
5	TOMACORRIENTES						12				2400		1X20	3x12	3 / 4"
6	TOMACORRIENTES						12					2400	1X20	3x12	3 / 4"
7	FUERZA SHUCKO							1		2000			1X32	3x10	3 / 4"
8	FUERZA SHUCKO							1			2000		1X32	3x10	3 / 4"
9	FUERZA EXTRACTOR 1							1				2000	1X32	3x10	
10	FUERZA EXTRACTOR 2							1		2000			1X32	3x10	
SUB TOTALES										7744	4664	5644			
POTENCIA INSTALADA (KW) = 18,05 FACTOR DE DEMANDA = 0,6 POTENCIA DEMANDADA (KW) = 10,83 FACTOR DE POTENCIA = 0,9 POTENCIA DEMANDADA (KVA) = 12,03															
ALIMENTADOR = 4x8AWG+1x8AWG BREACKER = 3Px32-40 AMP. ICC = 6 KA 600 V DUCTO = PVC 1"															

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

Tabla 15*Cuadro de Carga TD-P2 Segundo Piso*

Nro Cto	DESCRIPCIÓN	ILUMINACION (W)					TOMA CORRIENTE	TOMA DE FUERZA		DEMANDA POR FASE W			PROT. POLOS AMP.	CONDUCTOR AWG TW CU	DUCTO PVC (pulg).
		PANEL LED				REFLECTOR	200 W	2000 W	5000 W	FASE R - N	FASE S - N	FASE T - N			
		1X18	1X32	1X34	1X33	1X200									
1	ILUMINACION	5	11		15					937			1X16	2x14	5 / 8 "
2	ILUMINACION				45						1485		1X16	2x14	5 / 8 "
3	ILUMINACION			27								918	1X16	2x14	5 / 8 "
4	ILUMINACION	3	15	5	14					1166			1X16	2x14	5 / 8 "
5	TOMACORRIENTES						15				3000		1X20	3x12	3 / 4"
6	TOMACORRIENTES						18					3600	1X20	3x12	3 / 4"
7	TOMACORRIENTES						18			3600			1X20	3x12	3 / 4"
8	TOMACORRIENTES						18				3600		1X20	3x12	3 / 4"
SUB TOTALES										5703	8085	4518			
POTENCIA INSTALADA (KW) = 18,31 FACTOR DE DEMANDA = 0,6 POTENCIA DEMANDADA (KW) = 10,98 FACTOR DE POTENCIA = 0,9 POTENCIA DEMANDADA (KVA) = 12,20															
ALIMENTADOR = 4x8AWG+1x8AWG BREACKER = 3Px32-40 AMP. ICC = 6 KA 600 V DUCTO = PVC 1"															

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

La presentación de los cuadros de carga por piso evidencia la distribución detallada de los circuitos eléctricos del Edificio Taypi, diferenciando iluminación, tomacorrientes, equipos especiales y sistemas auxiliares. Este desglose permite observar cómo se concentran las demandas en función del uso de cada nivel: la planta baja presenta valores más elevados debido a la presencia de talleres y espacios de acceso, mientras que los pisos superiores muestran cargas más homogéneas, propias de aulas y oficinas administrativas.

Asimismo, los cuadros de carga permiten identificar la capacidad de cada circuito y su relación con las fases, lo que garantiza un equilibrio en la distribución eléctrica y reduce riesgos de sobrecarga. Esta información constituye la base para los cálculos posteriores de potencia demandada y perfil de consumo, además de servir como referencia para verificar que el diseño cumpla con las normativas técnicas vigentes y pueda adaptarse a un eventual crecimiento en la población estudiantil del instituto.

4.4.2. Resumen de cargas general

El cuadro general de cargas eléctricas del Edificio Taypi concentra toda la información de las potencias instaladas y demandadas, mostrando de manera clara el consumo total proyectado. Este resumen es esencial porque evita duplicar cálculos y ofrece una visión global del sistema eléctrico.

La *Tabla 16* organiza los valores de cada piso, lo que permite identificar con facilidad las áreas de mayor consumo. Se observa que la planta baja es la que demanda más energía debido a los talleres y equipos especializados, mientras que los niveles superiores, dedicados a aulas y oficinas, presentan cargas más equilibradas y uniformes. Esta diferenciación ayuda a priorizar medidas de eficiencia allí donde el impacto es mayor.

En la *Figura 23* se muestra la comparación entre la potencia instalada y la demandada. El mismo ilustra cómo los factores de demanda reducen los valores iniciales, confirmando la importancia de considerar la simultaneidad de uso en el diseño eléctrico.

Tabla 16*Resumen general de cargas TD-G*

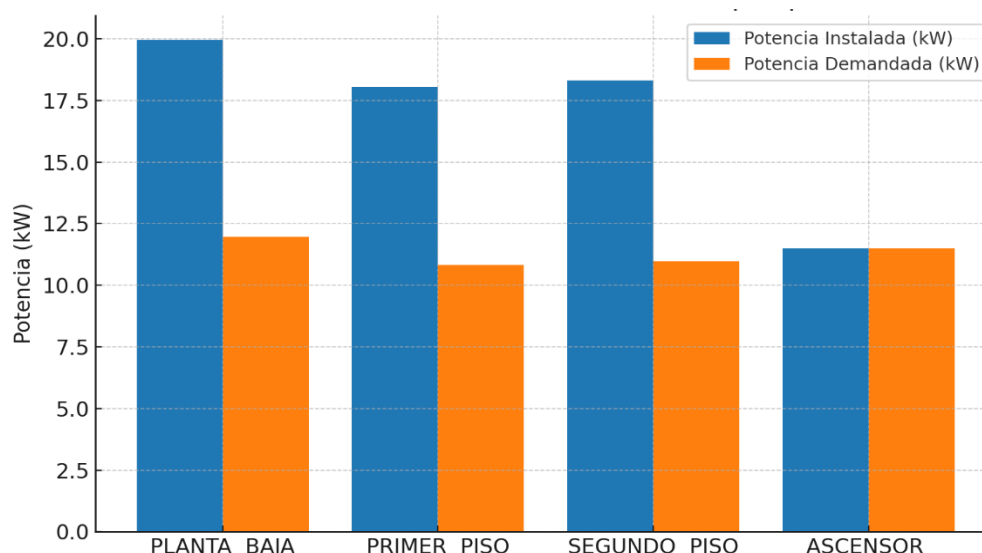
N° CIRCUITO	DESCRIPCION	UBICACIÓN	POTENCIA INSTALADA (KW)	FACTOR DEMANDA F.D.	POTENCIA DEMANDADA (KW)	DEMANDA POR FASE (KW)			VOLTAJE CIRCUITO (V)	NUMERO DE FASES	CORRIENTE PREVISTA (AMP.)	PROTECCI ON POLOS- AMP.	N° CONDUCT AWG	CONDUIT PVC-PULG.
						FASE R - N	FASE S - N	FASE T - N						
C-1	TD-PB	PLANTA BAJA	21,56	0,6	12,93	5,39	6,98	9,19	400	3	34,61	3Px32-40 A	4x8 + 1x10	1"
C-2	TD-P1	PRIMER PISO	18,05	0,6	10,83	7,74	4,66	5,64	400	3	28,99	3Px32-40 A	4x8 + 1x10	1"
C-3	TD-P2	SEGUNDO PISO	18,31	0,6	10,98	5,70	8,09	4,52	400	3	29,39	3Px32-40 A	4x8 + 1x10	1"
C-4	TD -AS	ASCENSOR	11,5	1	11,50	3,8	3,8	3,8	400	3	19,55	3Px32A	4x8 + 1x10	1"
SUB TOTAL TDG			69,416		46,25	22,635	23,529	23,152						
POTENCIA INSTALADA (KW) = 69,42 FACTOR DE SIMULTANEIDAD = 0,8 POTENCIA DEMANDADA (KW) = 37,00 FACTOR DE POTENCIA = 0,9 POTENCIA DEMANDADA (KVA) = 41,11														
ALIMENTADOR = 4x1 AWG BREACKER = 3Px88-125 AMP. ICC = 18 KA 600 V DUCTO = PVC 3"														

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

A continuación, se presenta la figura que compara la potencia instalada y la potencia demandada por piso, lo que permite identificar las áreas de mayor impacto en el consumo global.

Figura 23

Potencia instalada Vs. Demandada por piso



Nota. Elaboración propia, 2026.

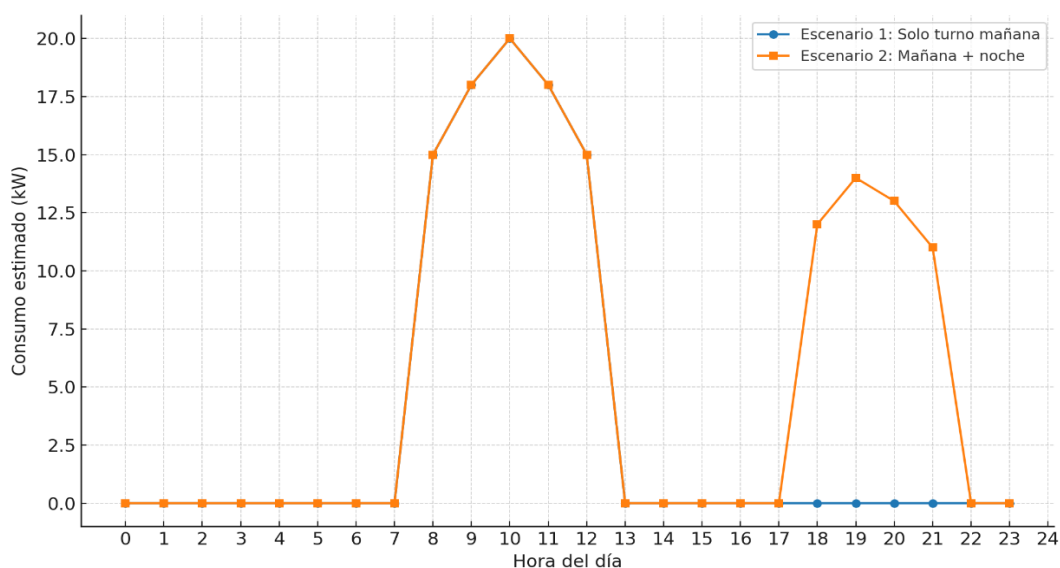
Este análisis confirma que la mayor demanda proviene de los niveles con mayor equipamiento técnico, mientras que los pisos destinados a administración y aulas tienen menores valores relativos.

4.4.3. Perfil estimado de uso energético

El Edificio Taypi operará inicialmente con un único turno de clases matutino de 08:00 a 13:00 horas. Esto concentra la demanda eléctrica en la mañana, con un notable descenso en la tarde. En un escenario futuro, la apertura de un turno nocturno de 18:30 a 22:00 horas añadiría un segundo pico de consumo.

Este perfil horario, al coincidir el pico principal con la mayor radiación solar, sugiere una alta viabilidad de implementar un sistema fotovoltaico para autoconsumo, reduciendo así la dependencia de la red en horas críticas.

Figura 24
Curva diaria de consumo eléctrico



Nota. Elaboración propia, 2026.

4.4.4. Variación de caída de tensión

La caída de tensión es un parámetro clave para garantizar que la energía llegue a todos los puntos del sistema sin pérdidas excesivas. Se evaluó la caída en cada circuito y piso del Edificio Taypi según la ecuación:

$$\Delta V(\%) = \frac{2 \times L \times I \times R}{V_n} \times 100$$

Donde:

- L = Longitud del conductor (m)
- I = Corriente (A)
- R = Resistencia por metro (Ω/m)
- V_n = Tensión nominal del sistema (V)

Los resultados muestran que la caída de tensión se encuentra dentro de los límites recomendados por la NEC:

- Máximo 3% para circuitos de iluminación.
- Máximo 5% para circuitos de fuerza.

Esto confirma que el diseño propuesto es técnicamente correcto y cumple con las normativas vigentes.

Tabla 17*Verificación de caída de tensión en alimentadores secundarios*

CALCULO DE LA CAIDA DE TENSION Y PROTECCION DE ALIMENTADORES SECUNDARIOS									
TABLERO	POTENCIA DEMANDADA (KW)	Nº CONDUCT AWG.	CORRIENTE AMP	RESISTIVIDAD DEL COBRE	LONGITUD (m)	SECCION mm2	VOLTAJE (V)	DV VOLTAJE (%)	PROT ALIM NORM (AMP)
TD-PB	12,93	4x8 + 1x10	20,77	0,01785	23,34	8,4	400	0,446	3Px32-40
TD-P1	10,83	4x8 + 1x10	17,39	0,01785	28,34	8,4	400	0,453	3Px32-40
TD-P2	10,98	4x8 + 1x10	17,64	0,01785	33,34	8,4	400	0,540	3Px32-40
TD-AS	11,50	4x8 + 1x10	18,46	0,01785	29,79	8,4	400	0,506	3X32

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.**Tabla 18***Verificación de caída de tensión en el alimentador principal*

CALCULO DE LA CAIDA DE TENSION Y PROTECCION EN EL ALIMENTADOR PRINCIPAL									
TABLERO	POTENCIA DEMANDADA (KW)	Nº CONDUCT AWG.	CORRIENTE AMP	RESISTIVIDAD DEL COBRE	LONGITUD (m)	SECCION mm2	VOLTAJE (V)	DV VOLTAJE (%)	PROT ALIM NORM (AMP)
T.D.G.	37,00	3x1 + 1x1	59,41	0,01785	50	42,4	400	0,541	3Px88-125

Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025.

4.5. BALANCE ENERGÉTICO DEL EDIFICIO

El balance energético del Edificio Taypi constituye la base para comprender el comportamiento de la demanda eléctrica en cada uno de sus niveles. Este análisis permite no solo cuantificar el consumo total, sino también identificar qué sistemas y ambientes concentran mayores cargas, de manera que se pueda orientar la propuesta hacia estrategias de eficiencia energética viables.

Para su elaboración se han considerado las tres plantas que conforman el edificio (planta baja, primer piso y segundo piso). Cada hoja de cálculo detalla el equipamiento, la potencia instalada, el número de unidades, las horas de uso, los días de operación y, finalmente, el consumo anual en kWh.

4.5.1. Estimación de consumos por sistema

El levantamiento energético del Edificio Taypi permitió identificar las principales cargas instaladas en cada una de sus tres plantas: planta baja, primer piso y segundo piso. En cada nivel se registraron la potencia nominal de los equipos, el número de unidades, el tiempo promedio de uso y los días de funcionamiento anual, datos que sirvieron para calcular el consumo en kilovatios-hora (kWh).

Los resultados evidencian que la planta baja concentra el mayor consumo por la presencia de talleres automotrices y equipos de gran potencia, mientras que en el primer piso destacan los equipos gastronómicos y la iluminación de uso intensivo. El segundo piso, aunque con una menor participación relativa, presenta consumos asociados a tecnologías de la información y audiovisuales, que si bien no son de gran potencia individual, suman un volumen considerable por la cantidad de equipos. Estas diferencias justifican la necesidad de consolidar la información en tablas comparativas y gráficos de resumen, lo que permitirá visualizar la participación relativa de cada sistema y orientar futuras estrategias de eficiencia energética.

A continuación se presentan las tablas obtenidas del levantamiento energético del Edificio, organizadas por cada planta. Estas tablas muestran, en detalle, la distribución de consumos por ambiente y por sistema específico.

Tabla 19*Balance energético Planta Baja*

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
PLANTA BAJA	Taller Dirección y Suspensión	Panel LED cuadrado	0,033	6	8	200	9600,00	316,8	1,64%
		Compresor 24L	1,800	1	2	70	140,00	252	1,31%
		Arco eléctrico	13,200	1	0,5	105	52,50	3,15	0,02%
	Taller Electricidad Automotriz	Panel LED cuadrado	0,033	6	8	200	9600,00	316,8	1,64%
		Computadora LapTop	0,120	1	2	120	240,00	28,8	0,15%
		Cargador de baterías	1,000	1	4	50	200,00	200	1,04%
	Taller Motores a Diésel	Panel LED cuadrado	0,033	6	8	200	9600,00	316,8	1,64%
		Elevador de vehiculos	2,200	1	0,2	80	16,00	35,2	0,18%
	Taller Motores a Gasolina	Panel LED cuadrado	0,033	6	8	200	9600,00	316,8	1,64%
		Limpiador de inyectores	0,200	2	4	105	840,00	168	0,87%
		Cargador de escaner	0,100	1	1	70	70,00	7	0,04%
		Elevador de vehiculos	2,200	1	0,2	80	16,00	35,2	0,18%
	Taller Mecánica general Diagnóstico	Panel LED cuadrado	0,033	6	8	200	9600,00	316,8	1,64%
		Cargador de escaner	0,100	1	1	50	50,00	5	0,03%
		Elevador de vehiculos	2,200	1	0,2	80	16,00	35,2	0,18%
		Lampara de pruebas Piloto	0,100	2	0,15	200	60,00	6	0,03%
	Area vehicular y exteriores	Reflector LED	0,200	13	10	365	47450,00	9490	49,26%
	Area de mantenimiento	Panel LED Rectangular	0,034	1	1	50	50,00	1,7	0,01%
		Arco eléctrico	13,200	1	0,5	80	40,00	528	2,74%
		Equipo de sonido	0,150	1	0,2	50	10,00	1,5	0,01%
	Información	Panel LED	0,018	2	5	210	2100,00	37,8	0,20%
		Computadora de escritorio	0,200	1	5	210	1050,00	210	1,09%

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
PLANTA BAJA	Portería	Panel LED circular	0,018	7	5	365	12775,00	229,95	1,19%
		Licuada	0,600	1	0,2	200	40,00	24	0,12%
		Sumidora	0,600	1	0,2	150	30,00	18	0,09%
		Microondas	0,900	1	0,15	100	15,00	13,5	0,07%
		Refrigerador	0,105	1	24	365	8760,00	919,8	4,77%
		Televisor	0,175	2	3	170	1020,00	178,5	0,93%
		Ducha (Electrica)	5,500	1	0,2	350	70,00	385	2,00%
		Lavadora (9kg)	0,200	1	2	80	160,00	32	0,17%
		Secadora de pelo	0,200	1	0,15	150	22,50	4,5	0,02%
		Computadora escritorio	0,200	1	3	150	450,00	90	0,47%
		Impresora	0,100	1	0,2	150	30,00	3	0,02%
		Router (Wifi)	0,005	1	24	365	8760,00	43,8	0,23%
		Cargador de celular	0,010	2	1	300	600,00	6	0,03%
		Computadora laptop	0,150	1	4	250	1000,00	150	0,78%
	Seguridad y Monitoreo camaras	Panel LED circular	0,018	4	8	210	6720,00	120,96	0,63%
		Computadora de escritorio	0,200	1	24	365	8760,00	1752	9,09%
	Aula Teórica 01	Panel LED Rectangular	0,032	12	5	200	12000,00	384	1,99%
		Televisor	0,175	1	3	150	450,00	78,75	0,41%
	Recibidor	Panel LED Rectangular	0,034	21	4	200	16800,00	571,2	2,97%
		Televisor	0,175	1	3	150	450,00	78,75	0,41%
	Gradas	Panel LED Cuadrado	0,033	6	10	365	21900,00	722,7	3,75%
	Area de basura	Panel LED circular	0,018	1	0,3	250	75,00	1,35	0,01%

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
PLANTA BAJA	Sala multiuso	Panel LED Rectangular	0,032	19	4	100	7600,00	243,2	1,26%
		Televisor	0,175	1	3	150	450,00	78,75	0,41%
		Proyector	0,120	1	3	50	150,00	18	0,09%
	SS. HH.	Panel LED Rectangular	0,034	4	4	210	3360,00	114,24	0,59%
	Deposito	Panel LED Rectangular	0,034	1	2	50	100,00	3,4	0,02%
	Pasillo	Panel LED Rectangular	0,034	1	8	210	1680,00	57,12	0,30%
	Colchon de aire	Panel LED Rectangular	0,034	2	8	210	3360,00	114,24	0,59%
	Ingreso principal	Panel LED Rectangular	0,034	2	8	365	5840,00	198,56	1,03%
TOTAL								19263,82	100,00%

Nota. Elaboración propia, 2026.

