



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DE LA  
INCORPORACIÓN DE SISTEMAS SOLARES ACTIVOS EN EL  
EDIFICIO TEATRO DE LOJA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN  
HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**AUTOR: BRAVO ROJAS, MARTHA JOHANNA**

Profesor Guía: Sánchez Arriagada, Reinaldo

CONCEPCIÓN 2017



## **Factibilidad técnica económica de la incorporación de sistemas solares activos en el edificio Teatro de Loja**

**Economic technical feasibility of incorporating active solar systems in the theater building Loja**

Arq. Martha Johanna Bravo Rojas. Alumna Magister en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética, Facultad de Construcción y Diseño, Universidad del Bio Bio, Chile.

Servicio de Contratación de Obras

Analista de Seguimiento y Control 2

Calle José Antonio Eguiguren entre Sucre y 18 de Noviembre. Loja – Ecuador.

E- mail: [mjbravor85@gmail.com](mailto:mjbravor85@gmail.com)

**Resumen:**

El trabajo presenta las estrategias solares activas fotovoltaicas y térmicas, planteadas para mejorar el funcionamiento energético del edificio Teatro de Loja. Se parte del análisis bioclimático del edificio y su entorno a través de herramientas de simulación. Se realiza una evaluación de la demanda de energía eléctrica y de agua caliente sanitaria. Se define la tecnología aplicada, sus características técnicas y económicas para cada sistema y se muestra el esquema de la instalación con el equipamiento utilizado. A partir del método simplificado de horas solares equivalentes se dimensionan los sistemas fotovoltaicos en cubierta y fachadas y con el método de F-Chart, se define el sistema térmico sobre cubierta. El estudio concluye en el análisis del comportamiento de cada una de las estrategias y la determinación de la factibilidad técnica – económica para el caso de estudio.

**Abstract:**

The work presents the active photovoltaic and thermal solar strategies, designed to improve the energy performance in Loja's Theater Building. It starts from the bioclimatic analysis of the building and its environment through simulation tools. An evaluation of the demand for electric power and domestic hot water is carried out. It defines the technology applied, its technical and economic characteristics for each system and shows the scheme of the installation with the equipment used. From the simplified method of equivalent solar hours, photovoltaic systems are dimensioned on roof and facades and with the F-Chart method, the thermal system on roof is defined. The study concludes in the analysis of the behavior of each of the strategies and the determination of the technical-economic feasibility for the case study.

**Palabras clave:**

Solar, fotovoltaico, térmico, eficiencia energética

**Key words:**

Solar, photovoltaic, thermal, energy efficiency

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	4
2. Desarrollo	5
2.1. La tecnología solar fotovoltaica	5
2.2. La tecnología solar térmica	6
3. Metodología y descripción del caso de estudio	7
4. Resultados	11
4.1. Del análisis fotovoltaico	11
4.1.1. Cubierta fotovoltaica sobrepuesta	12
4.1.2. Muro cortina fotovoltaico	15
4.2. Del análisis térmico	18
4.2.1. Cubierta solar térmica	18
5. Conclusiones	23
6. Referencias Bibliográficas	24

## 1. Introducción

Los edificios usan el 40% de la energía global para operar y son responsables del 60% de las emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. En Ecuador el 49,13% del total de la generación eléctrica es producida por centrales térmicas que utilizan combustibles de origen fósil para su funcionamiento [2]. El petróleo constituye el 88,4% del total de energía primaria y existe una gran dependencia energética de recursos secundarios representados en su mayoría por la importación de diésel y gasolina [3]. El sector comercial y servicio público, así como la construcción; se ubica entre los sectores con mayores rangos de consumo energético; 5,9% y 17,1% respectivamente. A partir del año 2007, Ecuador se encuentra en un proceso de transformación de la matriz productiva, con la incorporación de energías renovables a los procesos de producción. En el 2014 se registra un aporte de energía producida a partir de fuentes renovables que representa el 47,54% entre centrales eólicas, hidráulicas, bio-masa y fotovoltaicas [2]. A largo plazo, la única fuente de energía con la suficiente abundancia para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad es el sol. Ecuador por estar situado sobre la línea ecuatorial tiene un potencial solar muy importante. Sin embargo, es un recurso no aprovechado. El parque edilicio público que ha crecido ocho veces más en los últimos siete años, carece de alternativas que permitan aprovechar ese recurso natural en abundancia.

A partir del análisis de un caso de estudio, el presente artículo muestra los aspectos más importantes a considerarse en la aplicación de sistemas solares activos: térmicos y fotovoltaicos para cubrir los requerimientos energéticos del propio edificio en calentamiento de agua y producción de energía eléctrica. [Tabla 1]

**Tabla 1.- Valores climáticos medios en Loja. Fuente: NASA**

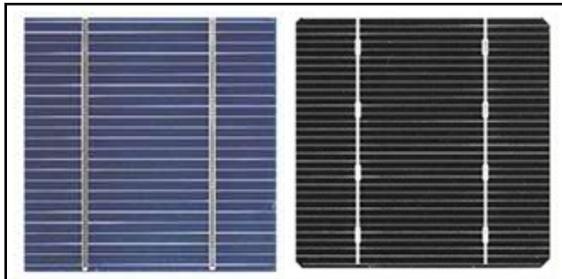
Altitud	2100 m.s.n.m.
T. Máxima	22,55°C
T. Mínima	7,38°C
T. Media Mensual	15,39°C
Insolación promedio mensual	4,91 KWh/m <sup>2</sup> /d
Humedad relativa	86,41%
Nubosidad media	6 octas
Velocidad del viento media	2,77 m/s

## 2. Desarrollo

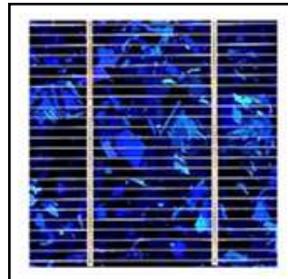
### 2.1. La tecnología solar fotovoltaica

El efecto fotovoltaico consiste en generar corriente eléctrica al llegar fotones de la luz solar sobre una celda fotovoltaica, hecha de capas de material semiconductor, en general silicio tratado, para presentar propiedades particulares. El silicio es el material con el cual generalmente están elaboradas las celdas fotovoltaicas, el mismo que se clasifica de acuerdo a su proceso de refinamiento, siendo el silicio monocristalino una estructura casi perfecta, de alta pureza y rendimiento. [Figura 1, 2, 3 y 4].