Tabla 20

Balance energético Primer Piso

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
PRIMERA PLANTA	Aula teórica 03	Panel LED Rectangular	0,032	10	8	200	16000,00	512	5,80%
		Televisor	0,175	2	3	170	1020,00	178,5	2,02%
	Taller Cocina	Panel LED Rectangular	0,032	21	8	200	33600,00	1075,2	12,17%
		Microondas	0,900	1	0,15	100	15,00	0,9	0,01%
		Refrigerador	0,105	1	24	210	5040,00	529,2	5,99%
		Licuada	0,600	1	0,2	200	40,00	24	0,27%

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
PRIMERA PLANTA	Area de Basura	Panel LED Circular	0,018	1	0,33	250	82,50	1,485	0,02%
	SS.HH.	Panel LED Circular	0,033	4	5	200	4000,00	132	1,49%
	Taller de Bar y coctelería	Panel LED Rectangular	0,032	12	8	200	19200,00	614,4	6,96%
		Licuada	0,600	1	0,2	200	40,00	24	0,27%
		Refrigerador	0,105	1	8	365	2920,00	306,6	3,47%
		Batidora	0,350	1	0,3	100	30,00	10,5	0,12%
	Area de mantenimiento	Panel LED Rectangular	0,018	1	1	50	50,00	0,9	0,01%
	Taller de panadería y pastelería	Panel LED Rectangular	0,032	18	8	200	28800,00	921,6	10,44%
		Calentador de agua	0,600	1	0,2	100	20,00	12	0,14%
		Horno eléctrico	2,000	1	4	30	120,00	240	2,72%
	Area de almacenamiento Seco	Panel LED Circular	0,018	1	8	200	1600,00	28,8	0,33%
		Heladera para carne roja	0,300	1	24	50	1200,00	360	4,08%
		Camara de frio	0,200	1	24	70	1680,00	336	3,80%
	Area de almacenamiento frio	Panel LED Circular	0,018	1	8	200	1600,00	28,8	0,33%
		Heladera para carne roja	0,300	1	24	50	1200,00	360	4,08%
		Camara de frio verduras	0,200	1	24	70	1680,00	336	3,80%
		Cámara de congelados	0,300	1	24	80	1920,00	576	6,52%
	Pasillo	Panel LED Rectangular	0,034	15	10	365	54750,00	1861,5	21,08%
	Gradas	Panel LED Cuadrado	0,033	3	10	365	10950,00	361,35	4,09%
TOTAL								8831,735	100,00%

Nota. Elaboración propia, 2026.

Tabla 21*Balance energético Segundo Piso*

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
SEGUNDA PLANTA	Aula Teórica 03	Panel LED Rectangular	0,032	15	5	200	15000,00	480	3,78%
		Televisor	0,175	2	3	105	630,00	110,25	0,87%
	Sala de Computación 1	Panel LED Cuadrado	0,033	11	8	100	8800,00	290,4	2,28%
		Computadora de escritorio	0,200	25	4	100	10000,00	2000	15,73%
		Televisor	0,175	1	3	100	300,00	52,5	0,41%
	Aula teórica 04	Panel LED Cuadrado	0,033	12	5	200	12000,00	396	3,11%
		Computadora LapTop	0,120	1	2	120	240,00	28,8	0,23%
		Proyector	0,120	1	4	40	160,00	19,2	0,15%
	Sala Audio - Visual	Panel LED Cuadrado	0,033	12	5	200	12000,00	396	3,11%
		Computadora LapTop	0,120	1	2	120	240,00	28,8	0,23%
		Proyector	0,120	1	4	40	160,00	19,2	0,15%
	Aula Teórico 05	Panel LED Cuadrado	0,033	12	5	200	12000,00	396	3,11%
		Computadora LapTop	0,120	1	2	120	240,00	28,8	0,23%
		Proyector	0,120	1	4	40	160,00	19,2	0,15%
	Aula Teórico 06	Panel LED Cuadrado	0,033	12	5	200	12000,00	396	3,11%
		Computadora LapTop	0,120	1	2	120	240,00	28,8	0,23%
		Proyector	0,120	1	4	40	160,00	19,2	0,15%
	SS. HH.	Pane LED Rectangular	0,032	1	4	210	840,00	26,88	0,21%
	Cocineta	Panel LED Circular	0,018	1	4	100	400,00	7,2	0,06%
	Area de Basura	Panel LED Circular	0,018	1	0,33	250	82,50	1,485	0,01%

NIVEL	AMBIENTE	EQUIPAMIENTO	POTENCIA NOMINAL (kW)	CANTIDAD DE UNIDADES	HORAS DE USO POR DÍA [h/día]	CANTIDAD DE DÍAS AL AÑO	HORAS DE USO POR AÑO [h/año]	CONSUMO ANUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (%)
SEGUNDA PLANTA	Deposito de libros	Panel LED Circular	0,018	4	4	150	2400,00	43,2	0,34%
	Biblioteca	Panel LED Rectangular	0,032	11	6	180	11880,00	380,16	2,99%
		Computadora LapTop	0,120	1	4	210	840,00	100,8	0,79%
	Sala de Computación 2	Panel LED Cuadrado	0,033	8	8	100	6400,00	211,2	1,66%
		Computadora de escritorio	0,200	25	4	100	10000,00	2000	15,73%
		Televisor	0,175	1	3	100	300,00	52,5	0,41%
	Area de Mantenimiento	Panel LED Circular	0,018	1	1	50	50,00	0,9	0,01%
	Rectorado	Panel LED Cuadrado	0,033	3	5	210	3150,00	103,95	0,82%
		Computadora de escritorio	0,200	1	5	200	1000,00	200	1,57%
	Dirección administrativ	Panel LED Cuadrado	0,033	2	5	210	2100,00	69,3	0,55%
		Computadora de escritorio	0,200	1	5	200	1000,00	200	1,57%
	Director Académico	Panel LED Cuadrado	0,033	3	5	210	3150,00	103,95	0,82%
		Computadora de escritorio	0,200	1	5	200	1000,00	200	1,57%
	Secretaria y sala de espera	Panel LED Cuadrado	0,033	4	5	210	4200,00	138,6	1,09%
		Computadora de escritorio	0,200	1	5	200	1000,00	200	1,57%
	Pasillos	Panel LED Rectangular	0,034	30	10	365	109500,00	3723	29,28%
	Gradas	Panel LED Cuadrado	0,033	2	10	365	7300,00	240,9	1,89%
TOTAL								12713,175	100,00%

Nota. Elaboración propia, 2026.

Con el propósito de facilitar la interpretación de estos resultados, en la Tabla 22 se presenta un resumen por planta, en el que se consolida la información de las tablas originales.

Tabla 22

Consumo anual estimado por planta en el Edificio Taypi

Nivel	Consumo anual (kWh)	Participación (%)
Planta Baja	19263,82	47%
Primer Piso	8831,735	22%
Segundo Piso	12713,175	31%
Total	40808,73	100%

Nota. Elaboración propia, 2026.

4.5.2. Balance anual proyectado

Tras la identificación de consumos por planta, resulta necesario consolidar la información en un balance anual global. Esto permite visualizar el peso relativo de los distintos sistemas que componen el edificio y establecer prioridades para la implementación de medidas de eficiencia.

En las tablas originales se aprecia que la mayor parte del consumo se debe a la iluminación, seguida de los equipos de talleres automotrices, los equipos gastronómicos y en menor medida, los audiovisuales.

Con base en esta información, en la Tabla 23 se presenta una síntesis del balance energético anual, organizada por sistemas principales.

Tabla 23

Balance energético anual por sistema del Edificio Taypi

Sistema / Área Principal	Consumo estimado (kWh/año)	Participación (%)
Iluminación	10361,01	25,39%
Equipos de talleres	1696,25	4,16%
Equipos gastronómicos	4090,50	10,02%
TICs y audiovisuales	8204,40	20,10%
Servicios generales	16456,57	40,33%
Total general	40808,73	100,00%

Nota. Elaboración propia, 2026.

4.6. EVALUACIÓN DE INDICADORES ENERGÉTICOS

La evaluación de los indicadores energéticos permite caracterizar el desempeño del Edificio Taypi a partir del consumo anual estimado de 40808,73 kWh. Para ello se consideran indicadores técnicos, económicos y ambientales, relacionados con la superficie construida, la población estudiantil, los costos de energía y las emisiones de CO₂. Los resultados obtenidos permiten establecer una valoración integral del comportamiento energético proyectado del edificio y constituyen una base para la selección de las estrategias desarrolladas posteriormente.

Estos indicadores se agrupan en tres categorías principales: técnicos, económicos y ambientales. Los indicadores técnicos reflejan el nivel de uso y eficiencia de la energía; los económicos cuantifican el impacto financiero del consumo eléctrico y los beneficios derivados de la eficiencia; mientras que los ambientales expresan la magnitud de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas al consumo energético del edificio.

En conjunto, estos parámetros permiten evaluar el desempeño energético del Edificio Taypi en sus tres dimensiones fundamentales: técnica, económica y ecológica.

4.6.1. Indicadores técnicos

Los indicadores técnicos permiten analizar la eficiencia energética del Edificio Taypi desde una perspectiva operativa y física, a partir de los resultados obtenidos en el balance energético anual. Su evaluación considera el consumo total de energía eléctrica, la superficie construida del edificio y el número de estudiantes que hacen uso de la infraestructura, permitiendo caracterizar el nivel de desempeño energético del proyecto.

Con base en estos criterios, se definen los indicadores técnicos más representativos para edificaciones educativas, los cuales permiten comparar el comportamiento energético del edificio con valores de referencia y evaluar su grado de eficiencia.

$$CE_{m^2} = \frac{E_{total}}{A}$$

$$CE_{est} = \frac{E_{total}}{N_{est}}$$

Donde:

CE_{m^2} = Consumo específico por superficie

CE_{est} = Consumo por estudiante

E_{total} = Consumo total anual de energía (kWh/año)

A = Superficie construida (m^2)

N_{est} = Número de estudiantes

Para el Edificio Taypi, el consumo total anual estimado es de 40808,73 kWh/año. Considerando una superficie construida de 4394,87 m^2 , se obtiene un consumo específico de 9,29 kWh/ m^2 ·año. Asimismo, tomando como población de referencia 300 estudiantes, el consumo energético alcanza 136,03 kWh/estudiante·año. Estos indicadores permiten establecer una referencia cuantitativa del desempeño energético proyectado del edificio.

Asimismo, tomando como población de referencia que en promedio es de 300 estudiantes, el consumo energético por estudiante alcanza un valor de 136,03 kWh/estudiante·año, lo cual resulta coherente con el tipo de uso del edificio y con las características funcionales del proyecto. Este indicador permite dimensionar el impacto energético individual del edificio y sirve como base para posteriores evaluaciones comparativas y estrategias de mejora.

Tabla 24

Indicadores técnicos del edificio

Indicador	Valor estimado	Unidad
Consumo específico por superficie	9,29	kWh/ m^2 * año
Consumo por estudiante	136,03	kWh/estudiante * año

Nota. Elaboración propia, 2026.

Los valores obtenidos muestran que el consumo energético del Edificio Taypi presenta una intensidad relativamente baja respecto a su superficie construida. Sin embargo, al tratarse de una edificación aún en etapa de diseño, estos indicadores deben interpretarse como valores proyectados y no como mediciones de operación real. Su utilidad principal radica en establecer una línea base que permita evaluar posteriormente el efecto de las estrategias de eficiencia energética propuestas.

4.6.2. Indicadores económicos

La evaluación de los indicadores económicos tiene como objetivo determinar el costo anual asociado al consumo eléctrico del Edificio Taypi, así como su distribución relativa en función del número de estudiantes y de la superficie construida. Dado que la edificación aún no se encuentra en operación, la estimación se realiza a partir de los valores proyectados obtenidos en el balance energético y de las tarifas eléctricas vigentes aplicables a la categoría General, las cuales se sitúan en un rango comprendido entre Bs. 1,21 y Bs. 2,05 por kWh.

Con el fin de reflejar las posibles variaciones en el costo de la energía eléctrica, se establecen tres escenarios de análisis: bajo, medio y alto, que permiten evaluar el impacto económico del consumo bajo distintas condiciones tarifarias. Los indicadores económicos se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$C_{anual} = E_{total} \times T$$

$$C_{est} = \frac{C_{anual}}{N_{est}}$$

$$C_{m^2} = \frac{C_{anual}}{A}$$

Donde:

C_{anual} = Costo total anual de electricidad (Bs/año)

E_{total} = Consumo anual de energía eléctrica (kWh/año)

T = Tarifa eléctrica promedio (Bs/kWh)

C_{est} = Costo de electricidad por estudiante (Bs./estudiante x año)

N_{est} = Número de estudiantes que usarán el Edificio Taypi

A = Superficie construida del edificio (m^2)

C_{m^2} = Costo de electricidad por metro cuadrado de superficie construido (Bs/m² x año)

Como ejemplo de cálculo se tomará el indicador costo de electricidad por estudiante que permite estimar cuánto representa, en términos económicos, el consumo anual de energía eléctrica del edificio para cada estudiante que utiliza la infraestructura.

Para ello empezamos calculando el costo anual

$$C_{anual} = E_{total} \times T$$

$$C_{anual} = 40808,73 \times 1,63$$

$$C_{anual} = 66518,23 \text{ Bs/año}$$

Ahora se aplica la ecuación del indicador:

$$C_{est} = \frac{C_{anual}}{N_{est}}$$

$$C_{est} = \frac{66518,23}{300}$$

$$C_{est} = 221,73 \text{ Bs/estudiante} \times \text{año}$$

Este resultado indica que, considerando el consumo energético proyectado del edificio y una población de 300 estudiantes, cada usuario representa un costo promedio anual de aproximadamente: 222 bolivianos por estudiante.

Al igual que en el anterior ejemplo se obtienen los indicadores económicos que se presentan en la **Tabla 25**, los cuales permiten cuantificar el impacto financiero del consumo energético del edificio bajo distintos escenarios tarifarios. Estos resultados constituyen una base objetiva para la evaluación de medidas de eficiencia energética y para la estimación de los beneficios económicos derivados de su implementación.

Tabla 25

Indicadores económicos del edificio

Escenario	Tarifa (Bs/kWh)	Etotal (kWh/año)	Canual (Bs/año)	Cest (Bs/estudiante *año)	Cm2 (Bs/m ² *año)
Bajo	1,21	40808,73	49378,56	164,60	11,24
Medio	1,63	40808,73	66518,23	221,73	15,14
Alto	2,05	40808,73	83657,90	278,86	19,04

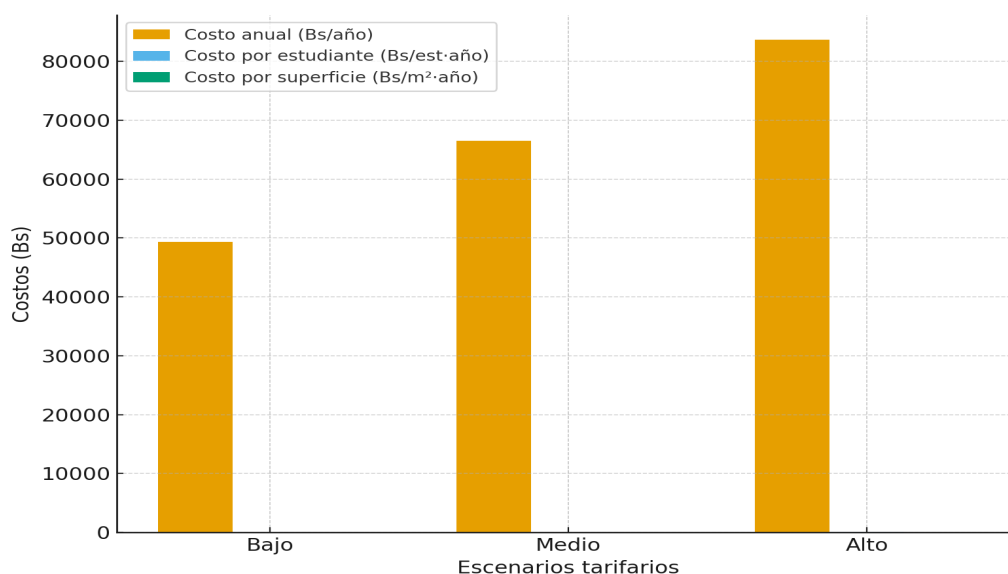
Nota. Elaboración propia, 2026.