**Figura 1-2. Silicio Monocristalino**



**Figura 3. Silicio Policristalino**



**Figura 4. Silicio Amorfo**



**Fuente:** [en línea] <http://www.certificadosenergeticos.com/tipopaneles-fotovoltaicos-son-mas-eficientes-rentables>. [Consulta: 07 Agosto 2016]

La cantidad de energía que puede transformar una celda depende de:

- El tipo y área del material.
- La intensidad de la energía solar y el ángulo de incidencia.
- La longitud de onda. Normalmente opera entre 0.5 y 10 micrones

Una celda de silicio monocristalino de 100 cm<sup>2</sup> produce cerca de 1.5 W, con un voltaje de 0.5 Volt continuo y 3 Amperes con una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>. La eficiencia de las celdas solares está alrededor del 15% y a escala de laboratorio con 1000 W/m<sup>2</sup> y temperatura de 25 °C, ésta puede alcanzar el 20%. [4]

Para la integración fotovoltaica a elementos arquitectónicos, las celdas se agrupan en los llamados módulos fotovoltaicos o paneles solares. Gracias a su forma de operación presentan algunas ventajas como: no requiere mantención, no producen gases de efecto invernadero, su operación es silenciosa, son elementos confiables y de larga vida útil.

A nivel mundial, la capacidad eléctrica instalada de energía solar es cercana a los 40GW en 2010, respecto a 1,5GW en el 2000 siendo la energía renovable que más rápido

aumentó. La tecnología fotovoltaica se encuentra liderada por países como: Alemania, España, Japón, EEUU, Italia y Corea del Sur con el 90% de la producción a nivel mundial.

[5]

En el Ecuador no se encuentra vigente la regulación que tiene como objetivo el establecimiento de: requisitos, precios, período de vigencia, y forma de despacho de la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado y sistemas aislados, por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales. Actualmente ya no se otorgan concesiones ni autorizaciones para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos conectados a red. Los sistemas solares aislados; tienen una especial influencia en las zonas rurales en donde se dificulta llegar con la electrificación a través de la red pública.

El análisis bioclimático del caso de estudio define dos estrategias de aplicación de sistemas fotovoltaicos: sobrepuesto a la cubierta e integrado a la fachada a través de un muro cortina fotovoltaico. La elección de los módulos se realiza con base a la disponibilidad en el mercado, rendimiento, costos, estética y a la facilidad de anclaje sobre la superficie determinada.

## **2.2. La tecnología solar térmica**

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del sol para transferirla a un medio portador de calor que generalmente es aire o agua. Las aplicaciones de la energía solar, según nivel térmico dentro del uso doméstico y comercial son: agua caliente sanitaria, calefacción, climatización de piscinas y acondicionamiento de aire. Los dispositivos utilizados para la captación solar son los colectores solares o panel solar térmico.

La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2506 sobre eficiencia energética en edificaciones, establece los requisitos que debe cumplir un edificio para reducir a límites sostenibles su consumo de energía y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable. Con base a la norma y al análisis del caso de estudio, se plantea como estrategia de mejoramiento energético, una cubierta captadora de energía térmica para satisfacer la necesidad del propio edificio en agua caliente sanitaria.

En correspondencia con varios autores y normas, la temperatura de A.C.S. de un punto de consumo deberá estar en el intervalo de 37 a 45° C. En caso de almacenamiento 60°C

y distribuirse a una temperatura tal que en el retorno al sistema de acumulación el agua esté a 50°C o más.

Actualmente la Norma Técnica INEN sobre eficiencia energética en la edificación, se presenta como obligatoria en el Ecuador y es imperante en nuestro desempeño como arquitectos e ingenieros hacer uso de ella, para lograr la construcción sostenible de los espacios que habitamos.

### **3. Metodología y descripción del caso de estudio.**

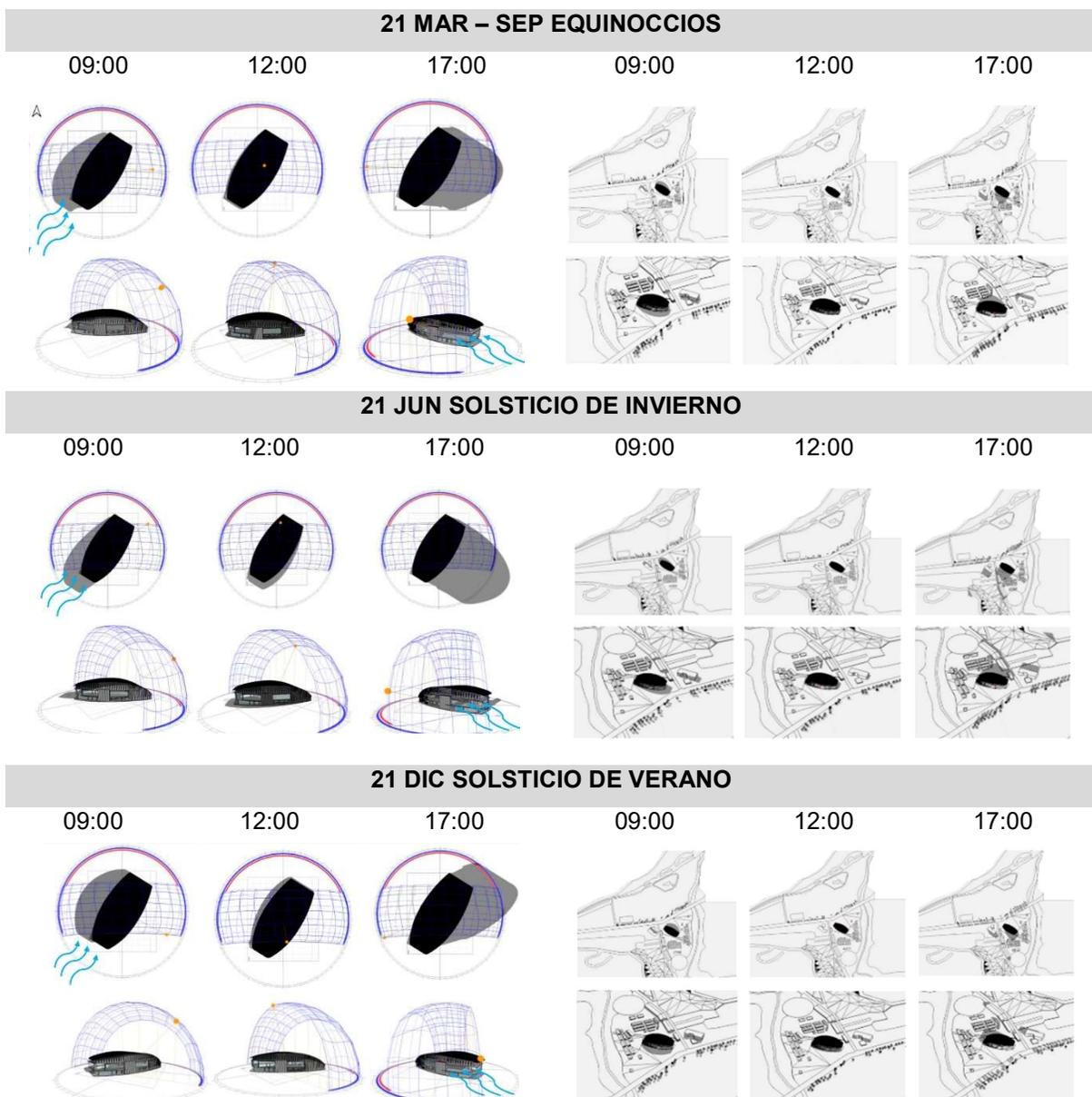
El edificio utilizado como caso de estudio es el Teatro de Loja, un edificio público de carácter emblemático ubicado en el valle de Loja, al sur del Ecuador. Físicamente se divide en dos bloques de construcción, el primero destinado a servicios administrativos, salas de ensayo y talleres de enseñanza y el segundo de uso público. Todos los espacios se distribuyen en cuatro plantas incluido el subsuelo generando un área de construcción de 10572.38 m<sup>2</sup>. Desde su concepción el teatro significó un proceso complejo de diseño arquitectónico, estructural y de otras ramas de la ingeniería; por lo que escasamente se aplicaron estrategias bioclimáticas en el proceso integral de diseño. De esta forma se plantea, el mejoramiento energético en su estado actual con base a estrategias activas, cuya metodología incluye lo siguiente:

- Caracterización geográfica de Loja y análisis bioclimático de la zona de implantación del proyecto. En esta parte deben considerarse: ubicación, orientación, entorno, contexto, con énfasis en análisis de datos del recurso solar y el índice de transparencia atmosférica en todos los meses del año. Se debe tomar en cuenta la dirección y velocidad del viento para el diseño de estructuras soportantes de los sistemas.
- Revisión de los planos arquitectónicos y estructurales del proyecto. El objetivo es determinar la superficie de techos y fachadas disponibles para la colocación de los paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos, deben considerarse áreas especiales para resguardar los equipos adicionales para cada instalación; procurando que sean: espacios ventilados, de fácil acceso, cercanos a los colectores solares para evitar las pérdidas de calor y energía durante el proceso de distribución.
- Levantamiento fotográfico del edificio y su entorno. Permite tener un registro de las condiciones del emplazamiento; colindancias, presencia de árboles, postes, edificios

aledaños y elementos que pudieran generar sombra y obstrucciones sobre la fachada y cubierta.

- Modelado en tres dimensiones del edificio. Modelar a precisión la geometría del edificio incluyendo la orientación, además es pertinente crear la topografía del terreno y todos los elementos circundantes que pudieran provocar sombras sobre el edificio.
- Análisis de la matriz 3x3. Implica un análisis de sombras durante los solsticios y equinoccios del año en diferentes horas del día. Se aplica el software Ecotec 2011 para realizar el análisis en planta y elevación del edificio y su entorno. [Figura 5].

**Figura 5. Análisis de asoleamiento.**



**Fuente:** Elaboración propia

- Definición de las propuestas de integración de sistemas activos fotovoltaicos y térmicos. Las propuestas se generan a partir del análisis descrito anteriormente en el que se define la zona de cubierta y los muros cortina en planta alta como potenciales elementos captadores de radiación solar. En este apartado se analiza también la existencia de la tecnología en el mercado ecuatoriano y los posibles mercados de importación. Cabe señalar que el presente estudio incluye análisis de costos de las estrategias planteadas.
- Cálculo del consumo energético diario del teatro en iluminación y climatización. En esta parte se realiza un análisis de las horas de operación mensual de cada uno de los aparatos y sistemas que darán funcionamiento al edificio por un periodo de tiempo determinado. Se toma como referencia el estudio eléctrico de equipos instalados en planos asbuilt. [Tabla 2].

**Tabla 2.- Potencia instalada y consumo mensual en iluminación y climatización, considerando factor de seguridad y coeficiente de pérdidas totales KT. Fuente: Elaboración propia.**

Sistemas de uso diario	Potencia instalada W	N° equipos	Horas oper día	Horas oper mes	Consumo energía mes W h/día	Meses Jun-Nov/Verano W h/día	Meses Dic-May/Invierno W h/día
Iluminación Arquitectónica	42220,00	1	2,67	80	112587,00	112587,00	112587,00
Climatización Bloque 1	22820,00	1	2,67	80	60853,00	60853,00	60853,00
Climatización Bloque 2	75160,00	1	2,67	80	200427,00	200427,00	200427,00
<b>TOTAL:</b>	<b>140200,00</b>				<b>373867,00</b>	373867,00	373867,00
Total						373867,00	373.867,00
Factor de seguridad					10%	411253,00	411253,00
Incluyendo KT					0,56	739000,00	739000,00
Capacidad baterías							38434,20
Capacidad baterías							150 Ah
Número de baterías							256,20

$$K_T = [1 - (K_B + K_C + K_R + K_X) \cdot [1 - \frac{K_A \cdot D_{aut}}{P_d}]] \quad (1)$$

*K<sub>A</sub>* = Coeficiente por la autodescarga diaria de la batería de plomo ácido a 20°C.

*K<sub>B</sub>* = Originada por el rendimiento de la batería.

*K<sub>C</sub>* = Contempla el rendimiento del convertidor (si lo hay)

*K<sub>R</sub>* = Debido al rendimiento del regulador empleado.

*K<sub>X</sub>* = otras pérdidas no contempladas, por efecto Joule, caídas de tensión, etc.

*D<sub>aut</sub>* = Días de autonomía con baja o nula insolación.

*P<sub>d</sub>* = Profundidad de descarga (en fracción).

KA=	0,005
KB =	0,050
KC =	0,240
KR =	0,050
KX =	0,100
Daut =	1,000
Pd =	0,800
KT =	<b>0,557</b>

- Cálculo del consumo de agua caliente sanitaria. Es imprescindible conocer datos exactos de consumo y demanda estimada. Para ello con referencia al Código Técnico de la Edificación, se estiman valores típicos de consumo de acuerdo al uso y ocupación de las diversas áreas del teatro. [Tabla 3]

**Tabla 3.- Análisis de la demanda de agua caliente sanitaria en función al uso y ocupación del teatro. Fuente Elaboración propia.**

<b>SUBSUELO</b>					
<b>Criterio de la demanda</b>	<b>Área útil</b>	<b>Ocupación (personas)</b>	<b>Litros unidad/día</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total (litros)</b>
Lockers varones y mujeres	52,1	18	21	Por persona	378
Camerinos mujeres	16,59	4	21	Por persona	84
Camerinos varones	20,34	4	21	Por persona	84
<b>PLANTA BAJA</b>					
Camerinos VIP	63,53	3	21	Por persona	63
Camerinos pequeños	37,35	15	21	Por persona	315
Camerinos colectivos mujeres	26,84	17	21	Por persona	357
Camerinos colectivos varones	35,22	13	21	Por persona	273
<b>PRIMERA PLANTA ALTA</b>					
Sala de ensayo de orquesta	250,03	125	2	Por persona	250
Taller de danza	39,96	18	4	Por persona	72

Taller de oratoria	20,74	10	4	Por persona	40
Taller de artes plásticas	29,94	15	4	Por persona	60
Área de profesores	56,77	14	2	Por persona	28
Sala de profesores	23,33	11	2	Por persona	22
Café - galería	432,94	116	1	Por persona	116
<b>SEGUNDA PLANTA ALTA</b>					
Sala multiuso 1	42,96	31	4	Por persona	124
Sala multiuso 2	46,95	30	4	Por persona	120
Aula	42,37	28	4	Por persona	112
Sala de ensayo de solistas	89	23	4	Por persona	92
				<b>TOTAL</b>	<b>2590</b>

- Aplicación de método simplificado para dimensionamiento del sistema fotovoltaico en cubierta y fachadas y aplicación del método F-Chart para dimensionar el sistema térmico.

Loja se ubica al suroeste del Ecuador en las coordenadas: 3°59'12.23" de latitud Sur y 79°11'56.20" de longitud Oeste a una altura de 2100m.s.n.m., es una de las ciudades que conforman la región andina del país y tiene una radiación solar diaria promedio de 4,91 KWh/m<sup>2</sup>. Para la simulación de sistemas fotovoltaicos se considera un ángulo de inclinación del panel a 3°Sur.

La revisión de los planos arquitectónicos, el análisis de la matriz 3x3 y el levantamiento fotográfico del edificio, permite determinar las superficies en techos y fachadas con mayor incidencia solar en las diferentes épocas del año. Es así que la cubierta permanece libre de sombras durante todo el año, mientras que algunas zonas de fachada se ven obstruidas con sombras provocadas por elementos constructivos del mismo edificio. El sitio de implantación, no presenta restricciones que se deban tomar en cuenta para las estrategias fotovoltaicas planteadas.

El edificio se encuentra libre de sombras generadas por edificios, árboles y otros elementos externos secundarios. Sin embargo, un aspecto importante que se considera para la ubicación de paneles y colectores solares, es la curvatura de la cubierta.

## 4. Resultados

### 4.1. Del análisis fotovoltaico

El modelado en 3d del edificio y su entorno, sirvió para crear simulaciones de las sombras generadas durante los solsticios y equinoccios. Se obtiene como resultado que, durante todo el año, el edificio permanece libre de sombras en la zona de cubierta. Las

fachadas Este y Oeste se ven despejadas en la mañana y en la tarde respectivamente, mientras que al medio día se producen sombras cercanas a los aleros y cornisas. Cabe señalar que la ubicación privilegiada, cercana al centro geográfico de la tierra permite tener días de duración constante durante todo el año. De acuerdo al análisis del edificio y considerando los objetivos trazados inicialmente, se plantean las siguientes estrategias de diseño:

#### 4.1.1. Cubierta fotovoltaica sobrepuesta

El campo fotovoltaico, puede integrarse encima de superficies construidas o ejercer la función de elemento de construcción. La cubierta del teatro, además de cumplir con sus funciones propias, presenta la solución a un requerimiento especial de aislamiento acústico. La facilidad de adaptación a la forma, sin alterar sus condiciones constructivas y de funcionamiento y las condiciones presentadas con respecto a la exposición solar del edificio, sin obstrucciones y sombreamientos; son las ventajas por las que se propone un sistema fotovoltaico sobre puesto a las actuales condiciones constructivas de cubierta.

Para el presente análisis, el campo fotovoltaico, se construye sobre la superficie plana de la cubierta, es decir a una altura de 25m sobre el nivel de piso terminado y los paneles se inclinan a 3° Sur con respecto al plano horizontal.

Para el dimensionamiento de la instalación se aplica el método simplificado, basado en el número de horas de sol pico o equivalentes; entendiéndose como aquel número de horas de sol que en condiciones estándar (1000W/m<sup>2</sup>), aportaría la misma energía que la recibida en el periodo considerado. Para esto es necesario conocer la demanda energética existente y en consecuencia las potencias y tiempos de funcionamiento de los distintos receptores.

La expresión que proporciona la radiación total horaria sobre una superficie inclinada con un ángulo  $s$  es:

$$(I_T)^n = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) + (I_b I_d) \rho \left( \frac{1 - \cos s}{2} \right) \quad (2)$$

En donde el factor  $R_b$  es el cociente entre la radiación que incide sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal. Este factor puede expresarse,

según se deduce de la [Figura 4] en función del ángulo  $i$  que forman la dirección de la radiación directa y su componente sobre la perpendicular a la superficie inclinada.

$$R_b = \frac{\cos i}{\sin \alpha} \quad (3)$$

En donde  $\alpha$  es el ángulo correspondiente a la altura del Sol. Suponiendo que la orientación de la superficie es sur, es decir,  $\gamma=0$ , se llega al siguiente resultado:

$$R_b = \frac{\cos(L - s)\cos\delta\cos\omega + \sin(L - s)\sin\delta}{\cos L\cos\delta\cos\omega + \sin L\sin\delta} \quad (4)$$

Donde:

$L = \text{latitud}$

$\omega = \text{ángulo horario}$

$\delta = \text{declinación}$

$s = \text{ángulo de inclinación de la superficie.}$

Los factores de configuración:

$$\frac{1 + \cos s}{2} \quad (5)$$

Y

$$\frac{1 - \cos s}{2} \quad (6)$$

Tienen en cuenta respectivamente, la porción de superficie esférica situada por encima del plano de la superficie inclinada y la reflexión en el plano horizontal. El factor que recoge la reflectancia del suelo es  $\rho$  y toma valores comprendidos entre 0,2 y 0,7; según se trate de una superficie seca o cubierta de nieve de un espesor superior a 2,5cm. [5].

La variación del valor de la radiación sobre una superficie inclinada en esta latitud es ínfima con respecto a la radiación sobre una superficie horizontal, debido a que el ángulo beta de inclinación del panel, es cercano a  $0^\circ$ . [Tabla 4].