Los resultados muestran una variación significativa del costo anual en función de la tarifa considerada. Entre el escenario bajo y el alto existe una diferencia de Bs

34279,34 por año, lo que evidencia la sensibilidad económica del edificio frente a las variaciones del precio de la energía eléctrica. En este sentido, la implementación de medidas de eficiencia energética y generación fotovoltaica adquiere mayor relevancia en escenarios de mayor costo de electricidad, al reducir la exposición del edificio al consumo proveniente de la red.

Figura 25

Comparación de costos energéticos por escenario



Nota. Elaboración propia, 2026.

4.6.3. Indicadores ambientales

Los indicadores ambientales miden el impacto ecológico asociado al consumo de electricidad del Edificio Taypi, expresado en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Para su determinación se utiliza el factor de emisión promedio del sistema eléctrico boliviano, establecido en aproximadamente 0,48 kg CO₂/kWh, de acuerdo con reportes del Ministerio de Hidrocarburos y Energías.

Este enfoque permite cuantificar de manera objetiva la huella ambiental generada por el funcionamiento de la edificación y evaluar las oportunidades de mitigación mediante la aplicación de medidas de eficiencia energética y el uso de energías renovables.

$$CO_2 = E_{total} \times FE$$

$$CO_{2,est} = \frac{CO_2}{N_{est}}$$

$$CO_{2,m^2} = \frac{CO_2}{A}$$

Donde:

CO_2 = Emisiones anuales totales (kg CO_2 /año)

FE = Factor de emisión (kg CO_2 /kWh)

E_{total} = Consumo energético total

N_{est} = Número de estudiantes

A = Superficie construida del edificio

Con el valor de $E_{total} = 40808,73$ kWh/año y un factor de emisión de FE = 0,48Kg CO_2 /kWh, las emisiones anuales proyectadas ascienden a aproximadamente 19588,19 kg CO_2 /año, equivalentes a 19,59 toneladas de CO_2 por año.

A manera de ejemplo se calculará las emisiones por estudiante.

$$CO_{2,est} = \frac{CO_2}{N_{est}}$$

$$CO_{2,est} = \frac{19588,19}{300}$$

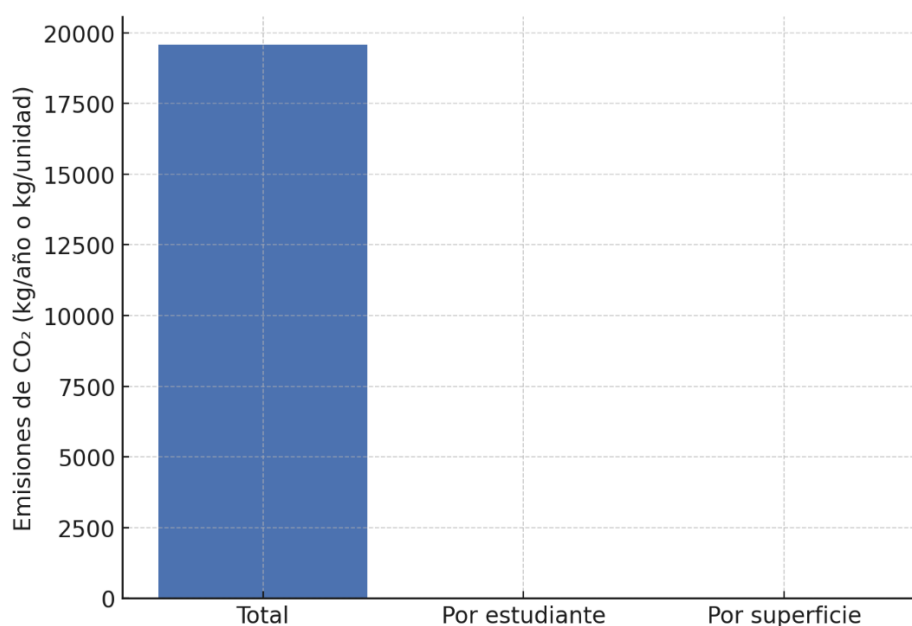
$$CO_{2,est} = 65,29 \text{ kg}CO_2/\text{estudiante} * \text{año}$$

Tabla 26

Indicadores ambientales del edificio Taypi

Indicador	Valor estimado	Unidad
Emisiones anuales de CO_2	19588,19	kg CO_2 /año
Emisiones por estudiante	65,29	kg CO_2 /estudiante*año
Emisiones por superficie	4,46	kg CO_2 /m ² *año

Nota. Elaboración propia, 2026.

Figura 26*Emisiones anuales de CO₂ del edificio Taypi*

Nota. Elaboración propia, 2026.

El consumo energético proyectado del Edificio Taypi representa aproximadamente 19,59 toneladas de CO₂ por año bajo las condiciones actuales de cálculo. Este resultado constituye la línea base ambiental del proyecto y permite cuantificar posteriormente el efecto de las medidas propuestas. De acuerdo con la evaluación desarrollada, la implementación conjunta de las estrategias de eficiencia energética y del sistema fotovoltaico permitiría evitar aproximadamente 19,59 toneladas de CO₂ por año, reduciendo de manera significativa la huella de carbono asociada al consumo eléctrico.

4.6.4. Análisis comparativo con referencias internacionales de eficiencia energética

El análisis comparativo con referencias internacionales permite situar el desempeño energético del Edificio Taypi dentro de un contexto técnico más amplio, facilitando una evaluación objetiva de sus indicadores de consumo y de su impacto ambiental.

Este enfoque no solo contribuye a validar los resultados obtenidos en los apartados anteriores, sino que también permite establecer la posición relativa del edificio frente a los estándares de eficiencia energética aplicables a edificaciones educativas a nivel internacional. De esta manera, se consolida una visión integral del comportamiento

energético, económico y ambiental del proyecto, en coherencia con los principios de sostenibilidad que promueve la arquitectura contemporánea.

Diversos estudios desarrollados por organismos de referencia mundial, como el National Renewable Energy Laboratory (NREL), el U.S. Department of Energy (DOE) y el European Commission Joint Research Centre (JRC), han definido rangos típicos de consumo energético para instituciones educativas.

De acuerdo con estas fuentes, en edificios de enseñanza general el consumo eléctrico específico suele situarse entre 40 y 60 kWh/m²·año, mientras que en universidades y centros tecnológicos este valor puede superar los 100 kWh/m²·año, debido al uso intensivo de laboratorios, talleres especializados y sistemas de climatización. En regiones con políticas avanzadas de eficiencia energética, como la Unión Europea, los valores de referencia varían entre 25 y 80 kWh/m²·año, dependiendo del clima, del nivel de equipamiento y del tipo de instalación.

Bajo esta perspectiva, el Edificio Taypi, con un consumo energético específico de 9,29 kWh/m²·año, presenta un desempeño notablemente eficiente, situándose muy por debajo de los rangos de referencia reportados en la literatura internacional.

Este resultado se explica principalmente por las condiciones particulares de uso del edificio, la naturaleza de sus cargas dominadas por sistemas de iluminación y con una participación limitada de equipos de alta demanda y la incorporación de estrategias pasivas de diseño, tales como la adecuada orientación solar.

Tabla 27

Comparación de indicadores energéticos con referencias internacionales

Indicador	Edificio Taypi	Referencia internacional	Fuente	Evaluación
Consumo específico (kWh/m ² ·año)	9,29	40–60 (escuelas EE.UU.)	NREL, 2019	Muy eficiente
Consumo específico (kWh/m ² ·año)	9,29	25–80 (edificios escolares UE)	JRC, 2020	Muy eficiente
Consumo específico (kWh/m ² ·año)	9,29	100–150 (universidades técnicas)	DOE, 2020	Eficiente

Nota. Elaboración propia, 2026.

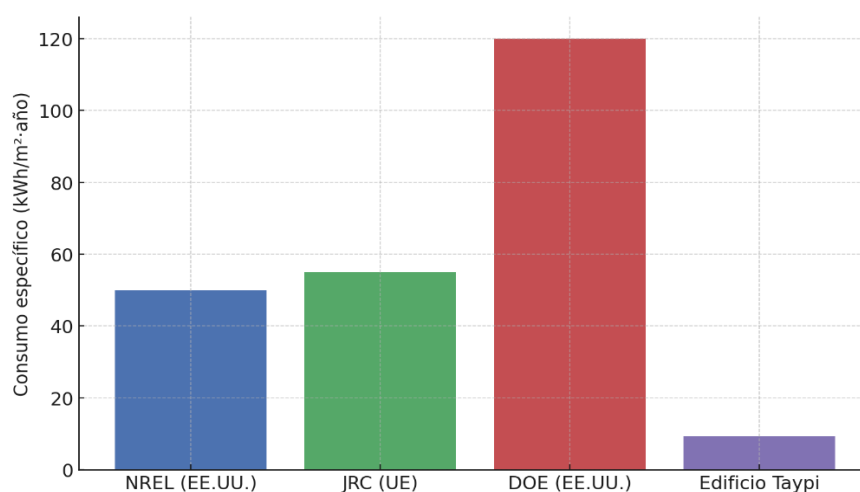
El análisis de la **Tabla 27** evidencia que el Edificio Taypi se sitúa consistentemente por debajo de los rangos de consumo reportados en la bibliografía internacional, incluso en comparación con edificaciones escolares que cuentan con certificaciones de eficiencia energética en climas templados.

La comparación también evidencia que los resultados del Edificio Taypi no deben atribuirse únicamente a la aplicación de medidas de eficiencia, puesto que el consumo estimado depende de las características funcionales del edificio, los horarios de uso, la superficie construida y los equipos considerados en el balance. En consecuencia, el principal valor de este indicador es establecer una línea base que permita evaluar la mejora obtenida después de incorporar las estrategias propuestas.

El Edificio Taypi presenta un consumo específico proyectado de 9,29 kWh/m²·año, valor inferior a los rangos de referencia considerados para edificaciones educativas. Esta diferencia sugiere un desempeño energético favorable en términos de consumo estimado; sin embargo, el resultado debe interpretarse con cautela debido a que corresponde a una edificación aún en etapa de diseño y se basa en supuestos de ocupación y uso. Por tanto, la comparación constituye una referencia inicial y no una certificación de eficiencia energética del edificio.

Figura 27

Comparación del consumo específico con referencias internacionales



Nota. Elaboración propia, 2026.

En términos de impacto ambiental, la baja intensidad energética del edificio contribuye directamente a la reducción de emisiones de CO₂, mejorando su perfil de sostenibilidad y su aporte a los objetivos globales de mitigación del cambio climático. Además, el resultado refuerza la pertinencia de las estrategias de eficiencia y la integración de energías renovables que se desarrollarán en los siguientes apartados, consolidando la visión del Edificio Taypi como un modelo replicable para edificaciones educativas públicas en Bolivia.

4.7. PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

El presente apartado desarrolla la propuesta de estrategias de eficiencia energética para el Edificio Taypi, como componente central del trabajo de grado orientado a la optimización del consumo eléctrico y al fortalecimiento de las condiciones técnicas para la integración de energías renovables. Esta propuesta se fundamenta en los resultados del diagnóstico energético, el cual permitió identificar que la mayor parte de la demanda eléctrica se concentra en los sistemas de iluminación y en determinados equipos de apoyo.

En este contexto, la propuesta no se limita a la aplicación de soluciones aisladas, sino que plantea un conjunto coherente de estrategias de eficiencia energética concebidas como un proceso progresivo de mejora del desempeño energético del edificio. A través de estas estrategias, se busca reducir la demanda eléctrica, optimizar el uso de los recursos disponibles y consolidar una cultura institucional orientada al uso racional de la energía.

La propuesta de estrategias de eficiencia energética se estructura en tres niveles de intervención complementarios, que permiten abordar el problema desde una perspectiva integral:

- a) **Acciones pasivas**, orientadas a disminuir la demanda energética mediante el aprovechamiento de las condiciones arquitectónicas, la iluminación natural y la ventilación.
- b) **Acciones activas**, enfocadas en la optimización de los sistemas eléctricos a través de la incorporación de tecnologías más eficientes y sistemas básicos de control.

- c) **Acciones de gestión**, dirigidas a fortalecer las prácticas de uso responsable de la energía mediante capacitación, monitoreo y mantenimiento planificado.

Tabla 28

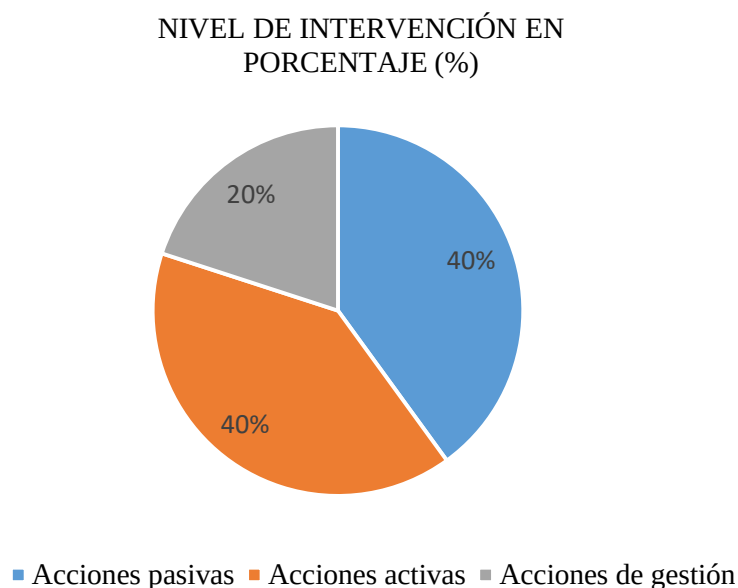
Clasificación de las estrategias de eficiencia energética según nivel de intervención

Nivel de intervención	Objetivo principal	Acciones propuestas
Acciones pasivas	Reducir la demanda energética del edificio	Orientación solar adecuada, uso de doble vidrio, colores reflectantes, ventilación cruzada
Acciones activas	Mejorar la eficiencia de los sistemas eléctricos	Sustitución de luminarias por tecnología LED, sensores de movimiento, temporizadores, control por zonas
Acciones de gestión	Promover el uso racional de la energía	Campañas de concientización, monitoreo energético, mantenimiento preventivo

Nota. Elaboración propia, 2026.

Figura 28

Niveles de intervención en porcentaje



Nota. Elaboración propia, 2026.

Este enfoque permite que la propuesta de estrategias de eficiencia energética no solo responda a las necesidades actuales del Edificio Taypi, sino que también establezca una base sólida para la implementación futura de soluciones de generación renovable, particularmente el sistema fotovoltaico planteado en los apartados siguientes.

4.7.1. Enfoque general de intervención

El enfoque general de intervención establece la metodología mediante la cual se implementará la propuesta de estrategias de eficiencia energética, definiendo una secuencia ordenada de acciones que permita garantizar resultados técnicos medibles y sostenibles en el tiempo. Mientras que el apartado anterior describe el contenido estratégico de la propuesta, el presente punto se centra en el proceso de aplicación de dichas estrategias.

Desde una perspectiva técnica, se parte del principio de que las estrategias de eficiencia energética deben constituir la primera etapa de cualquier proyecto de integración de energías renovables.

En este sentido, la reducción de la demanda eléctrica mediante una adecuada propuesta de eficiencia se convierte en la base para un dimensionamiento más preciso y económicamente viable del sistema fotovoltaico que se desarrollará en el apartado 4.8.

La implementación de la propuesta de estrategias de eficiencia energética se organiza en cuatro etapas principales:

- a) Diagnóstico energético, orientado a identificar los patrones de consumo, las cargas instaladas y los principales focos de ineficiencia.
- b) Priorización de estrategias, basada en el análisis del impacto energético, la viabilidad técnica y los costos de implementación.
- c) Intervención técnica, mediante la aplicación progresiva de acciones pasivas, activas y de gestión.
- d) Seguimiento y evaluación, a través del uso de indicadores que permitan verificar la efectividad de las estrategias implementadas.

Este enfoque metodológico permite consolidar una propuesta de estrategias de eficiencia energética coherente, realista y adaptada a las condiciones del Instituto Tecnológico Bolivia Mar. Asimismo, sienta las bases para futuras evaluaciones de desempeño energético y para la posible adopción de sistemas de gestión de la energía, como la norma ISO 50001 o esquemas equivalentes a nivel nacional.

Tabla 29*Esquema metodológico de aplicación de las estrategias de eficiencia energética*

Etapas	Objetivo	Herramientas principales	Resultado esperado
Diagnóstico	Caracterizar el consumo eléctrico	Balance energético, cuadros de carga	Identificación de oportunidades de mejora
Priorización	Seleccionar estrategias de mayor impacto	Análisis técnico económico	Estrategias jerarquizadas
Intervención	Implementar medidas de eficiencia	Sustitución tecnológica, control, capacitación	Reducción del consumo eléctrico
Evaluación	Verificar resultados	Indicadores energéticos	Base técnica para el diseño fotovoltaico

Nota. Elaboración propia, 2026.

La priorización de las estrategias responde a su relación entre potencial de ahorro, factibilidad técnica y condiciones de operación del edificio. En este sentido, las medidas de iluminación y control adquieren mayor prioridad debido a su incidencia sobre el consumo eléctrico y a la posibilidad de incorporarlas desde la etapa de diseño, mientras que las medidas pasivas y de gestión complementan estos resultados mediante acciones de menor complejidad operativa.

4.7.2. Estrategia de iluminación eficiente

La estrategia de iluminación eficiente constituye uno de los pilares de la propuesta de estrategias de eficiencia energética del Edificio Taypi, considerando que el sistema de iluminación representa la principal demanda eléctrica del edificio. En este proyecto, la eficiencia no se plantea como una acción correctiva posterior, sino como un criterio incorporado desde la fase de diseño, lo que permite garantizar un desempeño energético favorable durante toda la vida útil de la edificación.

La estrategia se estructura a partir de cinco componentes fundamentales tecnología, control, diseño, gestión y mantenimiento, los cuales se desarrollan a continuación de manera individual, con el fin de facilitar su análisis técnico y la incorporación de material gráfico de apoyo.