**Tabla 4. Radiación directa sobre superficies en la coordenada 3°59'12.23" de latitud Sur y 79°11'56.20". Fuente: Datos, NASA. Elaboración propia**

<b>Mes</b>	<b>Radiación sup. horizontal media día, para el mes</b> R_sh_día [kWh/m <sup>2</sup> ·día]	<b>Radiación sup. inclinada media día, para el mes</b> R_sh_día [kWh/m <sup>2</sup> ·día]	<b>Hora solar equiv. Hse</b> [horas/día]
Enero	4,830	4,833	4,833
Febrero	4,800	4,803	4,803
Marzo	5,190	5,194	5,194
Abril	4,880	4,885	4,885
Mayo	4,650	4,656	4,656
Junio	4,590	4,596	4,596
Julio	4,650	4,656	4,656
Agosto	4,930	4,936	4,936
Septiembre	5,180	5,185	5,185
Octubre	4,950	4,953	4,953
Noviembre	5,260	5,264	5,264
Diciembre	5,070	5,074	5,074
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,915</b>	<b>4,919</b>	<b>4,919</b>

Las tecnologías aplicadas para el dimensionamiento de los circuitos fotovoltaicos se disponen sobre la cubierta formando circuitos en serie y paralelo [Tabla 5, Figura 6]. Con un factor de servicio de 99,9%, se genera un ahorro anual de USD\$15.440,00 [Tabla 6].

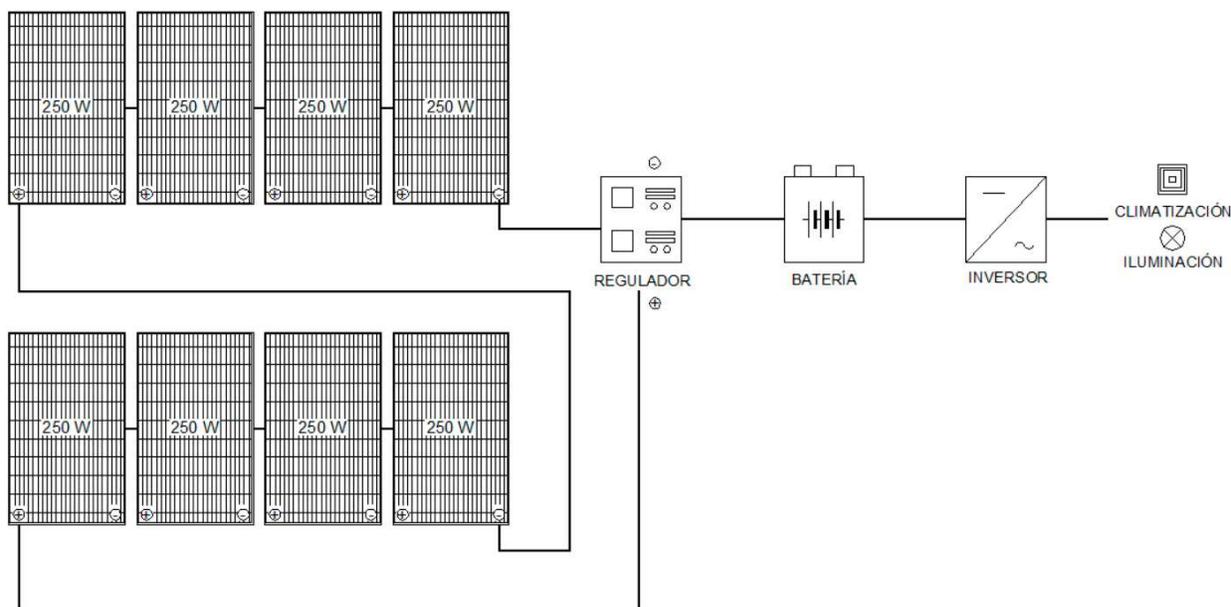
**Tabla 5. Tecnología aplicada al sistema fotovoltaica, resumen de costos y recuperación del capital. Fuente: Elaboración propia.**

<b>Panel FV</b>	CSG PVTech Panel Solar Polycristalino	<b>Costo específico con baterías</b>	4,10 USD\$/W
<b>Modelo</b>	CSG AAAM2-60	<b>Número de paneles</b>	600 unidades
<b>Voltaje</b>	30,9 Volt	<b>Superficie panel</b>	1,62 m <sup>2</sup>
<b>Intensidad</b>	8,09 A	<b>Superficie total</b>	972 m <sup>2</sup>
<b>Voltaje del circuito</b>	24 Volts	<b>Potencia instalada</b>	150.000
<b>Potencia panel</b>	250 W	<b>Costo instalación</b>	W/\$
<b>Costo EE</b>	0,1133 \$/kW h	<b>Costo específico</b>	634 \$/m <sup>2</sup>
		<b>Recuperación capital</b>	39,90 años

**Tabla 6. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico a partir del método simplificado. Fuente: Elaboración propia.**

	Demanda Teórica de Energía		Demanda Energía W h/día	Radiación difusa / Hora solar equiv Hse horas/día	Energía producida por panel W h/día	Energía producida por instalación W h/día	Energía producida por instalación kW h/mes	Factor de servicio	Ahorro mensual \$/mes
	Días/mes	KW h/mes							
Enero	31	11.590	739.000	4,83	1208,3	724.950	22473,5	98,1%	1.288
Febrero	28	10.468	739.000	4,80	1200,8	720.450	20172,6	97,5%	1.156
Marzo	31	11.590	739.000	5,19	1298,5	779.100	24152,1	105,4%	1.384
Abril	30	11.216	739.000	4,89	1221,3	732.750	21982,5	99,2%	1.260
Mayo	31	11.590	739.000	4,66	1164,0	698.400	21650,4	94,5%	1.241
Junio	30	11.216	739.000	4,60	1149,0	689.400	20682,0	93,3%	1.185
Julio	31	11.590	739.000	4,66	1164,0	698.400	21650,4	94,5%	1.241
Agosto	31	11.590	739.000	4,94	1234,0	740.400	22952,4	100,2%	1.316
Septiembre	30	11.216	739.000	5,19	1296,3	777.750	23332,5	105,2%	1.337
Octubre	31	11.590	739.000	4,95	1238,3	742.950	23031,5	100,5%	1.320
Noviembre	30	11.216	739.000	5,26	1316,0	789.600	23688,0	106,8%	1.358
Diciembre	31	11.590	739.000	5,07	1268,5	761.100	23594,1	103,0%	1.352
<b>PROMEDIO</b>				<b>4,92</b>	<b>1229,9</b>	<b>737.938</b>	<b>269361,9</b>	<b>99,9%</b>	<b>15.440</b>

Figura 6. Diagrama unifilar del circuito fotovoltaico



#### 4.1.2. Muro cortina fotovoltaico

Se plantea como una posibilidad de integración fotovoltaica al edificio. Se debe considerar que los módulos colocados en fachadas tienen una menor producción de energía con respecto a los colocados en techos, ya que los rayos solares tienen un ángulo de incidencia más restringido. La ventaja es que quedan visibles al usuario y de acuerdo

a sus características técnicas pueden servir para el control de la iluminación, mejorando el confort térmico dentro del edificio.

En contraposición a una instalación fotovoltaica convencional en donde prima el producto financiero, la Arquitectura Solar o BIPV Building Integrated Photovoltaics difiere en el propósito con el que son concebidas; por encima del rendimiento económico están otros valores como la innovación, la integración con el entorno, la estética y la calidad del diseño. [Tabla 7]

**Tabla 7. Características técnicas del vidrio fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.**

Panel FV	Monocristalino – SI-ESF-M-BIPV-SM-M125-96
Color de celda	Azul oscuro
Tipo de vidrio	Vidrio templado transparente
Encapsulante	Etil vinil acetato EVA
Número de celdas	96 unidades por módulo
Voltaje	49,54 Voltios
Intensidad	5,55 Amperios
Voltaje del circuito	24 voltios
Potencia del panel	275 Wp
Costo EE	0,1133 USD\$/kWh

Del análisis de sombras sobre el edificio, se determinó que la superficie vidriada en fachadas, alcanza el 80% de superficie libre de sombra en periodos de tiempos determinados. El muro cortina de vidrio fotovoltaico, reemplaza el vidrio convencional ubicado en las fachadas sur, este y oeste en la planta alta del teatro.

Para el dimensionamiento de la instalación, se aplica la misma teoría del método simplificado, basado en el número de horas de sol pico o equivalentes. Sin embargo, la ubicación geográfica del proyecto en la Latitud 3°, implica que los paneles no reciban radiación directa, por lo que para efectos de cálculo se toma como referencia los datos de radiación difusa incidente sobre un plano horizontal. [Tabla 8]

**Tabla 8. Radiación difusa sobre una superficie horizontal en la coordenada 3°59'12,23" de latitud Sur y 79°11'56,20". Fuente: NASA**

Mes	Días/mes	Radiación difusa/Horas solar equivalente Hse
-----	----------	--

		<b>Horas/días</b>
Enero	31	2,23
Febrero	28	2,33
Marzo	31	2,31
Abril	30	2,13
Mayo	31	1,92
Junio	30	1,79
Julio	31	1,83
Agosto	31	2,00
Septiembre	30	2,20
Octubre	31	2,31
Noviembre	30	2,19
Diciembre	31	2,16
<b>PROMEDIO</b>	<b>365</b>	<b>2,12</b>

El dimensionamiento del sistema se genera a partir del área útil disponible para la colocación de paneles, considerando 476 módulos de 96 celdas fotovoltaicas que genera una potencia instalada de 130.900 W. Sin embargo, el promedio del factor de servicio alcanza el 37,5% en función de la energía producida por la instalación y la demanda energética; considerando un promedio de 2,12kWh/m<sup>2</sup>día de radiación difusa. [Tabla 9]

**Tabla 9. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico a partir del método simplificado, con un promedio de 2,12kWh/m<sup>2</sup>día. Fuente: Elaboración propia.**

	Demanda Teórica de Energía		Demanda Energía W h/día	Radiación difusa / Hora solar equiv Hse horas/día	Energía producida por panel W h/día	Energía producida por instalación W h/día	Energía producida por instalación kW h/mes	Factor de servicio	Ahorro mensual \$/mes
	Dias/mes	KW h/mes							
Enero	31	11.590	739.000	2,23	613,3	291.907	9049,1	39,5%	519
Febrero	28	10.468	739.000	2,33	640,8	304.997	8539,9	41,3%	490
Marzo	31	11.590	739.000	2,31	635,3	302.379	9373,7	40,9%	537
Abril	30	11.216	739.000	2,13	585,8	278.817	8364,5	37,7%	479
Mayo	31	11.590	739.000	1,92	528,0	251.328	7791,2	34,0%	447
Junio	30	11.216	739.000	1,79	492,3	234.311	7029,3	31,7%	403
Julio	31	11.590	739.000	1,83	503,3	239.547	7426,0	32,4%	426
Agosto	31	11.590	739.000	2,00	550,0	261.800	8115,8	35,4%	465
Septiembre	30	11.216	739.000	2,20	605,0	287.980	8639,4	39,0%	495
Octubre	31	11.590	739.000	2,31	635,3	302.379	9373,7	40,9%	537
Noviembre	30	11.216	739.000	2,19	602,3	286.671	8600,1	38,8%	493
Diciembre	31	11.590	739.000	2,16	594,0	282.744	8765,1	38,3%	502
<b>PROMEDIO</b>				<b>2,12</b>	<b>582,1</b>	<b>277.072</b>	<b>101067,9</b>	<b>37,5%</b>	<b>5.793</b>

## 4.2. Del análisis térmico

### 4.2.1. Cubierta solar térmica

El actual proyecto cubre la demanda de agua caliente sanitaria, a partir del uso de calefones eléctricos instalados en cada uno de los recintos en donde se dotará del servicio. En el Ecuador las horas día son constantes durante todo el año y no existen cambios bruscos de clima marcados por estaciones y la cubierta del teatro permanece libre de sombra durante todo el día. Con colectores solares se puede ahorrar más del 70% de energía respecto a los convencionales.

La demanda real de agua caliente, corresponde a 2590 litros de agua diarios. El agua proveniente de la red fluctúa entre los 15 y 16°C dependiendo del mes en que se mida; para este caso se toma como referencia 15°C y 60°C como temperatura de salida para lograr una producción suficiente de agua caliente almacenada para cuando se requiera. Para calentar dicho volumen de agua, el consumo de energía es 44.326,00 kWh/año, generando una inversión de USD \$5.022,60 anuales. Para el dimensionamiento de la instalación solar térmica, se aplica el método de las curvas f (F-Chart). Se utilizan datos mensuales meteorológicos y es válido para determinar el rendimiento o factor de cobertura solar en instalaciones de calentamiento, en todo tipo de edificios mediante captadores solares planos.

La ecuación utilizada para este método se expresa con la siguiente fórmula:

$$f = 1,029.Y - 0,065.X - 0,245.Y^2 + 0,0018.X^2 + 0.021.Y^3 \quad (7)$$

Donde:

*f: Porcentaje de aporte de calor mensual*

*X: Factor adimensional que relaciona las pérdidas de energía del captador y la demanda de energía total durante un mes.*

*Y: Factor adimensional que relaciona la energía absorbida por la placa del captador plano y la demanda de energía total de un mes.*

Los factores adimensionales X e Y se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$X = \frac{F_R U_L}{1000} \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot (100 - T_a) \cdot 24 \cdot N \cdot \frac{A_c}{Q_T} \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (8)$$

Donde:

$(F_R U_L)$ : Coeficiente global de pérdidas del colector  $\left(\frac{w}{m^2 K}\right)$

$\frac{F'_R}{F_R}$ : Factor de corrección del conjunto captador

– intercambiador, valor recomendado 0,95.