4.7.2.1. Tecnología de alta eficiencia energética

El componente tecnológico se basa en el uso exclusivo de luminarias LED de alta eficiencia energética, seleccionadas por su elevada eficacia luminosa y su bajo consumo específico. Esta decisión de diseño permite reducir de manera permanente la demanda eléctrica del sistema de iluminación, evitando desde el inicio la incorporación de tecnologías convencionales de mayor consumo, como lámparas fluorescentes o de descarga. La adopción de luminarias LED garantiza, además, una mayor vida útil de los equipos y menores requerimientos de mantenimiento correctivo.

Figura 29

Luminaria LED seleccionada



Nota. <https://dioselyna.com/producto/luminaria-panel-led-36w-philips>, 2026.

4.7.2.2. Control mediante sensores y sectorización

El componente de control de la iluminación se orienta a optimizar el uso real de la energía eléctrica mediante la sectorización de circuitos y la aplicación diferenciada de sensores y sistemas de regulación, de acuerdo con la función de cada espacio del edificio.

En áreas de uso intermitente como servicios higiénicos, depósitos y algunas zonas administrativas, se propone la incorporación de sensores de presencia que permitan el encendido automático únicamente cuando se detecta ocupación, evitando consumos

innecesarios durante periodos de inactividad. Esta medida contribuye directamente a la reducción de las horas efectivas de funcionamiento de la iluminación artificial.

Por otro lado, en espacios críticos para la seguridad institucional, como pasillos, gradas e iluminación exterior, los cuales estarán alimentados por el sistema fotovoltaico y deberán permanecer encendidos durante toda la noche. En estos casos, no se plantea el apagado automático de las luminarias mediante sensores, sino un esquema de control por atenuación (dimming), mediante luminarias LED con driver regulable, permitiendo reducir el nivel de iluminación en ausencia de tránsito y restablecerlo automáticamente cuando se detecta presencia. De esta forma, se garantiza simultáneamente la seguridad, el confort visual y la eficiencia energética.

La sectorización por zonas funcionales completa esta estrategia, facilitando un control independiente de cada área del edificio y permitiendo adaptar el suministro eléctrico a la demanda real, sin afectar el normal desarrollo de las actividades académicas.

4.7.2.3. Diseño arquitectónico de iluminación eficiente

El diseño arquitectónico cumple un rol determinante dentro de la estrategia de iluminación eficiente, especialmente a través del aprovechamiento de la iluminación natural. La adecuada orientación de los espacios, la disposición de vanos y la configuración de áreas comunes permiten maximizar el uso de luz diurna, reduciendo la dependencia de la iluminación artificial durante gran parte de la jornada.

Este enfoque no solo contribuye al ahorro energético, sino que también mejora las condiciones de confort visual y bienestar de los usuarios. Para ello se prevé la instalación de ventanales amplios en las fachadas norte y sur, complementados con lucernarios cenitales en áreas interiores que no reciben luz directa. El cálculo preliminar de los niveles de iluminancia establece un promedio superior a 200 lux en la mayoría de los espacios de uso diurno, cumpliendo con las recomendaciones de la Norma Boliviana NB 777 para edificios educativos. Esta estrategia permite reducir de manera significativa el consumo energético asociado a la iluminación artificial durante las horas de mayor radiación solar.

Figura 30
Lucernarios cenitales



Nota. Memoria técnica del proyecto, 2025

El análisis de la radiación solar y su incidencia sobre las diferentes fachadas del Edificio Taypi permite establecer estrategias precisas de orientación y protección. Considerar la trayectoria solar anual no solo optimiza el aprovechamiento de la luz natural, sino que también contribuye al control térmico interior. En la siguiente *Tabla 30* se sintetizan los principales parámetros de asolamiento y las recomendaciones para cada orientación del edificio.

Tabla 30
Parámetros técnicos de orientación, ventilación e iluminación natural

Estrategia	Parámetro técnico	Valor estimado	Beneficio principal
Orientación	Fachadas largas orientadas N-S	$\pm 10^\circ$ de desviación máxima	Mayor control del asoleamiento
Ventilación cruzada	Velocidad de viento promedio	2,5 – 4,5 m/s	Reducción del uso de ventilación mecánica
Iluminación natural	Iluminancia promedio	> 200 lux	Disminución del consumo eléctrico diurno

Nota. Elaboración propia, 2026.

4.7.2.4. Mantenimiento de luminarias

El componente de mantenimiento adquiere especial relevancia debido a las condiciones ambientales del entorno del Edificio Taypi, caracterizadas principalmente por la presencia de vías no pavimentadas y elevados niveles de polvo en suspensión. Estas condiciones favorecen la acumulación progresiva de material particulado sobre luminarias, superficies reflectantes y elementos expuestos, afectando directamente el desempeño de los sistemas de iluminación instalados.

La acumulación de polvo sobre las luminarias reduce gradualmente el flujo luminoso efectivo, lo que puede generar la percepción de niveles insuficientes de iluminación y derivar en un uso innecesario de luz artificial adicional o en una menor calidad visual de los espacios. Por esta razón, la estrategia propuesta incorpora un programa de limpieza periódica, inspección visual y revisión básica de luminarias, orientado a conservar el rendimiento real del sistema y garantizar que la eficiencia energética prevista en la etapa de diseño se mantenga durante la operación cotidiana del edificio.

Tabla 31

Esquema de mantenimiento preventivo

Actividad	Frecuencia	Responsable	Descripción técnica	Beneficio energético
Limpieza de luminarias	Trimestral	Personal de mantenimiento	Retiro de polvo y suciedad en difusores y carcasas con paño seco o aire comp.	Conservación del flujo luminoso real
Inspección visual	Mensual	Personal técnico	Verificación del estado físico de luminarias, soportes y cableado	Prevención de fallas y pérdidas de eficiencia
Revisión de sensores	Semestral	Técnico electricista	Comprobación del funcionamiento de sensores de presencia	Optimización del tiempo de encendido
Ajuste de orientación	Anual	Técnico electricista	Revisión de ángulos de luminarias direccionales	Mejor aprovechamiento del flujo luminoso
Registro de mantenimiento	Permanente	Responsable de infraestructura	Actualización de fichas de mantenimiento	Seguimiento del desempeño energético

Nota. Elaboración propia, 2026.

4.7.2.5. Modelación del ahorro energético de iluminación por diseño eficiente

Debido a que el Edificio Taypi se encuentra en etapa de diseño y contempla luminarias LED desde su concepción, el ahorro asociado a esta medida se estima mediante la comparación con un escenario de referencia convencional.

El ahorro energético anual asociado al diseño eficiente puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$A_{ilum} = (P_{ref} - P_{LED}) * h * N$$

Donde:

A_{ilum} = Ahorro anual de energía en iluminación (kWh/año)

P_{ref} = Potencia de luminaria convencional de referencia (kW)

P_{LED} = Potencia de luminaria LED del diseño actual (kW)

h = Horas anuales de funcionamiento (h/año)

N = Número de luminarias instaladas

Considerando un escenario de referencia con luminarias fluorescentes de 72 W y el diseño actual con luminarias LED de 33 W, para un total de 150 luminarias operando 2.000 h/año, se obtiene:

$$A_{ilum} = (0,072 - 0,033) * 2000 * 150$$

$$A_{ilum} = 11700 \text{ kWh/año}$$

Este resultado evidencia que la estrategia de iluminación eficiente, basada en un diseño optimizado desde el inicio, permite evitar un consumo anual significativo en comparación con una solución convencional.

4.7.3. Estrategia de control térmico y optimización de la envolvente

Dentro de la propuesta de estrategias de eficiencia energética, la optimización de la envolvente del Edificio Taypi constituye una de las intervenciones más relevantes, debido a su impacto directo en el confort térmico, la reducción de pérdidas energéticas y el aprovechamiento de las condiciones climáticas locales.

Considerando que la ciudad de El Alto presenta un clima frío, seco, con elevada radiación solar diurna y presencia frecuente de polvo en suspensión, la estrategia se orienta a equilibrar tres objetivos principales:

- a) Disminuir las pérdidas térmicas en periodos fríos.
- b) Controlar el sobrecalentamiento en zonas altamente expuestas al sol.
- c) Maximizar el uso de recursos pasivos como la luz natural y la ventilación cruzada.

La estrategia se estructura a partir del análisis de los principales componentes constructivos del edificio, los cuales condicionan su comportamiento térmico y energético.

4.7.3.1. Muros exteriores

Los muros exteriores del Edificio Taypi, especialmente en la fachada sur, cumplen un rol fundamental como barrera térmica frente a las bajas temperaturas predominantes. En este sector se identifican vanos con ventanas convencionales, que si bien permiten una adecuada iluminación y ventilación, también representan puntos críticos de pérdida de calor.

La estrategia de eficiencia energética propone optimizar este componente mediante: mejora del sellado de carpinterías, reducción de infiltraciones de aire frío, uso de acabados exteriores de tonalidad clara que disminuyan la absorción térmica no deseada. Estas acciones pueden contribuir a mejorar el comportamiento térmico de la envolvente y reducir potencialmente la necesidad de sistemas eléctricos de apoyo durante periodos de temperaturas extrema.

4.7.3.2. Cubierta y control térmico mediante película de control solar

Actualmente, el diseño de la cubierta del Edificio Taypi está con policarbonato, el cual cumpliría adecuadamente su función de iluminación natural; sin embargo, se ha identificado que no cuenta con un tratamiento de control térmico, lo que favorece el ingreso directo de radiación solar y el incremento de la temperatura interior en horas de alta exposición.

Dentro de la propuesta de estrategias de eficiencia energética, se plantea como medida de mejora la instalación de láminas de control solar sobre la superficie de policarbonato. Estas películas permiten reducir la ganancia térmica al bloquear parte de la radiación infrarroja y ultravioleta, sin afectar de manera significativa la transmisión de luz natural.

La aplicación de este tipo de solución representa una alternativa de implementación relativamente sencilla, cuyo beneficio esperado se relaciona con la reducción de la ganancia solar directa y la mejora del comportamiento térmico de la cubierta.

4.7.3.3. Ventanas y vanos

Las ventanas y vanos del Edificio Taypi cumplen un papel determinante en el balance térmico del edificio, al constituirse en los principales puntos de intercambio de calor con el exterior.

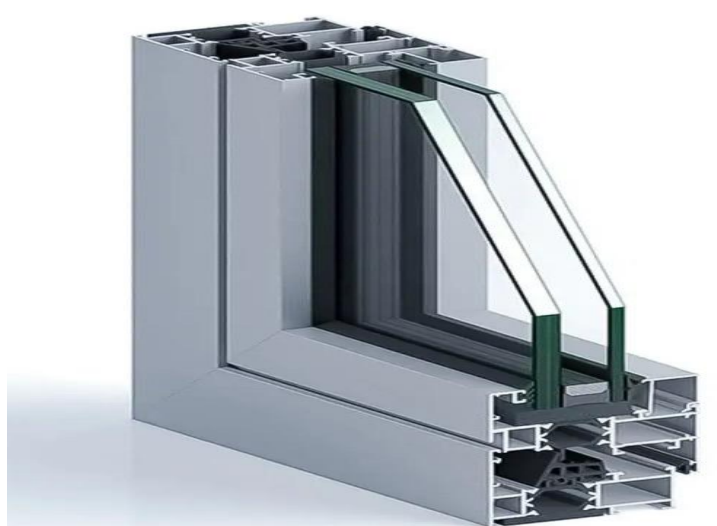
Considerando las condiciones climáticas de la ciudad de El Alto, caracterizadas por temperaturas bajas, alta radiación solar diurna y fuertes gradientes térmicos entre el día y la noche, la propuesta de estrategia de eficiencia energética incorpora soluciones que priorizan el aislamiento térmico sin sacrificar el aprovechamiento de la luz natural.

En este sentido, se proyecta la instalación de doble vidriado hermético (DVH) con configuración 4–12–4 mm (vidrio – cámara de aire – vidrio), lo que permite reducir de manera significativa las pérdidas de calor en comparación con un vidrio monolítico convencional. Este sistema presenta un coeficiente de transmitancia térmica aproximado de $U = 2,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, valor que mejora notablemente el desempeño térmico de la envolvente, contribuyendo a mantener condiciones interiores más estables y confortables.

En la fachada norte, caracterizada por una elevada exposición solar y una superficie acristalada predominante, el uso de DVH resulta especialmente estratégico, ya que permite aprovechar las ganancias solares pasivas durante el día, al mismo tiempo que limita las pérdidas térmicas nocturnas. Por su parte, en la fachada sur, donde la radiación directa es menor, la incorporación de este tipo de vidrio fortalece la función aislante de los muros, reduciendo la sensación de frío interior y disminuyendo la necesidad de apoyos eléctricos para calefacción.

Adicionalmente, la implementación de doble vidriado hermético aporta un beneficio significativo en términos de aislamiento acústico, aspecto particularmente relevante debido a la proximidad del edificio a una avenida con circulación frecuente de vehículos livianos y pesados.

Figura 31
Doble vidriado hermético



Nota. <https://decoeuropa.com.ec/sistemas-de-vidrio-camara>, 2025

La cámara de aire intermedia actúa como una barrera frente a la transmisión del ruido exterior, atenuando de forma perceptible los niveles sonoros que ingresan a las aulas. Este efecto contribuye directamente a la mejora de las condiciones de enseñanza y aprendizaje, al reducir las interferencias acústicas durante las actividades académicas.

Tabla 32
Comparación de desempeño térmico y acústico: vidrio simple vs. Doble vidriado hermético

Característica	Vidrio simple (4 mm)	DVH 4-12-4 mm (cámara con aire)	DVH 4-12-4 mm (cámara con gas argón)
Transmitancia térmica (U)	5,8 W/m ² ·K	2,8 W/m ² ·K	2,7 W/m ² ·K
Reducción acústica (Rw)	25 dB	33 dB	34 dB
Riesgo de condensación	Alto	Bajo	Muy bajo
Control de ganancia solar	Bajo	Medio	Medio
Costo relativo	Bajo	Medio	Medio-Alto
Vida útil estimada	> 20 años	> 25 años	> 25 años

Nota. Elaboración propia basada en los datos de decoeuropa.com.ec, 2026.

4.7.3.4. Aberturas para ventilación

La estrategia de eficiencia energética plantea potenciar este beneficio mediante el control adecuado de la ventilación natural, favoreciendo la ventilación cruzada en combinación con las aberturas laterales del edificio, aparte de estar favorecido por los vientos predominantes del noroeste y sureste, con velocidades promedio que oscilan entre 2,5 y 4,5 m/s según datos del SENAMHI 2025. De esta manera, se mejora la renovación del aire interior sin recurrir a sistemas mecánicos, lo que contribuye directamente a la reducción del consumo eléctrico.

Figura 32

Puerta posterior (ventilación cruzada)



Nota. Memoria técnica ITBM, 2025

4.7.4. Estrategia de automatización y control

Dentro de la propuesta de estrategias de eficiencia energética, la automatización y el control constituyen un eje fundamental para asegurar que las medidas implementadas en iluminación y sistemas eléctricos mantengan su efectividad en el tiempo.

Esta estrategia se orienta a reducir consumos innecesarios, mejorar la gestión operativa del edificio y garantizar condiciones adecuadas de seguridad y confort para los usuarios.

En el caso del Edificio Taypi, la automatización no se concibe como un reemplazo del control humano, sino como un soporte técnico a la gestión energética, especialmente relevante en un contexto donde parte de la iluminación será alimentada por energía

fotovoltaica y deberá operar de manera continua durante la noche por razones de seguridad.

4.7.4.1. Control por atenuación en zonas críticas de seguridad

Para los pasillos, gradas e iluminación exterior, se adopta un criterio de iluminación permanente nocturna, indispensable para el resguardo de equipos, instalaciones y personas. En estas áreas no se emplean sensores de apagado automático, sino sistemas de regulación de flujo luminoso (dimming) integrados en luminarias LED con drivers regulables.

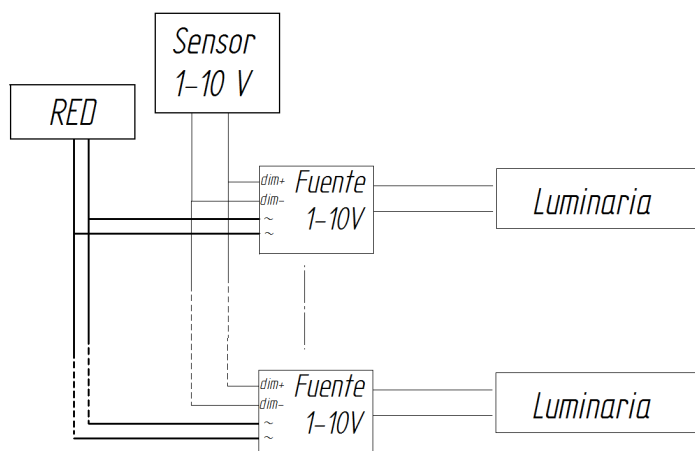
Este esquema permite mantener las luminarias encendidas a un nivel reducido durante periodos de baja circulación, incrementando automáticamente la intensidad cuando se detecta presencia.

De esta manera, se logra un equilibrio entre seguridad, eficiencia energética y vida útil de los equipos, optimizando además el aprovechamiento de la energía generada por el sistema fotovoltaico.

La regulación de flujo luminoso en luminarias LED se realiza mediante drivers regulables compatibles con protocolos de control como 0–10 V y DALI (Digital Addressable Lighting Interface), que permiten ajustar la intensidad sin parpadeos ni pérdida de eficiencia.

Figura 33

Driver LED regulable compatible con control 0–10 V / DALI



Nota. <https://iaipro.es/wp-content/uploads/2019/08/Imagen-1.png>, 2025.

4.7.4.2. Modelación del ahorro energético con dimming

En esta evaluación se considera la totalidad de las luminarias correspondientes a las áreas intervenidas por la propuesta de eficiencia energética, comprendiendo la iluminación de pasillos, gradas e iluminación exterior del Edificio Taypi. El análisis considera las condiciones de operación establecidas para cada una de estas áreas y permite determinar el consumo energético asociado antes y después de la aplicación del sistema de control por atenuación (dimming).

Tomando en cuenta 70 luminarias con una potencia promedio de 33 W por luminaria LED y un esquema de operación nocturna con iluminación permanente y regulación de flujo luminoso al 40 % durante periodos de baja circulación, la implementación de sistemas de dimming permite reducir el consumo energético anual de pasillos y gradas en aproximadamente 4047 kWh/año, lo que representa un ahorro cercano al 40 % respecto a un sistema sin regulación.

Para sustentar dichas afirmaciones realizamos los cálculos correspondientes.

Energía SIN dimming (escenario base)

$$E_{base} = N * P_n * H_d$$

Energía CON dimming

$$E_{dimming} = N * [P_n * H_{alta} + (P_n * f) * H_r]$$

Ahorro energético anual

$$A_E = E_{base} - E_{dimming}$$

Donde:

$$H_{alta} + H_r = H_d$$

P_n =Potencia nominal de la luminaria (W)

f = Fracción de atenuación (0,4 para 40%)

H_d = Horas nocturnas totales por año

H_r = Horas de régimen reducido

N = Número de luminarias

Datos asumidos para el ejemplo

Numero de luminarias en pasillos, gradas e iluminación exterior: $N = 70$

Potencia promedio por luminaria: $P_n = 33 \text{ W}$

Funcionamiento nocturno: 12h/día = 4380 h/año

Esquema de operación: 4h al 100% de potencia y 8h al 40% de potencia (dimming)

Consumo anual SIN dimming

$$E_{base} = N * P_n * H_d$$

$$E_{base} = 70 * 33 * 4380$$

$$E_{base} = 10117800 \text{ Wh/año}$$

$$E_{base} = 10117,8 \text{ kWh/año}$$

Consumo anual CON dimming

$$E_{dimming} = N * [P_n * H_{alta} + (P_n * f) * H_r]$$

Donde:

$$H_{alta} = 1460 \text{ h/año (4h/día)}$$

$$H_r = 2920 \text{ h/año (8 h/día)}$$

$$f = 0,4$$

$$E_{dimming} = 70 * [33 * 1460 + (33 * 0,4) * 2920]$$

$$E_{dimming} = 70 * [48180 + 38544]$$

$$E_{dimming} = 70 * 86724$$

$$E_{dimming} = 6070680 \text{ Wh/año}$$

$$E_{dimming} = 6071 \text{ kWh/año}$$

Ahorro energético anual

$$A_E = E_{base} - E_{dimming}$$

$$A_E = 10118 - 6071$$

$$A_E = 4047 \text{ kWh/año}$$

Ahorro porcentual

$$\eta = \frac{A_E}{E_{base}} * 100$$

$$\eta = \frac{4047}{10118} * 100 \approx 40\%$$

Este resultado confirma la efectividad del sistema de regulación mediante dimming como estrategia de automatización para la iluminación de pasillos, gradas e iluminación exterior del Edificio Taypi. La reducción del flujo luminoso durante periodos de baja ocupación permite disminuir significativamente el consumo energético sin comprometer la seguridad de las instalaciones, constituyéndose en la principal medida de automatización considerada dentro de la presente propuesta.

4.7.4.3. Sensores de presencia en áreas de uso intermitente

En espacios como servicios higiénicos, depósitos, salas técnicas y algunas áreas administrativas, se propone la instalación de sensores de presencia que activen la iluminación únicamente cuando exista ocupación real. Esta medida resulta especialmente eficaz para reducir consumos pasivos que suelen pasar desapercibidos en edificaciones educativas.

La automatización en estas zonas permite disminuir significativamente las horas anuales de encendido sin afectar la funcionalidad de los espacios ni el confort visual de los usuarios.

4.7.4.4. Sectorización de circuitos eléctricos

La sectorización de los circuitos de iluminación y tomacorrientes por áreas funcionales constituye un elemento clave de la estrategia de control. Esta configuración permite

una gestión independiente por zonas, facilitando el encendido selectivo y evitando que áreas completas permanezcan activas cuando solo se requiere iluminación parcial.

Desde el punto de vista operativo, la sectorización también simplifica las tareas de mantenimiento, diagnóstico de fallas y futuras ampliaciones del sistema eléctrico.

4.7.4.5. Programación horaria y supervisión técnica

Como complemento a los sistemas de control automático, se plantea la incorporación de temporizadores y programadores horarios para determinados circuitos como letreros publicitarios. Asimismo, se considera la implementación de un esquema básico de supervisión técnica, mediante registros periódicos de consumo y revisión del correcto funcionamiento de los dispositivos de control.

Como medida de seguimiento, se recomienda la instalación de un medidor inteligente de energía eléctrica que permita registrar el consumo por periodos horarios y comparar el desempeño real del edificio con los valores estimados en la etapa de diseño. Esta información facilitará la identificación de desviaciones, la evaluación de las estrategias implementadas y la toma de decisiones para futuras mejoras.

4.7.4.6. Proyección del impacto ambiental asociado

Considerando únicamente el ahorro asociado a la estrategia de iluminación, como referencia ambiental, y utilizando el factor de emisión promedio del sistema eléctrico boliviano:

$$FE = 0,48 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

La reducción anual de emisiones se estima en:

$$CO_{2,evitado} = AE * FE$$

$$CO_{2,evitado} = 4047,25 * 0,48$$

$$CO_{2,evitado} = 1942,62 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

Esto equivale a aproximadamente 1,94 toneladas de CO₂ evitadas por año, únicamente mediante la optimización del sistema de iluminación.

4.7.5. Educación energética y buenas prácticas de uso

El componente de gestión complementa las estrategias técnicas de eficiencia energética mediante la promoción de una cultura de uso responsable de la energía dentro del Edificio Taypi. Más allá de las mejoras en iluminación, automatización y optimización de la envolvente, el comportamiento cotidiano de estudiantes, docentes y personal administrativo influye de manera directa en el desempeño energético real del edificio.

Figura 34

Afiche de concientización en iluminación

INSTITUTO TECNOLÓGICO BOLIVIA MAR

GESTIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE



SI NO ESTAS EN EL AULA O ES DE DÍA

PEQUENAS ACCIONES, GRANDES CAMBIOS. ¡CUIDEMOS NUESTRO FUTURO!

Nota. Elaboración propia, 2026.

Como complemento a estas acciones, se prevé la implementación de material gráfico específico orientado al uso eficiente de los equipos eléctricos, con mensajes claros y directos que refuercen hábitos de consumo responsable en aulas, talleres y áreas administrativas del edificio.

Figura 35*Afiche de concientización en equipos***INSTITUTO TECNOLÓGICO BOLIVIA MAR**

GESTIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE

CARGADORES, COMPUTADORAS,
ETC., SI NO LOS ESTAS USANDO

PEQUEÑAS ACCIONES, GRANDES CAMBIOS. ¡CUIDEMOS NUESTRO FUTURO!

Nota. Elaboración propia, 2026.**4.7.6. Hoja de ruta para la implementación y seguimiento**

La implementación de las estrategias propuestas puede realizarse de manera gradual, priorizando aquellas medidas que presentan menor complejidad de ejecución y mayor impacto sobre el consumo energético. Debido a que el Edificio Taypi se encuentra en etapa de diseño, se recomienda incorporar estas acciones desde la planificación y ejecución de la infraestructura, complementándolas posteriormente con actividades de seguimiento y verificación del desempeño energético.

La aplicación de esta hoja de ruta permitirá que las estrategias no se limiten a una etapa de diseño, sino que puedan ser verificadas durante la operación del edificio. El seguimiento mediante medición permitirá contrastar los consumos reales con los valores estimados en la presente investigación y detectar posibles desviaciones.

Tabla 33

Hoja de ruta para la implementación y seguimiento de las estrategias propuestas.

Etapas	Acción propuesta	Prioridad	Seguimiento
1	Incorporación de luminarias LED en pasillos, gradas y áreas exteriores	Alta	Verificar potencia instalada y niveles de iluminación
2	Implementación del sistema de control por <i>dimming</i>	Alta	Registrar horarios de operación y consumo de iluminación
3	Implementación del sistema solar fotovoltaico conectado a red	Alta	Verificar generación eléctrica y energía aportada al edificio
4	Instalación de un medidor inteligente para monitoreo energético	Media	Registrar y analizar periódicamente el consumo eléctrico
5	Realización de una auditoría energética posterior a la ocupación	Media	Comparar el consumo real con el consumo proyectado
6	Evaluación y ajuste periódico de las estrategias	Permanente	Revisar indicadores de desempeño y establecer mejoras

Nota. Elaboración propia, 2026.

Como medida de control, se recomienda realizar una auditoría energética post-ocupación durante el primer año de funcionamiento y posteriormente de manera periódica. Los resultados obtenidos permitirán ajustar los horarios de operación, los niveles de atenuación y las condiciones de funcionamiento del sistema fotovoltaico, favoreciendo una gestión energética continua del Edificio Taypi.

4.8. DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El diseño del sistema fotovoltaico del Edificio Taypi se plantea como una de las acciones más relevantes dentro de la propuesta de eficiencia energética e integración de energías renovables. El objetivo principal es cubrir la demanda eléctrica asociada a la iluminación exterior, pasillos y gradas, aprovechando el elevado potencial solar de la ciudad de El Alto y la disponibilidad de superficie en la cubierta del edificio.

El sistema se proyecta bajo la modalidad conectada a red (on-grid), lo que permite que la energía generada sea utilizada directamente por las cargas del edificio, reduciendo

el consumo proveniente de la red eléctrica convencional y, en consecuencia, los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero.

4.8.1. Dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico

4.8.1.1. Condiciones del sitio y recurso solar

El desempeño de un sistema fotovoltaico depende en gran medida de las condiciones climáticas y del recurso solar disponible en el lugar de instalación. En este caso, el Edificio Taypi se ubica en la ciudad de El Alto, Distrito 8, zona de Senkata, cuyas coordenadas geográficas son 16°34'34" de latitud sur y 68°11'48" de longitud oeste. Esta ubicación se caracteriza por una alta radiación solar durante gran parte del año, lo que favorece la implementación de sistemas solares fotovoltaicos.

De acuerdo con la información disponible, la radiación solar media diaria en la zona es de:

$$G = 6,158 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$$

Para efectos del dimensionamiento preliminar, este valor de irradiación media diaria se expresa en términos de Horas Sol Pico (HSP), considerando que una HSP corresponde a una hora equivalente de irradiancia de 1000 W/m². Esta aproximación es ampliamente utilizada en el dimensionamiento preliminar de sistemas fotovoltaicos, tal como lo proponen Duffie y Beckman (2013) y Masters (2013).

Por lo tanto, para el diseño se adopta:

$$HSP = 6,16 \text{ h/día}$$

4.8.1.2. Determinación de la demanda energética a cubrir

El siguiente paso consiste en definir la demanda energética que será atendida por el sistema fotovoltaico. A diferencia de un dimensionamiento limitado a determinadas áreas o sistemas del edificio, en la presente propuesta se considera como referencia la demanda energética anual total proyectada del Edificio Taypi.

De acuerdo con el balance energético desarrollado previamente, el consumo anual estimado del edificio asciende a:

$$E_d = 40808,73 \text{ kWh/año}$$

Este valor representa la demanda energética total proyectada del Edificio Taypi e integra los diferentes sistemas y áreas contemplados en el balance energético, incluyendo iluminación, equipos de talleres, equipos gastronómicos, tecnologías de información y comunicación, equipos audiovisuales y servicios generales.

La consideración de la demanda energética total permite dimensionar el sistema fotovoltaico con un alcance global para el edificio, de manera que la generación renovable proyectada pueda compensar, en términos de energía anual, el consumo eléctrico total estimado.

4.8.1.3. Conversión de la demanda anual a demanda diaria

Para relacionar la demanda energética del edificio con el recurso solar disponible, es necesario expresar el consumo anual en términos diarios. Esta conversión permite establecer una relación directa entre la energía requerida por el edificio y las horas sol pico disponibles en el sitio.

La demanda energética anual total proyectada del Edificio Taypi es de 40808,73 kWh/año. Por tanto, la energía diaria promedio se obtiene mediante:

$$E_{d,día} = \frac{E_d}{365}$$

Donde:

$E_{d,día}$ = Energía diaria demandada (kWh/día)

E_d = Energía anual demandada (kWh/año)

$$E_{d,día} = \frac{40808,73}{365}$$

$$E_{d,día} = 111,80 \text{ kWh/día}$$

Por lo tanto, para efectos del dimensionamiento del sistema fotovoltaico se considera una demanda energética promedio de aproximadamente 111,80 kWh/día, correspondiente al consumo total proyectado del Edificio Taypi.

4.8.1.4. Cálculo de la potencia pico requerida

El dimensionamiento de la potencia instalada del sistema fotovoltaico se basa en la relación entre la energía diaria demandada y la energía que puede producir el generador solar bajo las condiciones de radiación disponibles en el sitio.

Para determinar la potencia pico requerida se emplea la siguiente expresión:

$$P_{FV} = \frac{E_{d,día}}{HSP * PR}$$

Donde:

- P_{FV} Es la potencia pico requerida del sistema [kWp]
- $E_{d,día}$ Es la energía diaria demandada [kWh/día]
- HSP Son las horas sol pico del sitio [h/día]
- PR Es el performance Ratio, que representa el conjunto de pérdidas del sistema

Para el presente estudio se mantienen las condiciones de diseño previamente establecidas, considerando una radiación solar media de 6,158 kWh/m²·día, equivalente a 6,16 horas sol pico por día, y un Performance Ratio de 0,75.

Sustituyendo los valores:

$$P_{FV} = \frac{111,80}{6,16 * 0,75}$$

$$P_{FV} = 24,20 \text{ kWp}$$

Por lo tanto, la potencia fotovoltaica requerida para compensar, en términos de energía anual, la demanda energética total proyectada del Edificio Taypi es aproximadamente 24,20 kWp.

4.8.1.5. Selección del tipo de módulo fotovoltaico

Para el proyecto se considera el uso de módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino, debido a su adecuada eficiencia de conversión y a su aplicación en sistemas conectados a red. Esta tecnología resulta compatible con las condiciones de radiación solar disponibles en la ciudad de El Alto y permite aprovechar de manera eficiente la superficie disponible en la cubierta del edificio.

Para el dimensionamiento se mantiene como referencia un módulo fotovoltaico comercial con las siguientes características:

- Potencia nominal: 550 Wp
- Superficie aproximada: 2,2 m²

La potencia unitaria adoptada permite determinar el número de módulos necesarios para alcanzar la potencia fotovoltaica requerida de aproximadamente 24,20 kWp.

4.8.1.6. Determinación del número de paneles

El número de módulos fotovoltaicos requeridos se determina a partir de la potencia fotovoltaica requerida y la potencia nominal individual de cada módulo:

$$N = \frac{P_{FV}}{P_{mod}}$$

Donde:

N = Número de módulos fotovoltaicos

P_{FV} = Potencia fotovoltaica requerida

P_{mod} = Potencia nominal de módulo

$$N = \frac{24200 \text{ Wp}}{550 \text{ Wp}}$$

$$N = 44 \text{ módulos}$$

Por lo tanto, se requiere la instalación de 44 módulos fotovoltaicos de 550 Wp cada uno.

La potencia fotovoltaica instalada resulta:

$$P_{inst} = 44 * 550 \text{ Wp}$$

$$P_{inst} = 24200 \text{ Wp}$$

En consecuencia, el generador fotovoltaico propuesto estará constituido por 44 módulos monocristalinos de 550 Wp, alcanzando una potencia instalada total de 24,20 kWp.

4.8.1.7. Verificación del área disponible

Uno de los aspectos fundamentales para determinar la viabilidad de la instalación fotovoltaica es verificar que la superficie disponible en la cubierta sea suficiente para alojar los módulos requeridos.

Para el Edificio Taypi se dispone de una superficie de cubierta estimada de aproximadamente 800 m². Considerando una superficie aproximada de 2,2 m² por módulo, el área requerida para los 44 módulos es:

$$A_{req} = 44 * 2,2 \text{ m}^2$$

$$A_{req} = 96,8 \text{ m}^2$$

Por tanto, el área aproximada requerida para la instalación de los módulos fotovoltaicos es de 96,8 m².

La relación entre el área requerida y el área disponible es:

$$\%A_{ocupada} = \left(\frac{96,8}{800} \right) * 100$$

$$\%A_{ocupada} = 12,10 \%$$

En consecuencia, los módulos fotovoltaicos ocuparían aproximadamente el 12,10 % de la superficie disponible de cubierta. Este resultado permite establecer que existe

superficie suficiente para la instalación del generador fotovoltaico propuesto, manteniéndose además un área disponible para circulación, separación entre filas, mantenimiento y posibles ampliaciones futuras.

4.8.1.8. Estimación de la producción anual

La energía anual estimada de generación fotovoltaica se determina considerando la potencia instalada del generador, las horas sol pico disponibles y el Performance Ratio adoptado para representar las pérdidas globales del sistema.

La energía anual generada se estima mediante:

$$E_{FV} = P_{inst} HSP * 365 * PR$$

Donde:

E_{FV} = Energía anual estimada generada por el sistema fotovoltaico (kWh/año)

P_{inst} = Potencia Instalada del genrador fotovoltaico (kWp)

HSP = Horas de sol pico (h/día)

PR = Performance Ratio

$$E_{FV} = 24,20 * 6,16 * 365 * 0,75$$

$$E_{FV} = 40808,73 \text{ kWh/año}$$

Por lo tanto, bajo las condiciones de diseño adoptadas, el sistema fotovoltaico presenta una generación anual estimada equivalente aproximadamente a 40808,73 kWh/año.

Este resultado se encuentra en correspondencia con la demanda energética anual total proyectada del Edificio Taypi, constituyendo la base para determinar el nivel de cobertura energética del sistema.

4.8.1.9. Verificación del nivel de cobertura

Finalmente, se verifica el nivel de cobertura energética del sistema fotovoltaico mediante la comparación entre la energía anual estimada de generación y la demanda energética anual total proyectada del Edificio Taypi.