$T_a$ : Temperatura promedio mensual del ambiente ( $^{\circ}C$ )

$A_c$ : Área total de los colectores ( $m^2$ )

$Q_T$ : Demanda energética mensual  $\left[\frac{kWh}{mes}\right]$

$N$ : Número de días del mes  $\left[\frac{días}{mes}\right]$

100: Temperatura de referencia ( $^{\circ}C$ )

$K_1$ : Factor de corrección por almacenamiento

$K_2$ : Factor de corrección para A. C. S. que relaciona la temperatura del

A. C. S. del agua de la red y la media mensual del ambiente.

Con,

$$K_1 = \left[ \frac{V}{\frac{A_c}{75}} \right]^{-0,25}$$

Y

(9)

(10)

$$K_2 = \left[ \frac{(11,6 + 1,18 \cdot T_{ACS} + 3,86 \cdot T_{red} - 2,32T_a)}{(100 - T_a)} \right]$$

Donde:

$V$ : Volumen de agua de acumulación en litros (l)

$A_c$ : Área total de los colectores ( $m^2$ )

$T_{ACS}$ : Temperatura del A. C. S ( $^{\circ}C$ )

$T_{re}$ : Temperatura del agua de la red ( $^{\circ}C$ )

El coeficiente  $Y$ , se determina por la expresión:

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n \cdot \left( \frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot \left[ \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right] \cdot H_T \cdot \frac{A_c}{Q_T} \quad (11)$$

Donde:

$F_R(\tau\alpha)_n$ : Rendimiento óptico del colector

$\left[ \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right]$ : Modificador del ángulo de incidencia.

$H_T$ : Radiación media mensual sobre superficie del colector  $\left[ \frac{kWh}{m^2mes} \right]$

Las ecuaciones anteriores son válidas entre los siguientes valores límites:

$$0 < Y < 3, \quad 0 < X < 10 \text{ y } 37.5 < \quad (V/A_c) < 300$$

El cálculo de la cobertura mensual, está dado por:

$$Q_u = f \cdot Q_T \quad (12)$$

Donde:

$Q_T$  es la carga calórica mensual

Finalmente, la cobertura anual se determina a través de la expresión:

$$f_{\text{año}} = \frac{\sum Q_{u \text{ mensual}}}{\sum Q_{T \text{ mensual}}} \quad (13)$$

El sistema de colectores solares planos, se instala en la zona plana de la cubierta del edificio, considerando las determinantes del diseño. [Tabla 10].

**Tabla 10. Factores determinantes de diseño solar térmico con colectores solares planos.**  
Fuente: Elaboración propia.

Temperatura entrada de agua al colector	°C	15,00
Temperatura salida de agua al colector	°C	60,00
Superficie del colector	m <sup>2</sup>	2,17
Número de colectores	unidades	50
Superficie colectora solar	m <sup>2</sup>	108,50
Capacidad de estanque acumulación	lt/ m <sup>2</sup>	20,90
Volumen estanque	m <sup>3</sup>	8,62

El rendimiento se determina en función de la diferencia de temperatura entre la temperatura media del colector y la temperatura exterior, la radiación solar y dos coeficientes de pérdida  $a_1$  y  $a_2$  expresada en la siguiente ecuación:

$$n = n_0 a_1 \frac{(t_f - t_a)}{I_{ns}} - a_2 \frac{(t_f - t_a)^2}{I_{ns}} \quad (14)$$

Donde:

$n_0$ : 69,6% Rendimiento teórico del colector

$a_1$ : 4,821% Coeficiente de pérdida lineal

$a_2$ : 0,015% Coeficiente de pérdida lineal

$t_f$ : temperatura entrada

$t_a$ : temperatura salida

$I_{ns}$ : radiación solar global en  $W/m^2$

El rendimiento real del colector solar Chromagen Modelo QR-E, alcanza un promedio anual de 50,6%. [Tabla 11].

**Tabla 11. Rendimiento real del colector solar Chromagen Modelo QR-E. Fuente: Elaboración propia.**

Mes	Rendimiento colector %
Enero	49,8
Febrero	49,5
Marzo	51,4
Abril	50,8
Mayo	49,8
Junio	49,4
Julio	49,2
Agosto	50,8
Septiembre	52,4
Octubre	51,5
Noviembre	51,9
Diciembre	50,8
<b>PROMEDIO</b>	<b>50,6</b>

De acuerdo a los objetivos planteados, para satisfacer la demanda de agua sanitaria en el edificio, con la instalación de 39 colectores solares planos Chromagen, se cubre la demanda en el 95,8%; lo que significa un ahorro anual de USD\$ 4810,00. [Tabla 12].

**Tabla 12. Evaluación de la capacidad de suministro de energía mediante colectores solares térmicos.**

mes	Radiación útil	Consumo Total Energía	Costo total Energía	Carta- F	Aporte solar	Aporte combustible	Costo consumo	Ahorro
	mensual	A.C.S.	A.C.S		mensual	mensual	gas	mensual
	kW h/m2 mes	kW-h/mes	US\$/mes	f	kW-h/mes	kW-h/mes	US\$/mes	US\$/mes
Enero	86,95	3.769,0	427,0	94,8%	3.574,5	194,5	22,0	405,0
Febrero	77,78	3.436,5	389,4	94,2%	3.237,4	199,1	22,6	366,8
Marzo	94,72	3.795,7	430,1	98,8%	3.750,6	45,2	5,1	424,9
Abril	85,56	3.638,8	412,3	95,5%	3.475,5	163,4	18,5	393,8
Mayo	83,45	3.769,0	427,0	92,6%	3.488,9	280,1	31,7	395,3
Junio	79,14	3.690,5	418,1	91,4%	3.374,3	316,2	35,8	382,3
Julio	82,99	3.822,5	433,1	92,2%	3.522,6	299,8	34,0	399,1
Agosto	89,56	3.760,1	426,0	96,1%	3.613,7	146,4	16,6	409,4
Septiembre	92,39	3.571,1	404,6	99,4%	3.549,4	21,7	2,5	402,1
Octubre	90,32	3.690,1	418,1	96,8%	3.573,5	116,7	13,2	404,9
Noviembre	93,36	3.622,8	410,5	99,9%	3.619,2	3,6	0,4	410,1
Diciembre	92,10	3.760,1	426,0	97,7%	3.674,4	85,7	9,7	416,3
<b>PROMEDIO</b>	<b>1048,32</b>	<b>44.326,3</b>	<b>5.022,2</b>	<b>95,8%</b>	<b>42.453,9</b>	<b>1.872,4</b>	<b>212,1</b>	<b>4.810,0</b>