El porcentaje de cobertura energética se determina mediante:

$$\%Cobertura = \frac{E_{FV}}{E_d} * 100$$

Donde:

$\%Cobertura$ = Porcentaje de cobertura energética anual (%)

E_{FV} = Energía anual estimada generada por el sistema fotovoltaico (kWh/año)

E_d = Demanda energética anual del edificio (kWh/año)

Considerando una generación fotovoltaica anual estimada de aproximadamente 40808,73 kWh/año y una demanda energética anual total de 40808,73 kWh/año

$$\%Cobertura = \frac{40808,73}{40808,73} * 100$$

$$\%Cobertura = 100 \%$$

Por lo tanto, el sistema fotovoltaico dimensionado presenta una cobertura energética anual estimada de aproximadamente 100 % de la demanda energética total proyectada del Edificio Taypi.

Este resultado debe interpretarse como una compensación energética anual y no como una condición de autonomía eléctrica permanente. Al tratarse de un sistema conectado a la red, la energía generada por los módulos fotovoltaicos se utilizará para atender los consumos eléctricos del edificio durante los periodos de generación, mientras que la red convencional continuará proporcionando el suministro necesario durante las horas sin generación solar o cuando la demanda instantánea supere la generación fotovoltaica disponible.

De esta manera, el sistema propuesto permite integrar la generación renovable considerando la totalidad de la demanda energética anual proyectada del edificio, manteniendo la conexión a la red eléctrica como respaldo para garantizar la continuidad del suministro.

Tabla 34*Resumen del dimensionamiento del sistema fotovoltaico*

Parámetro	Valor
Demanda anual a cubrir	40808,73 kWh/año
Radiación solar media	6,158 kWh/m ² ·día
Horas sol pico (HSP)	6,16 h/día
Performance Ratio (PR)	0,75
Potencia requerida	24,20 kWp
Potencia instalada	24,20 kWp
Número de módulos	44
Potencia por módulo	550 Wp
Área requerida	96,8 m ²
Área disponible	800 m ²
Cobertura energética	≈ 100 %

. Elaboración propia, 2026.

4.8.2. Parámetros técnicos de diseño

El correcto desempeño del sistema fotovoltaico no depende únicamente de la potencia instalada, sino también de una adecuada definición de los parámetros técnicos de montaje, orientación y configuración eléctrica. Estos aspectos influyen directamente en la producción energética real y en la confiabilidad del sistema.

Al encontrarse el edificio en el hemisferio sur, la orientación óptima de los módulos fotovoltaicos es hacia el Norte geográfico, con el propósito de favorecer la captación de radiación solar durante el año.

Para la inclinación se adopta el criterio utilizado en el dimensionamiento preliminar:

$$\beta \approx |\varphi|$$

Donde β es el ángulo de inclinación y φ la latitud del sitio.

Con $\varphi \approx 16,5^\circ$, se recomienda una inclinación práctica entre:

$$15^\circ \text{ y } 20^\circ$$

De acuerdo con el nuevo dimensionamiento, el generador fotovoltaico estará constituido por 44 módulos monocristalinos de 550 Wp, alcanzando una potencia instalada de 24,20 kWp.

La configuración general del sistema conectado a red (on-grid) estará compuesta por:

- Generador fotovoltaico de 44 módulos monocristalinos de 550 Wp.
- Inversor o conjunto de inversores de conexión a red con una capacidad nominal de corriente alterna compatible con la potencia del generador fotovoltaico y con las características de la red eléctrica del edificio.
- Protecciones en corriente continua, incluyendo seccionadores, fusibles y dispositivos de protección contra sobretensiones.
- Protecciones en corriente alterna, mediante interruptores de protección y dispositivos diferenciales, de acuerdo con la configuración definitiva del sistema.
- Sistema de puesta a tierra integrado al sistema de puesta a tierra del edificio.
- Medición bidireccional para el registro de la energía intercambiada con la red, de acuerdo con las condiciones técnicas y administrativas aplicables a la conexión.

La selección definitiva del inversor deberá verificarse posteriormente considerando la tensión de circuito abierto, tensión de operación, corrientes máximas del arreglo fotovoltaico, número de seguidores MPPT, potencia de entrada y condiciones de operación asociadas a la altitud del emplazamiento. Esta verificación permitirá garantizar la compatibilidad eléctrica entre el generador fotovoltaico y el equipo de conversión.

4.8.3. Evaluación ambiental del aporte energético

La implementación del sistema fotovoltaico permitirá atender, en términos de generación energética anual, la demanda eléctrica total proyectada del Edificio Taypi, reduciendo la dependencia de la energía suministrada por la red eléctrica convencional. De acuerdo con el nuevo dimensionamiento, el sistema presenta una potencia instalada de 24,20 kWp y una generación anual estimada equivalente a aproximadamente 40.808,73 kWh/año.

Desde el punto de vista ambiental, la generación de energía eléctrica mediante una fuente solar permite evitar parte de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación y consumo de electricidad convencional. Para estimar este aporte se utiliza el factor de emisión considerado en el presente estudio:

$$FE = 0,48 \text{ kg } CO_2/kWh$$

Tomando como referencia la demanda energética anual total del edificio, la reducción potencial de emisiones se estima mediante:

$$CO_{2,evitado} = 40808,73 * 0,48$$

$$CO_{2,evitado} = 19588,19 \text{ kg } CO_2/\text{año}$$

Por tanto, el sistema fotovoltaico podría contribuir potencialmente a evitar aproximadamente 19,59 toneladas de CO_2 por año, siempre que la generación renovable sustituya efectivamente una cantidad equivalente de energía eléctrica proveniente de la red.

Este resultado representa una estimación del aporte ambiental del sistema y está sujeto a las condiciones reales de operación, disponibilidad del recurso solar, rendimiento de los equipos, degradación de los módulos y comportamiento de la demanda energética del edificio.

4.9. INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

La integración de energías renovables en el Edificio Taypi representa una estrategia orientada a reducir la dependencia de la energía eléctrica convencional y mejorar el desempeño energético global de la infraestructura. En concordancia con el nuevo dimensionamiento desarrollado en el apartado 4.8, se plantea la incorporación de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, con una potencia instalada de 24,20 kWp y una generación anual estimada equivalente a aproximadamente 40808,73 kWh/año.

A diferencia del apartado anterior, donde se desarrolla el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico, este punto analiza su integración funcional dentro del edificio y sus posibilidades de aprovechamiento futuro. La incorporación del sistema desde la fase de diseño permite prever desde el inicio los espacios, canalizaciones, protecciones y condiciones necesarias para su implementación y eventual ampliación.

4.9.1. Contribución del sistema fotovoltaico al edificio

El sistema fotovoltaico proyectado se dimensiona tomando como referencia la demanda energética total estimada del Edificio Taypi, equivalente a 40808,73 kWh/año. Con una potencia instalada de 24,20 kWp, la generación anual estimada permite alcanzar aproximadamente el mismo orden de magnitud que la demanda energética proyectada, por lo que el sistema puede cubrir aproximadamente el 100 % de esta demanda en términos de balance energético anual.

Esta integración permite reducir la cantidad de energía que debe ser suministrada por la red eléctrica convencional, disminuyendo consecuentemente los costos asociados al consumo eléctrico y el impacto ambiental derivado de dicho consumo.

La generación fotovoltaica no implica que el edificio opere de manera aislada de la red eléctrica. Al tratarse de un sistema conectado a red, existirán períodos en los que la generación solar sea inferior a la demanda y otros en los que pueda existir un excedente de generación. La red eléctrica permitirá compensar estas variaciones y mantener la continuidad del suministro.

Además del beneficio energético, la incorporación de la tecnología fotovoltaica en una institución educativa proporciona una oportunidad para fortalecer la formación técnica de estudiantes y docentes, al constituirse el propio edificio en un espacio demostrativo para el conocimiento y seguimiento de tecnologías de generación renovable

4.9.2. Posibilidades de expansión futura

La propuesta de integración renovable ha sido concebida bajo un criterio de escalabilidad, aprovechando la superficie disponible en la cubierta del edificio y las condiciones técnicas previstas para la instalación del sistema fotovoltaico. La superficie requerida por los 44 módulos considerados en el dimensionamiento

corresponde aproximadamente a 96,8 m², frente a una superficie disponible cercana a 800 m², por lo que existe espacio físico para considerar futuras ampliaciones.

Una eventual ampliación podría orientarse a incrementar la generación destinada a nuevas cargas eléctricas que se incorporen al edificio como consecuencia del crecimiento institucional, tales como nuevos equipos de laboratorio, equipamiento informático u otras cargas asociadas a las actividades académicas y administrativas.

Asimismo, en una etapa posterior podría evaluarse la incorporación de sistemas de almacenamiento mediante baterías. Esta alternativa permitiría aprovechar parte de la energía generada durante las horas de mayor radiación solar en períodos de menor generación, además de proporcionar respaldo para determinadas cargas durante interrupciones del suministro eléctrico.

Cualquier ampliación deberá estar precedida por una evaluación de la demanda real del edificio, la capacidad de la infraestructura eléctrica, las condiciones de conexión a la red y la disponibilidad presupuestaria, evitando sobredimensionamientos y asegurando que las inversiones adicionales respondan a necesidades energéticas verificadas.

Tabla 35

Escenarios de expansión futura del sistema fotovoltaico

Escenario	Alcance de la ampliación	Beneficio esperado
Escenario 1	Extensión a aulas	Reducción adicional del consumo en red
Escenario 2	Inclusión de laboratorios	Mayor aprovechamiento de la generación renovable
Escenario 3	Incorporación de baterías	Respaldo y continuidad del servicio

Nota. Elaboración propia, 2026.

4.9.3. Proyección del impacto ambiental a largo plazo

La operación sostenida del sistema fotovoltaico permitirá reducir progresivamente las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía eléctrica proveniente de la red convencional. Considerando la demanda energética total del Edificio Taypi y el factor de emisión adoptado en el estudio, el aporte ambiental estimado alcanza

aproximadamente 19,59 toneladas de CO₂ evitadas por año cuando la generación fotovoltaica sustituye una cantidad equivalente de energía eléctrica convencional.

Este resultado debe interpretarse como una estimación del potencial de reducción de emisiones, debido a que la generación real del sistema estará condicionada por factores como la disponibilidad del recurso solar, las pérdidas de operación, el mantenimiento, la degradación progresiva de los módulos y las variaciones de la demanda energética del edificio.

A largo plazo, la integración de generación fotovoltaica desde la etapa de diseño permitirá consolidar una infraestructura con mayor incorporación de energías renovables y servirá como referencia para futuras intervenciones de eficiencia energética en instituciones educativas. Asimismo, el carácter demostrativo del sistema puede contribuir a fortalecer la formación técnica de estudiantes y docentes en tecnologías de generación distribuida y gestión energética.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA

La evaluación económica de la presente propuesta tiene como finalidad determinar la conveniencia financiera de las estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables planteadas para el Edificio Taypi. El análisis considera principalmente la implementación del sistema fotovoltaico conectado a la red y del sistema de control por atenuación (dimming) aplicado a la iluminación de pasillos, gradas e iluminación exterior.

A diferencia de una evaluación basada únicamente en la inversión inicial, en este capítulo se considera el comportamiento energético y económico de la propuesta durante su período de operación. Para ello se incorporan el ahorro económico anual, el período simple de recuperación de la inversión, la degradación progresiva de los módulos fotovoltaicos, escenarios financieros y un valor residual o recuperable al final del período de análisis.

El análisis se desarrolla mediante un enfoque de costo–beneficio aplicado a proyectos de eficiencia energética y generación renovable. Se consideran como principales variables la inversión inicial, los ahorros derivados de la reducción del consumo de la red eléctrica, la generación fotovoltaica, la evolución del rendimiento del sistema y el valor recuperable de los activos al finalizar el período de evaluación.

5.1. COSTO DE INVERSIÓN

5.1.1. Alcance de la inversión considerada

La evaluación económica considera los costos incrementales asociados directamente a la implementación de las estrategias propuestas. En consecuencia, se incluyen los componentes necesarios para la instalación del sistema fotovoltaico dimensionado para atender la demanda energética total proyectada del Edificio Taypi y los elementos correspondientes al sistema de control por atenuación de la iluminación.

Dentro de la inversión se consideran los módulos fotovoltaicos, inversor de conexión a red, estructuras de soporte, cableado y protecciones, sistema de medición, mano de obra de instalación, sistema de dimming, ingeniería y contingencias.

No se incluyen las luminarias LED interiores de aulas ni otros sistemas eléctricos que forman parte del diseño base del edificio, debido a que dichos elementos corresponden a la infraestructura eléctrica convencional prevista independientemente de la implementación de las estrategias evaluadas.

Los valores utilizados son referenciales y tienen como finalidad establecer una aproximación económica para la etapa de diseño. Los costos definitivos deberán determinarse mediante cotizaciones y especificaciones técnicas durante la etapa de ejecución del proyecto.

5.1.2. Formulación del costo total de inversión

El costo total de inversión se determina mediante la suma de los costos correspondientes a los componentes principales de la propuesta:

$$CI = \sum_{i=1}^n C_i$$

Donde:

CI Es el costo total de inversión (Bs.)

C_i Es el costo de cada componente del sistema

n Es el número total de componentes considerados

La actualización del dimensionamiento fotovoltaico realizada en el Capítulo IV modifica la inversión respecto a la estimación inicial, debido al incremento de 18 a 44 módulos fotovoltaicos y a la correspondiente adecuación de la capacidad del inversor y de los componentes auxiliares.

Para efectos del presente estudio se adopta como referencia un inversor trifásico de conexión a red de aproximadamente 25 kW CA. Asimismo, se consideran seis unidades de control por atenuación, con un costo referencial de Bs 1.000 por unidad. Los demás componentes se estiman considerando valores referenciales de mercado para una instalación de esta escala.

Tabla 36*Costo estimado de inversión de la propuesta*

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
Módulos FV 550 W	unid	44	1200	52800
Inversor FV 25 kW AC	unid	1	18500	18500
Estructuras de soporte	lote	1	8000	8000
Cableado y protecciones CC/CA	lote	1	6000	6000
Medidor bidireccional	unid	1	1500	1500
Mano de obra instalación FV	lote	1	6000	6000
Sistema de dimming (drivers + control)	lote	6	1000	6000
Subtotal				98800
Ingeniería y contingencias (10 %)				9880
Costo total de inversión (CI)				108680

Nota. Elaboración propia, 2026.

El costo total estimado de la propuesta asciende a Bs 108680. La mayor incidencia corresponde al generador fotovoltaico, debido principalmente a la incorporación de 44 módulos de 550 Wp necesarios para atender la demanda energética total considerada en el nuevo dimensionamiento.

5.2. AHORRO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO ESTIMADO

5.2.1. Definición del consumo objeto de intervención

El consumo energético anual estimado del Edificio Taypi alcanza 40808,73 kWh/año. Este valor constituye la demanda energética de referencia utilizada para evaluar el aporte del sistema fotovoltaico, debido a que, conforme a la observación realizada al trabajo, el sistema de generación renovable debe analizarse en función de la demanda total proyectada del edificio.

Por otra parte, el sistema de control por atenuación se aplica específicamente a la iluminación de pasillos, gradas e iluminación exterior. Estas áreas presentan un consumo conjunto de 16456,57 kWh/año, equivalente aproximadamente al 40,33 % de la demanda total.

Por tanto, se diferencian dos niveles de intervención: el sistema fotovoltaico se dimensiona respecto a la demanda total del edificio, mientras que el sistema de dimming actúa específicamente sobre las zonas de iluminación definidas en el Capítulo IV.

5.2.2. Reducción de la demanda mediante el sistema de atenuación

La reducción de la demanda energética se determina a partir de la modelación desarrollada en el apartado 4.7.4.2, correspondiente al sistema de control por atenuación (dimming) aplicado a las luminarias de pasillos, gradas e iluminación exterior. En dicha modelación se consideraron 70 luminarias con una potencia promedio de 33 W, un funcionamiento nocturno de 4.380 horas anuales y una regulación del flujo luminoso al 40 % durante los períodos de baja circulación.

El cálculo realizado determina un consumo anual de 10117,80 kWh para el escenario sin dimming y de 6070,68 kWh para el escenario con regulación, obteniéndose un ahorro energético anual de:

$$A_{dimming} = 10117,8 - 6070,68$$

$$A_{dimming} = 4047,12 \text{ kWh/año}$$

Después de aplicar la reducción estimada, el consumo anual remanente de las áreas intervenidas resulta:

Este resultado representa una reducción aproximada del 40 % sobre el consumo de las luminarias directamente intervenidas. El ahorro corresponde exclusivamente al efecto del sistema de atenuación y no al consumo total de servicios generales, por lo que se evita sobreestimar el impacto de esta estrategia sobre la demanda global del edificio.

En consecuencia, el ahorro energético anual considerado para la evaluación económica de la propuesta es de 4047,12 kWh/año.

5.2.3. Generación fotovoltaica y cobertura de la demanda remanente

El sistema fotovoltaico dimensionado para el Edificio Taypi presenta una potencia instalada de 24,20 kWp y una generación anual estimada de 40.808,73 kWh/año. Esta generación fue dimensionada considerando la demanda energética total del edificio.

Considerando el ahorro energético de 4047,12 kWh/año obtenido mediante el sistema de atenuación, la demanda anual posterior a la aplicación de esta estrategia se determina mediante:

$$E_{propuesta} = 40808,73 - 4047,12 \text{ kWh/año}$$

$$E_{propuesta} = 36761,61 \text{ kWh/año}$$

Por tanto, desde el punto de vista del balance energético anual, la generación fotovoltaica estimada resulta superior a la demanda remanente del edificio. La diferencia corresponde a un excedente teórico de generación:

$$E_{excedente} = 40808,73 - 36761,61$$

$$E_{excedente} = 4047,12 \text{ kWh/año}$$

Este excedente se origina porque el sistema fotovoltaico fue dimensionado respecto a la demanda total del edificio antes de considerar el ahorro producido por el sistema de atenuación. Para mantener un criterio conservador, este excedente no se incorpora como ingreso económico en el análisis financiero, debido a que su valorización dependerá de las condiciones de conexión, medición y compensación aplicables al momento de la implementación.

En consecuencia, la generación fotovoltaica permite cubrir la demanda anual remanente desde el punto de vista del balance energético, manteniendo la red eléctrica convencional como respaldo para las diferencias entre generación y consumo que se produzcan durante la operación real del edificio.

5.2.4. Ahorro económico anual estimado

El ahorro económico anual se determina considerando la energía que, después de aplicar el sistema de atenuación, puede ser abastecida mediante la generación fotovoltaica y que, por tanto, deja de ser requerida a la red eléctrica convencional.

Para efectos del análisis se mantiene una tarifa eléctrica referencial de 1,63 Bs/kWh. El ahorro económico anual se estima mediante:

$$AE = E_{propuesta} * T_e$$

Donde:

AE = Ahorro económico anual (Bs/año)

$E_{propuesta}$ = Demanda anual posterior a la aplicación del dimming (kWh/año)

T_e = Tarifa eléctrica considerada (1,63 Bs/kWh)

$$AE = 36761,61 * 1,63$$

$$AE = 59921,42 \text{ Bs/año}$$

El resultado representa el ahorro económico anual teórico asociado a la energía que puede dejar de ser adquirida de la red eléctrica convencional. El excedente fotovoltaico de 4047,12 kWh/año no se monetiza en este cálculo, manteniendo un criterio conservador frente a posibles mecanismos de compensación o valorización de energía excedente.

5.3. PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

El período simple de recuperación permite estimar el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los ahorros económicos anuales generados por la propuesta.

El cálculo se expresa mediante:

$$PR = \frac{CI}{AE}$$

Donde:

PR = Periodo de recuperación simple (años)

CI = Costo total de la inversión (Bs.)

AE = Ahorro económico anual (Bs/año)

$$PR = \frac{108680}{59921,42}$$

$$PR = 1,81 \text{ años}$$

Por tanto, bajo los supuestos establecidos para el análisis, el período simple de recuperación de la inversión se estima en aproximadamente 1,81 años. Este resultado corresponde a una evaluación inicial y deberá ser actualizado durante la etapa de

ejecución mediante cotizaciones comerciales, costos reales de instalación, condiciones de conexión y tarifas vigentes.

5.4. ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL DE LOS COMPONENTES

5.4.1. Degradación de los módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos presentan una disminución progresiva de su capacidad de generación como consecuencia del envejecimiento de sus materiales y de su exposición continua a las condiciones ambientales. Esta reducción debe ser considerada en una evaluación económica de largo plazo, debido a que la generación obtenida durante los primeros años de operación no se mantiene constante durante toda la vida útil del sistema.

Para efectos del presente estudio se adopta una tasa referencial de degradación anual del 0,5 % sobre la generación del año anterior. La generación correspondiente a cada año se estima mediante:

$$E_n = E_1 x (1 - d)^{(n-1)}$$

Donde:

E_n = Generación estimada en el año n.

E_1 = Generación correspondiente al primer año de operación.

d = Tasa anual de degradación

n = Año de operación

Considerando una generación inicial de 40808,73 kWh/año y una degradación anual del 0,5 %, se obtiene la siguiente proyección:

Tabla 37

Proyección de la generación fotovoltaica considerando la degradación

Año de operación	Generación estimada (kWh/año)
1	40808,73
5	39998,66
10	39008,64
15	38043,13
20	37101,51
25	36183,20

Nota. Elaboración propia, 2026.

Los resultados muestran una reducción gradual de la generación a lo largo del período de análisis. Al año 25, la generación estimada permanece en aproximadamente 36.183,20 kWh/año, lo que representa una reducción respecto a la generación inicial, pero mantiene una capacidad significativa de producción energética.

La degradación considerada constituye una condición de operación de largo plazo y permite evitar que la evaluación económica se base únicamente en el rendimiento inicial del sistema.

5.4.2. Desempeño, vida útil y reposición del inversor

El inversor de conexión a red constituye uno de los componentes principales del sistema fotovoltaico, debido a que realiza la conversión de la energía eléctrica generada en corriente continua por los módulos a corriente alterna compatible con la instalación eléctrica del Edificio Taypi.

A diferencia de los módulos fotovoltaicos, cuya pérdida de capacidad de generación ocurre de manera progresiva, el inversor es un equipo electrónico cuya vida útil depende de las condiciones de operación, temperatura, ciclos de funcionamiento, mantenimiento y calidad de sus componentes.

Considerando que el sistema fotovoltaico propuesto para atender la demanda total del edificio alcanza una potencia instalada de aproximadamente 24,2 kWp, se considera un inversor de conexión a red de aproximadamente 25 kWac, seleccionado de acuerdo con la potencia del generador fotovoltaico y la disponibilidad comercial de este tipo de equipos.

Para efectos de la evaluación económica, se adopta de manera referencial un costo de Bs 18.500 para el inversor de 25 kWac. Este valor tiene carácter académico y deberá ser sustituido por una cotización comercial actualizada durante la etapa de ejecución del proyecto.

Se considera una vida útil referencial de 15 años para el inversor. Por tanto, dentro del horizonte de análisis de 25 años se contempla una reposición durante el año 15.

Para representar esta reposición de manera conservadora, se adopta un costo equivalente al 70 % del costo inicial del equipo:

$$C_{rep} = 18500 \times 0,70$$

$$C_{rep} = 12950 \text{ Bs.}$$

Por tanto, se considera un costo referencial de reposición de Bs 12950 durante el año 15 de operación.

La consideración de esta reposición permite representar de manera más realista el comportamiento económico del sistema, diferenciando la degradación progresiva de los módulos fotovoltaicos de la vida útil limitada de los equipos electrónicos de conversión.

5.4.3. Consideración de la vida útil de otros componentes

Además de los módulos fotovoltaicos y el inversor, el sistema está constituido por estructuras de soporte, conductores, protecciones eléctricas, dispositivos de seccionamiento, sistema de puesta a tierra y elementos auxiliares. Estos componentes presentan diferentes condiciones de vida útil y requieren actividades de inspección y mantenimiento durante la operación.

Para efectos de la presente evaluación económica, se considera que las estructuras de soporte, conductores y elementos principales de instalación pueden permanecer en servicio durante la mayor parte del horizonte de análisis, siempre que se realicen las actividades de mantenimiento preventivo correspondientes.

En el caso de los dispositivos de protección y maniobra, su sustitución dependerá de las condiciones reales de operación, desgaste, fallas o actualización tecnológica. Debido a que el proyecto se encuentra en fase de diseño, no se asigna un costo independiente de reposición para cada uno de estos elementos, evitando introducir valores que no puedan ser sustentados mediante cotizaciones específicas.

Esta consideración permite incorporar al análisis la diferencia entre los componentes de larga duración y aquellos elementos que pueden requerir intervención durante la vida útil del sistema.

5.5. ANÁLISIS FINANCIERO MULTIESCENARIO

Con el propósito de analizar la sensibilidad económica de la propuesta frente a posibles variaciones de las condiciones iniciales, se plantean tres escenarios: conservador, medio y favorable.

El análisis considera como variables principales la inversión inicial, la tarifa eléctrica y el ahorro económico anual producido por la reducción del consumo de energía proveniente de la red. Asimismo, se incorpora la reposición del inversor durante el año 15 como parte de los costos asociados al ciclo de vida del sistema.

El escenario conservador mantiene los valores de referencia adoptados para el proyecto. El escenario medio considera una variación moderada de la tarifa eléctrica y una reducción del costo inicial de implementación, mientras que el escenario favorable representa condiciones económicas más favorables para la adquisición y operación del sistema.

Tabla 38

Evaluación económica bajo escenarios financieros

Escenario	Inversión inicial (Bs)	Tarifa (Bs/kWh)	Ahorro anual (Bs/año)	Payback (años)
Conservador	108680,0	1,63	59921,42	1,81
Medio	103246,0	1,79	65913,56	1,57
Favorable	97812,0	1,96	71905,70	1,36

Nota. Elaboración propia, 2026.

Los resultados muestran la variación del período simple de recuperación ante diferentes condiciones de inversión y tarifa eléctrica. En el escenario base, la inversión de Bs 108680 y el ahorro económico anual de Bs 59921,42 determinan un período de recuperación de 1,81 años. Bajo el escenario medio, considerando una reducción del 5 % en la inversión y un incremento del 10 % en la tarifa, el período se reduce a 1,57 años. En el escenario optimista, con una reducción del 10 % en la inversión y un incremento del 20 % en la tarifa, el período estimado alcanza 1,36 años.

Estos resultados deben interpretarse como escenarios de referencia para la etapa de diseño y no como valores financieros definitivos, debido a que los costos reales de los equipos, instalación, mantenimiento y las condiciones tarifarias deberán verificarse antes de la ejecución del proyecto.

5.6. VALOR RECUPERABLE DE LA INVERSIÓN

La evaluación económica de un proyecto de infraestructura energética debe considerar no solamente los costos iniciales y los ahorros obtenidos durante su funcionamiento, sino también el valor que pueden conservar determinados activos al finalizar el horizonte de análisis.

Para el presente estudio se establece un horizonte de evaluación de 25 años, coincidente con el período utilizado para analizar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos. Al finalizar este período, algunos componentes del sistema pueden conservar un valor residual debido a su estado de conservación, posibilidad de reutilización o recuperación de materiales.

Para efectos académicos, se adopta un valor recuperable equivalente aproximadamente al 10 % del valor de los componentes físicos susceptibles de conservar valor residual, excluyendo conceptos como mano de obra, ingeniería y contingencias.

Considerando un valor referencial de activos recuperables de Bs 86800, se obtiene

$$V_R = 86800 \times 0,10$$

$$V_R = 8680 \text{ Bs.}$$

Por tanto, se adopta un valor recuperable referencial de Bs 8680 al finalizar el horizonte de análisis.

Este valor no representa necesariamente un precio de venta futuro de los equipos. Se trata de una estimación académica destinada a reconocer que los activos físicos no necesariamente pierden completamente su valor al finalizar el período de evaluación.

Asimismo, este valor debe diferenciarse del costo de reposición del inversor. La reposición constituye un desembolso durante la operación del sistema, mientras que el valor recuperable corresponde al posible valor residual de los activos al término del horizonte de análisis

5.7. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PROPUESTA

La evaluación económica realizada permite analizar el comportamiento financiero de la propuesta considerando tanto las condiciones iniciales de inversión como los factores asociados a la operación del sistema durante su vida útil.

La inversión inicial referencial para la implementación del sistema fotovoltaico y del sistema de control por atenuación asciende a Bs 108680. Considerando el ahorro económico anual actualizado de Bs 59921,42, obtenido a partir de la demanda energética posterior a la aplicación del sistema de atenuación, el período simple de recuperación de la inversión se determina en:

$$PR = \frac{108680}{59921,42}$$

$$PR = 1,81 \text{ años}$$

Por tanto, bajo las condiciones consideradas en el presente estudio, el período simple de recuperación de la inversión se estima en aproximadamente 1,81 años.

Sin embargo, este resultado no debe interpretarse como un comportamiento constante durante los 25 años de operación. La generación fotovoltaica disminuye progresivamente debido a la degradación de los módulos, mientras que determinados componentes requieren mantenimiento y eventualmente reposición.

En particular, se ha considerado una degradación anual referencial del 0,5 % en la generación de los módulos fotovoltaicos. Bajo esta condición, la generación disminuye gradualmente a lo largo del horizonte de análisis, por lo que los beneficios económicos asociados a la generación solar tampoco permanecen constantes durante todo el período.

De igual manera, se incorpora la reposición del inversor durante el año 15, considerando un costo referencial de Bs 12950. Esta consideración permite representar una condición más realista del ciclo de vida del sistema, evitando que la evaluación económica se limite únicamente al costo inicial de adquisición e instalación.

El análisis también incorpora un valor recuperable referencial de Bs 8680 al finalizar los 25 años. Este valor representa el posible valor residual de determinados activos físicos y materiales que podrían conservar utilidad o valor de recuperación.

Adicionalmente, el análisis de degradación desarrollado en el apartado 5.4.1 permite considerar que los beneficios económicos asociados a la generación fotovoltaica no permanecen constantes durante toda la vida útil del sistema. Bajo una tasa referencial de degradación anual del 0,5 %, la generación fotovoltaica estimada disminuye progresivamente desde 40.808,73 kWh/año en el primer año de operación hasta aproximadamente 36.183,20 kWh/año al finalizar el año 25. En consecuencia, aunque el período simple de recuperación constituye un indicador inicial basado en las condiciones del primer año, el comportamiento de largo plazo del sistema presenta una reducción gradual del aporte energético debido al envejecimiento natural de los módulos fotovoltaicos.

Por otra parte, el análisis financiero se mantiene conservador al no asignar un ingreso económico adicional al eventual excedente de generación fotovoltaica. De esta manera, la evaluación no depende de mecanismos futuros de compensación, venta o inyección remunerada de excedentes a la red eléctrica.

En conjunto, Los resultados obtenidos permiten evidenciar un comportamiento económico favorable de la propuesta bajo los supuestos adoptados para la etapa de diseño. No obstante, al encontrarse el Edificio Taypi en fase de diseño, los valores económicos deberán actualizarse antes de la ejecución mediante cotizaciones comerciales, costos reales de instalación, condiciones de conexión a la red, mantenimiento y precios vigentes de los equipos.

CAPÍTULO VI.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió desarrollar una propuesta integral de estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables para el Edificio Taypi del Instituto Tecnológico Bolivia Mar, considerando que la infraestructura se encuentra en etapa de diseño. Esta condición permitió incorporar criterios energéticos desde la planificación inicial del proyecto, evitando depender de intervenciones posteriores sobre una edificación ya construida.

El diagnóstico energético realizado permitió caracterizar las condiciones climáticas, arquitectónicas, funcionales y eléctricas del edificio, determinándose una demanda energética anual proyectada de 40808,73 kWh/año. El análisis del balance energético permitió identificar que los principales sistemas consumidores corresponden a servicios generales, tecnologías de información y comunicación, audiovisuales e iluminación, estableciendo los puntos con mayor potencial de intervención dentro de la propuesta.

A partir del análisis de los sistemas eléctricos del edificio, se identificó que las áreas de circulación y seguridad, como pasillos, gradas e iluminación exterior, presentan condiciones favorables para la aplicación de estrategias de control energético debido a sus prolongados períodos de funcionamiento. En este sentido, la incorporación del sistema de regulación por atenuación (dimming) permitió estimar una reducción aproximada del 40 % del consumo energético de las luminarias intervenidas, equivalente a un ahorro de 4047,12 kWh/año, sin comprometer las condiciones de seguridad y funcionamiento previstas para el edificio.

La propuesta de eficiencia energética también contempla estrategias complementarias relacionadas con el aprovechamiento de iluminación natural, implementación de tecnología LED, sectorización de circuitos, sensores de presencia, programación horaria, mantenimiento preventivo y acciones de gestión energética. Estas medidas permiten establecer una intervención integral que combina aspectos pasivos, activos y administrativos orientados a mejorar el desempeño energético futuro del edificio.

La integración de energías renovables se desarrolló mediante el diseño de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red eléctrica, dimensionado considerando la demanda energética anual total proyectada del Edificio Taypi. El sistema propuesto cuenta con una potencia instalada de 24,20 kWp, conformada por 44 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 550 Wp, con un área requerida aproximada de 96,8 m². La generación anual estimada alcanza aproximadamente 40808,73 kWh/año, permitiendo compensar la demanda energética anual del edificio bajo un criterio de balance energético, manteniendo la red convencional como respaldo ante variaciones entre generación y consumo instantáneo.

Desde el punto de vista ambiental, la incorporación del sistema fotovoltaico representa un aporte significativo en la reducción del impacto asociado al consumo eléctrico convencional. Considerando el factor de emisión adoptado en el estudio, la generación renovable proyectada permitiría evitar aproximadamente 19,59 toneladas de CO₂/año, contribuyendo a disminuir la huella ambiental asociada a la operación futura del edificio.

La evaluación económica permitió determinar el comportamiento financiero de la propuesta considerando la inversión inicial, los beneficios derivados del ahorro energético y las condiciones de operación del sistema. La inversión referencial asciende a Bs. 108680, mientras que el ahorro económico anual estimado alcanza Bs. 59921,42, obteniéndose un período simple de recuperación de la inversión de aproximadamente 1,81 años bajo las condiciones tarifarias y supuestos establecidos en la investigación.

Asimismo, el análisis económico incorporó factores asociados al ciclo de vida del sistema, considerando una degradación anual referencial de los módulos fotovoltaicos del 0,5 %, la reposición del inversor durante el año 15 y un valor recuperable estimado de Bs 8680 al finalizar el horizonte de evaluación de 25 años. Estas consideraciones permiten representar de manera más realista el comportamiento técnico y económico del sistema durante su vida útil.

En términos generales, los resultados obtenidos permiten establecer que la incorporación de estrategias de eficiencia energética y generación fotovoltaica desde la fase de diseño constituye una alternativa técnicamente aplicable para mejorar el desempeño energético del Edificio Taypi. La propuesta integra criterios técnicos,

ambientales y económicos, proporcionando una metodología de referencia para futuras infraestructuras educativas con características similares.

6.2. VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis planteada establece:

"La introducción de estrategias de eficiencia energética e integración de energías renovables en el edificio Taypi, perteneciente al Instituto Tecnológico Bolivia Mar de la ciudad de El Alto, en fase de diseño, conllevará a una disminución de la demanda energética, conducente a un menor impacto ambiental y ahorro de los recursos."

De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación, la hipótesis se considera validada, debido a que la propuesta desarrollada demuestra que la incorporación conjunta de estrategias de eficiencia energética y generación fotovoltaica permite mejorar el desempeño energético proyectado del Edificio Taypi.

La aplicación del sistema de control por atenuación (dimming) permitió reducir aproximadamente un 40 % del consumo energético de las áreas de iluminación intervenidas, equivalente a 4047,12 kWh/año, demostrando que las estrategias de automatización y control representan una alternativa técnicamente viable para disminuir consumos asociados a sistemas de operación prolongada.

Asimismo, el diseño del sistema fotovoltaico conectado a red permitió establecer una generación anual estimada de 40808,73 kWh/año, mediante una potencia instalada de 24,20 kWp, alcanzando una cobertura aproximada del 100 % de la demanda energética anual proyectada en términos de balance energético. Este resultado evidencia el potencial de integración de energías renovables en edificaciones educativas ubicadas en zonas con elevado recurso solar como la ciudad de El Alto.