## 5. Conclusiones:

- El proyecto solar térmico, satisface el 95,8% de la demanda de agua caliente sanitaria con un apoyo mínimo de combustible. El periodo de amortización es de 17,06 años, generando un ahorro de USD\$4810,00 anuales con un aporte solar anual de 42453,90kWh/año. Se determina como la estrategia más factible técnica y económicamente inclusive porque el costo inicial de inversión corresponde a un 0,51% de la inversión para la construcción total del proyecto.
- Los sistemas fotovoltaicos sobrepuestos en cubierta, se desarrollan de forma óptima técnicamente ya que las horas de sol equivalente son constantes durante el año, generándose en promedio 4,92 horas/día. Se puede instalar con el 3,79%, de la inversión en la construcción, amortizando el costo a 39,9 años; generando un ahorro anual de USD\$15439,69. Se puede considerar que es factible económicamente a largo plazo, ya que el periodo de amortización se encuentra dentro del rango de vida útil de los paneles solares que es mayor a 30 años.
- Para el muro cortina fotovoltaico, se concluye que no existe radiación directa sobre el plano vertical, vidrio fotovoltaico a 90°; debido a que los rayos de sol inciden en ángulos cercanos a 0°; por lo tanto, se dimensiona el sistema considerando los valores de radiación difusa, que en promedio anual, corresponde a 2,12 kWh/m<sup>2</sup>día. Esta estrategia se considera no factible técnica y económicamente pues la recuperación del capital finaliza a los 76,70 años fuera del rango de vida útil del sistema.
- La selección de estrategias planteadas en el proyecto, están directamente ligadas al aprovechamiento del recurso solar como fuente inagotable de energía y que en el Ecuador escasamente están integradas en el funcionamiento de los edificios.
- La ubicación geográfica del Ecuador genera una de las mayores ventajas en el sentido de aprovechamiento de las energías renovables ya que la radiación solar incide sobre la superficie del territorio nacional prácticamente de forma perpendicular, produciendo que los ángulos de exposición sean pequeños, bordeando los 0 y 3°. Adicionalmente en el Ecuador, no existe una marcada diferencia entre estaciones produciéndose una constante en la cantidad de horas del sol, que fluctúa entre 11.9 y 12.3 horas día durante todo el año.

- Para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos con base al método simplificado de horas de sol equivalente se comprueba que la radiación promedio sobre una superficie inclinada en la latitud  $-3^{\circ}$  es  $4,920 \text{ kWh/m}^2\text{día}$ .
- Dimensionar los sistemas fotovoltaicos, requiere un conocimiento previo de la demanda energética real del teatro; para ello se considera cubrir la demanda del edificio en iluminación arquitectónica y climatización, cuyo valor asciende a  $739.000,00 \text{ Wh/día}$ , considerando 80 horas de operación mensual, factor de seguridad del 10% y un coeficiente de pérdidas de carga correspondiente a 0,56. Se desestima la demanda energética de sistemas escénicos y otros sistemas especiales, por considerarse sensibles y requerir suministro de energía continuo y estable lo que el sistema fotovoltaico no garantiza por tiempos prolongados a 3 horas.
- El Ecuador es un país en vías de desarrollo y se han implementado algunas políticas subsidiarias hacia el tema de la energía eléctrica, con el objetivo de incentivar la producción mecánica y darles valor agregado a los productos primarios, por lo tanto, el costo de la energía eléctrica por kW/h es uno de los más bajos de la región sur del continente. Esto puede representar una desventaja para incentivar el uso de alternativas energéticas renovables; y como consecuencia, un desconocimiento de las ventajas potenciales de la ubicación geográfica del país.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Zalamea León, E. and R. García Alvarado (2014). "Diseño arquitectónico integrado de sistemas solares térmicos en techumbres de viviendas." *Arquitectura y Urbanismo* 35(3): 18-36.
2. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (2014). "Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano." Quito, Ecuador: 156.
3. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (2015). "Balance Energético Nacional 2015 parte1". Quito Ecuador: 97
4. CITECUBB (2012). "Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios Públicos Parte1". Santiago, Chile: 112.

5. d'Amico, F. C. (2014). "Arquitectura bioclimática, conceptos básicos y panorama actual." Boletín CF+ S(14).
6. Mena, V. G. (2014). "Metodología de evaluación de confort térmico exterior para diferentes pisos climáticos en Ecuador." En: 12° Congreso Nacional del Medio Ambiente: 24 al 27 de noviembre de 2014, Madrid. Palacio Municipal de Congresos de Madrid. España.pp.sp.
7. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2007). "Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Loja". Loja, Ecuador: 191.
8. Evans J. and de Shiller S. (2013). "Promoción de Eficiencia Energética y Uso de Energía Solar en vivienda del Ecuador". En Primer Congreso Internacional y Expo Científica: 28 de Noviembre al 01 de Diciembre de 2013, Quito. Palacio de Cristal del Parque Itchimbía. Ecuador. pp.sp.
9. Ganem C. and Esteves A. (2004). "La integración fotovoltaica en la rehabilitación ambiental edilicia." Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 8, N°1: 05.79-05-84
10. Sancha J. Conceptos de ahorro y Eficiencia Energética: Evolución y oportunidades. España, 2010. pp. 46-53.
11. Gerwer Ghelfgot K (2014). " Evaluación económica de la eficiencia energética. Caso de Estudio: Sistemas Constructivos para vivienda de interés social en Montevideo - Uruguay." Hábitat Sustentable. 4(2): 26-43.
12. Hernández J. , De Celis B., Valerdi M., Sosa J. (2012). "Integración de sistemas de energía solar Hanco O., Álvarez R., Montoya A., Palo E., Vizcardo M., "Diseño, construcción y evaluación de un sistema solar híbrido fotovoltaico/ térmico para aumentar la eficiencia de un panel solar." (2010). Universidad Nacional de San Agustín. 8pp
13. Asamblea General de las Naciones Unidas. (70/1, 2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Nueva York. Estados Unidos. 40 pp.
14. NTE INEN 2506. Eficiencia Energética en Edificios. Quito, Ecuador, 2009-05-13, pp11.
15. NTE INEN 2507. Rendimiento térmico de colectores solares en sistemas de calentamiento de agua para uso sanitario. Requisitos. Quito, Ecuador, 2009 -10-13, pp13.
16. APUNTES Módulo Edificios Sustentables – MHSEE, Universidad del Bio Bio, Enero, 2015.