Desde la perspectiva ambiental, la generación fotovoltaica proyectada permite estimar una reducción potencial de aproximadamente 19,59 toneladas de CO₂/año, asociada al desplazamiento de energía eléctrica proveniente de la red convencional.

Finalmente, la evaluación económica demuestra que la propuesta presenta beneficios financieros bajo los supuestos adoptados, con una inversión referencial de Bs. 108680, un ahorro anual estimado de Bs. 59921,42 y un período simple de recuperación de 1,81 años. Por lo tanto, los resultados obtenidos respaldan que la integración de estrategias

de eficiencia energética y energías renovables desde la etapa de diseño contribuye a mejorar el desempeño energético, reducir impactos ambientales y generar beneficios económicos durante la futura operación del Edificio Taypi.

6.3. RECOMENDACIONES

Para la etapa de ejecución del Edificio Taypi se recomienda mantener los criterios de eficiencia energética incorporados en la presente investigación, verificando que cualquier modificación arquitectónica o eléctrica conserve las condiciones consideradas durante el análisis energético.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo energético mediante medidores inteligentes que permita registrar el consumo eléctrico real del edificio una vez entre en funcionamiento. Esta información permitirá comparar los valores proyectados con el comportamiento energético real y ajustar las estrategias propuestas cuando sea necesario.

Respecto al sistema de iluminación, se recomienda que la implementación del sistema de control por atenuación (dimming) mantenga configuraciones adecuadas de seguridad, confort visual y circulación, especialmente en pasillos, gradas y áreas exteriores. La programación del sistema deberá ajustarse considerando los horarios reales de ocupación y las condiciones operativas del edificio.

Para el sistema fotovoltaico, se recomienda realizar una verificación final durante la etapa constructiva considerando las condiciones definitivas de cubierta, orientación, inclinación, posibles sombras, capacidad estructural y disponibilidad comercial de los equipos. La selección definitiva del inversor, protecciones y demás componentes deberá basarse en las características técnicas actualizadas de los equipos disponibles.

Se recomienda establecer un programa de mantenimiento preventivo para los módulos fotovoltaicos, inversor, protecciones eléctricas y sistemas de control, considerando las condiciones ambientales particulares de la ciudad de El Alto, especialmente la presencia de polvo y periodos secos que pueden afectar el rendimiento de los equipos.

Una vez que el edificio se encuentre en operación, se recomienda realizar una auditoría energética post-ocupación durante el primer año de funcionamiento. Esta evaluación

permitirá validar los supuestos utilizados en la investigación, analizar desviaciones entre consumo real y proyectado, y establecer oportunidades adicionales de mejora.

Finalmente, se recomienda utilizar el Edificio Taypi, como una infraestructura demostrativa para fortalecer la formación técnica de estudiantes y docentes del Instituto Tecnológico Bolivia Mar, aprovechando la incorporación de tecnologías de eficiencia energética, generación fotovoltaica y gestión sostenible de la energía como herramientas educativas.

6.4. TRABAJOS FUTUROS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como primera línea de trabajo futuro, se recomienda realizar una evaluación energética del Edificio Taypi una vez que entre en operación, utilizando mediciones reales de consumo eléctrico y comparándolas con los valores estimados en la presente investigación.

También se plantea como futura investigación el desarrollo de un sistema integral de gestión energética del edificio, incorporando medición inteligente, monitoreo en tiempo real, automatización, análisis de datos y estrategias de control orientadas a optimizar el consumo eléctrico.

Otra línea de investigación podría enfocarse en la ampliación progresiva del sistema fotovoltaico, evaluando la posibilidad de abastecer otras cargas del edificio y determinar el porcentaje de autosuficiencia energética alcanzable.

Asimismo, se recomienda estudiar en futuras investigaciones la incorporación de sistemas de almacenamiento mediante baterías, evaluando técnica y económicamente su conveniencia para mejorar la gestión de la energía fotovoltaica y proporcionar respaldo ante interrupciones del suministro eléctrico.

También, podría desarrollarse una investigación posterior orientada a evaluar el comportamiento energético del edificio mediante una auditoría post-ocupación, incorporando variables reales de ocupación, horarios de funcionamiento, condiciones climáticas, consumo eléctrico y desempeño de los sistemas de iluminación y generación fotovoltaica. Esto permitiría retroalimentar el diseño inicial y establecer criterios aplicables a futuros proyectos de infraestructura educativa sostenible en la ciudad de El Alto.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, C. (29 de noviembre de 2011). Cuáles son las mejores tecnologías para ahorrar energía. *El país semanal*, (1) Recuperado el 12 de febrero del 2025 <https://elpais.com>
- Alvarez_García, G. (2013). Energía en edificaciones. *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*. Revista Mexicana de Física, 59(2) 44-51 Recuperado el 22 de marzo de 2025 <https://smf.mx>
- Arquitectura, S. (14 de julio de 2017). *Los efectos positivos de la eficiencia energética en hogares con bajos ingresos*. Consultado el 22 de agosto 2024 <https://arquitectura-sostenible.es/>
- Ashrae, H. H. (2019). american Society of Heating, Refrigerating and Air_ Conditioning Engineers.
- Bolivia, G. d. (2012). Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien . (Ley N°300). Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. Recuperado el 25 de enero de 2025, de <http://gacetaoficialdebolivia.gob.bo>
- CEPAL, F. C. (2024). *Eficiencia Energética en la transmisión sostenible e inclusiva de América Latina y el Caribe: Progresos y Políticas*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado el 18 de febrero de 2025, de <https://cepal.org>
- Climate_Data. (24 de febrero de 2024). *Clima El Alto Bolivia*. Obtenido de <https://es.climate-data.org/>. Recuperado el 25 de febrero de 2024.
- Cui, W., Hong, J., Liu, G., Zhang, L., & Wei, L. (2023). *A multi-stage decision framework for optimal energy efficiency measures of educational buildings: A case study of Chongqing*. *Processes*, 11(6), 1633. Recuperado el 14 de marzo de 2026 <https://doi.org/10.3390/pr11061633>
- Decreto supremo Nro. 2048, E. P. (2014). Generación de electricidad a partir de fuentes renovables. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. Recuperado el 25 de enero de 2025, de <http://gacetaoficialdebolivia.gob.bo>
- Decreto Supremo Nro. 4477, G. O. (2021). Establece condiciones generales para normar la actividad de Generación Distribuida en los sistemas de distribución de energía eléctrica. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. Recuperado el 26 de enero de 2025, de <http://gacetaoficialdebolivia.gob.bo>
- Duarte, J. G. C. L. M., Zemerio, B. R., Souza, A. C. D. B., Tostes, M. E. L., & Bezerra, U. H. (2021). *Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings*. *Journal of Building Engineering*, 43, 102587. Recuperado el 2 de febrero de 2026 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102587>
- Duffie, J. J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (4ta Ed.) Wiley.

- Educa, B. (10 de febrero de 2024). *Humedad Relativa Municipio de El Alto*. Obtenido de <https://www.educa.com.bo> Recuperado el 18 de febrero de 2024
- Enel_X. (04 de febrero de 2024). *Edificios Inteligentes*. Recuperado el 18 de febrero de 2024 <https://corporate.enelx.com/>
- Energías, M. M. (2022). *Estudio del Potencial de Eficiencia Energética en el Sector Hotelero*. La Paz.
- Energías_Alternativas, V. d. (2014). *Plan para el desarrollo de las energías alternativas 2025*. La Paz.
- Energy, U. D. (2020). Energy efficiency trends in residential and commercial buildings. Recuperado el 18 de febrero de 2024
- European Commission, J. R. (2020). Energy consumption benchmarks for public buildings. Publications Office of the European Union. Recuperado el 11 de agosto de 2025, de <https://europa.eu>
- Garcia J. & Rivera M., .. (2020). Eficiencia Energética en Edificios Educativos en américa latina. *Revista de energía y sostenibilidad*, 89-104. Recuperado el 4 de abril de 2025, de la base de datos de la revista.
- Garcia L., R. M. (2019). Educación y sostenibilidad: Un enfoque integral. Editorial Universitaria de américa Latina.
- Garzón, B. (31 de 05 de 2023). *CONICET NOA SUR*. Obtenido de Eficiencia energética en la construcción de edificios. Recuperado 12 de junio de 2023 https://noasur.conicet.gov.ar/eficiencia-energetica-en-la-construccion-de-edificios/?utm_source=chatgpt.com
- GIZ, D. G. (2024). *Programa de Energías Renovables PEERR II*. Recuperado el 10 de enero de 2024 <https://www.giz.de/en/worldwide/40362.html>
- IBNORCA, I. B. (2015). *Diseño y construcción de instalaciones eléctricas interiores en baja tensión*. La Paz.
- IEA, I. e. (2015). *Indicadores de Eficiencia Energética*. Paris, Francia: Cedex.
- INE, I. N. (2021). *Instituto Nacional de Estadística INE*. Recuperado el 22 de marzo de 2022 <https://www.ine.gob.bo/index.php/encuesta-de-hogares-tics/>
- IRENA, I. R. (2022). World Energy Transitions Outlook 2022. Recuperado el 3 de marzo de 2025, de <https://irena.org>
- ISO_50001. (2011). *Sistemas de gestión de la energía, Requisitos con orientación para su uso*. International Organization for Standardization. Recuperado el 28 de enero de 2025, de <https://iso.org>
- Laboratory., N. R. (2019). U.S. energy use intensity by property type. U.S. Department of Energy.

- McGibney, S. R. (2016). Open BMS IoT driven architecture for the internet of buildings. *IECON Proceedings(Industrial Electronics Conference)*, 7071 - 7076. Recuperado el 19 de julio de 2025, de <https://ieee.org>
- MHE, M. d. (2022). *Estrategia Nacional de Eficiencia Energética 2022 - 2025*. La Paz - Bolivia: Cooperación Alemana. Recuperado el 12 de febrero de 2025, de <https://mhe.gob.bo>
- Montano Saavedra, A., Arequipa Saravia, M. B., & Limachi Ochoa, C. L. (2020). *Análisis de la eficiencia en la producción de energía eléctrica para la Central Solar Fotovoltaica de 50 kW conectada a la red en el campus universitario Cota Cota, ubicada en la ciudad de La Paz, Bolivia*. *ENERLAC. Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(2), 28–38. Recuperado el 8 de abril de 2025 <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/143>
- Niño, D. (25 de Mayo de 2023). *Eficiencia Energética en Construcción: óptimo consumo de energía*. Recuperado el 5 de junio de 2023 <https://www.enobra.com/es/noticias/construccion-representa-el-40-del-uso-de-energia>
- OLADE. (2019). Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe. *OLADE*. Recuperado el 11 de febrero de 2025, de <https://siel.olade.org>
- ONU-Hábitat. (20 de 05 de 2020). *ONU Habitat Reporte anual 2020*. Recuperado el 14 de diciembre de 2020 <https://onu-habitat.org/index.php/ONU-Habitat-Reporte-anual-2020>
- Otón, L. R. (2009). *La Energía Solar en la Edificación: La Eneregía Solar Termica y Energía Solar Fotovoltáica*. Cartagena.
- Paucarchuco, K. M. (2021). *La pandemia y los objetivos de desarrollo sostenible*. Huancayo Junin Perú: Universidad Roosevelt.
- Park, J., Kim, H., Lee, S., & Choi, Y. (2022). *Energy savings potential of lighting control systems in educational buildings: A case study*. *Energies*, 15(18), 6653. Recuperado el 30 de mayo de 2025 <https://doi.org/10.3390/en15186653>
- Plazas_López, F. (2006). *Sobre el uso y la gestión como factores principales que determinan el uso en la edifiación*. Barcelona.
- RTS, R. T. (03 de septiembre de 2021). *RTS Revestimientos Tecnicos Sostenibles*. Recuperado el 11 de noviembre de 2024 <https://rts-spain.com/eficiencia-energetica-en-edificios>
- Salto, J. D. (2021). *Desarrollo de un sistema de gestión para el control de iluminación y climatización en edificaciones, aplicado al edificio "Padre Juan Bottasso" de la universidad politécnica Salesiana, Sede Cuenca*. Cuenca - Ecuador. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de <https://ups.edu.ec>
- Sánchez F. & López M. (2021). Indicadores de eficiencia energética en edificios: Aplicaciones en América Latina. *Revista de Energía y Medio Ambiente*, 120-134. Recuperado el 20 de marzo de 2025, de la base de datos de la revista.

- Toribio, P. A. (2018). *Eficiencia Energética en edificaciones típicas en la ciudad de Lima-Perú*. Callao. Recuperado el 17 de mayo de 2025, de <http://unac.edu.pe>
- Tutiempo Network, S. (11 de febrero de 2024). *Radiación solar en La Paz / Alto*. Recuperado el 12 de febrero de 2024 <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/la-paz-alto.html>
- UMSA, U. M. (2020). Estudio sobre eficiencia energética en edificaciones en ciudades altas de Bolivia. UMSA. Recuperado el 2 de febrero de 2025, de <https://umsa.bo>
- UNAM, U. N. (2021). Medidas de eficiencia energética en la edificación. *Programa de energía*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de <http://unam.mx>
- UNESCO. (2020). El impacto de las condiciones escolares en el aprendizaje. *Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la cultura*. Recuperado el 22 de abril de 2025, de <https://unesco.org>
- USGBC, U. G. (2021). *LEED Certification*. USA. Recuperado el 14 de marzo de 2025, de <https://usgbc.org>
- Villalobos, P. S. (2023). Bolivia rompe récord de deforestación y de emisiones de gases por efecto invernadero. *La conciencia social del arte*. Recuperado el 19 de octubre de 2023

ANEXOS



Edificaciones existentes actualmente en el ITBM



Edificio Taypi vista frontal (noche)



Edificio Taypi Vista posterior (noche)










Panel solar monocristalino PERC de media celda de 550 W

Panel solar de alta potencia de 550 W Fabricado con células solares PERC de 11BB, esta serie de módulos de alto rendimiento proporciona la solución más rentable para reducir el LCOE de cualquier sistema fotovoltaico grande o pequeño.

Share to








Envíe consulta

Chatee ahora

Panel fotovoltaico seleccionado



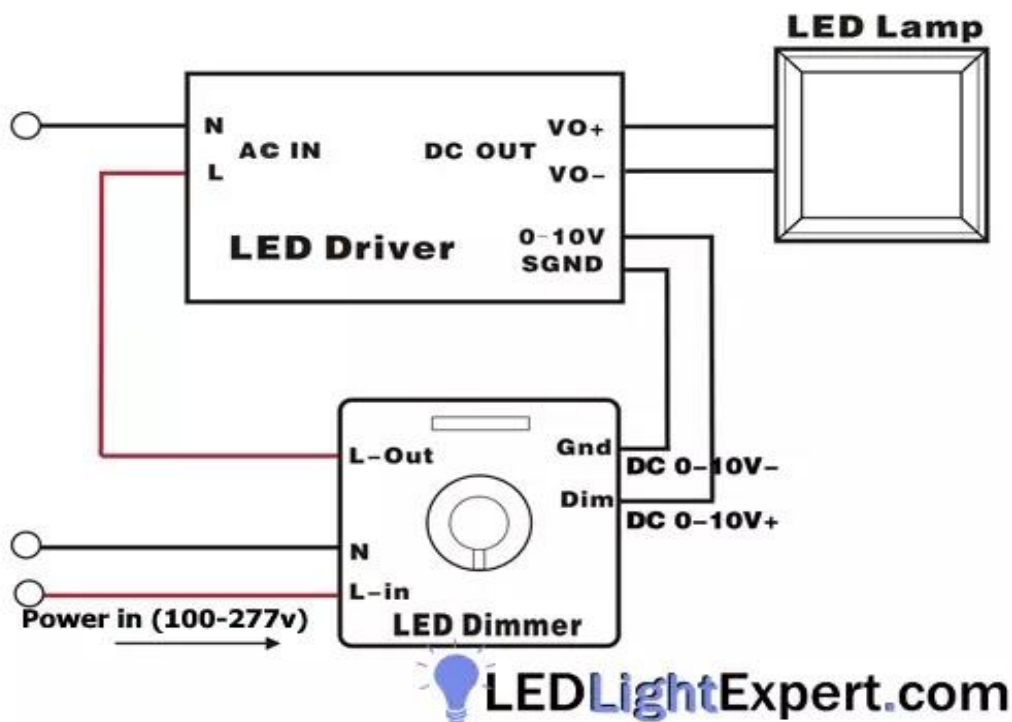
El Growatt SPF5000ES es un inversor que puede funcionar con y sin batería. El voltaje de entrada máximo es de 450 V CC. Se puede dar prioridad a la carga a través de la red o del sistema fotovoltaico conectado. El sistema también se puede monitorear de forma remota usando un dongle WiFi o GPRS.

entre sus ventajas tiene las siguientes:

- Funcionamiento en paralelo hasta 6 unidades
- Regulador solar MPPT de ALTA POTENCIA incorporado
- Ecuilización de la batería para optimizar el rendimiento y ciclo de vida de la misma
- Pueden funcionar sin baterías
- Soporta operación paralela para expansión de capacidad hasta 30kW
- Display LCD
- Salida senoidal pura
- Diseño para operación continua las 24 horas
- Prioridad seleccionable (red o solar)
- Alta eficiencia para ahorrar energía
- Cargador automático de 3 etapas

Inversor seleccionado

0-10v Dimming Wiring Diagram



*Same for 1-10v systems

*Our drivers are 110-277v Compatible. Wall switch must be rated the same

Diagrama del Driver Regulable Dimming



Dimming seleccionado



LUMINARIA PANEL LED 36W W60L60 LA RC048B 100-277V IP20 6500K (4,000 LUMINES) PHILIPS

Categoría: paneles led

SKU: 1021600

STOCK: **Stock disponible**

DESCRIPCIÓN

Panel LED RC048 cuadrado de 36W con flujo luminoso de 4000 lúmenes, temperatura de color de 6500K, tensión de operación 100V-277V, índice de reproducción cromática 80, grado de protección IP20, vida útil de 50,000 horas. Montaje para empotrar y es equivalente a una rejilla de 4 fluorescentes de 18W T8. De 600 x 600 milímetros.

1 - +

AÑADIR AL CARRITO



Luminaria LED adoptada en el edificio