



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura  
Maestría en Arquitectura. Campo de conocimiento Tecnología

## **Interacción de envoltentes con vidrio fotovoltaico**

TESIS

Que para optar por el grado de Maestro en Arquitectura

Presenta:

Arq. Oscar Guadalupe Morales Nieto

Tutor:

M. en Arq. Antonio Bautista Kuri - Facultad de Arquitectura

Comité tutor:

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez - Facultad de Arquitectura

Dr. en Arq. José Luis Bermúdez Alcocer - Facultad de Arquitectura

M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos - Facultad de Arquitectura

M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz - Facultad de Arquitectura

Ciudad Universitaria, CD. MX., enero 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura  
Maestría en Arquitectura. Campo de conocimiento Tecnología

## **Interacción de envoltentes con vidrio fotovoltaico**

TESIS

Que para optar por el grado de Maestro en Arquitectura

Presenta:

Arq. Oscar Guadalupe Morales Nieto

Tutor:

M. en Arq. Antonio Bautista Kuri - Facultad de Arquitectura

Comité tutor:

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez - Facultad de Arquitectura

Dr. en Arq. José Luis Bermúdez Alcocer - Facultad de Arquitectura

M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos - Facultad de Arquitectura

M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz - Facultad de Arquitectura

Ciudad Universitaria, CD. MX., enero 2108

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura**

**Interacción de envolventes con vidrio fotovoltaico**

**Tesis que para optar por el grado de Maestro en Arquitectura presenta:**

**Arq. Oscar Guadalupe Morales Nieto**



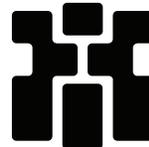
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura  
Campo de Conocimiento Tecnología

Interacción de envolventes con vidrio fotovoltaico

Tesis que para optar por el grado de Maestro en Arquitectura presenta:  
Arq. Oscar Guadalupe Morales Nieto

UNAM / MÉXICO / 2018

**UNAM**  
**POSGRADO**



INSTITUTO  
DE INVESTIGACIONES  
HISTÓRICAS



Jurado:

Director de Tesis:

M. en Arq. Antonio Bautista Kuri

Comité tutor:

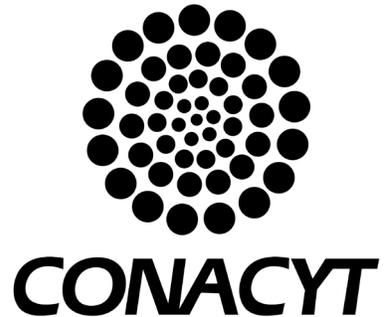
M. en Arq. Francisco Reyna Gómez  
Dr. en Arq. José Luis Bermúdez Alcocer  
M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos  
M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz

## Agradecimientos:

Al M. en Arq. Antonio Bautista Kuri por su dedicación y tiempo a lo largo de la tesis.

A la UNAM y sus profesores que compartieron sus conocimientos y expandieron mi visión.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado.



## Dedicatorias.

A mis padres por ser la base de mi educación, alentarme en cada momento y por ser las personas que deseo imitar.

---

# ÍNDICE

---

A. Introducción.....	1
B. Objetivo / Hipótesis.....	5
1. Energía Solar.....	9
1.1 Uso de la energía en México.....	13
2. Energía Fotovoltaica.....	17
2.1 Tipos de paneles fotovoltaicos.....	20
2.1.1 Paneles de silicio monocristalino.....	21
2.1.2 Paneles de silicio policristalino.....	22
2.1.3 Paneles de capa fina de silicio amorfo.....	23
2.2 Integración de paneles fotovoltaicos en arquitectura.....	23
2.2.1 BAPV: Building Applied Photovoltaics.....	24
2.2.2 BIPV: Building Integrated Photovoltaics.....	25
3. Programas fotovoltaicos en el Mundo y México.....	31
4. Reformas y leyes en México para la energía sustentable.....	35
4.1 Reforma Energética.....	37
4.2 Certificado de Energías Limpias.....	38
4.3 Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables 2014-2018.....	38
4.4 Programa de Certificación de Edificios Sustentables (PCES) para la CDMX.....	40

5. Investigaciones en sistemas fotovoltaicos .....	41
6. Análisis del Centro de Ciencias de la Complejidad .....	47
7. Análisis de vidrio fotovoltaico con transparencia de 10%, 20% y sin transparencia	59
7.1 Método	61
7.2 Resultados Voltaje	66
7.3 Resultados Temperatura	70
7.4 Resultados Iluminación .....	74
8. Conclusiones y Prospectiva .....	78
9. Referencias .....	82

---

# ILUSTRACIÓN, GRÁFICAS Y TABLAS

---

Ilustración 1. Radiación Global 2015.	12
Ilustración 2. Partes de un panel fotovoltaico.	21
Ilustración 3. Tipos de paneles fotovoltaicos.	22
Ilustración 4. Ejemplo de clasificación BAPV.	26
Ilustración 5. Ejemplo de sistemas BIPV.	26
Ilustración 6. Localización del Centro de Ciencias de la Complejidad C3.	50
Ilustración 7. Modelo del C3 realizado en el software Revit.	50
Ilustración 8. Análisis solar del C3 realizado en el software Revit.	51
Ilustración 9. Medición de temperatura de un panel fotovoltaico .	52
Ilustración 10. Fotos de la cámara termográfica 4/Mayo/2016.	54
Ilustración 11. Estudio de sombras 4/Mayo/2016.	55
Ilustración 12. Sombras 4/Mayo/2016.	55
Ilustración 13. Estudio de sombras 2/Mayo/2016	56
Ilustración 14. Superior, estudio de sombras 1/Noviembre/2016 15:00 Hrs.	57
Inferior, estudio de sombras 1/Noviembre/2016 17:00 Hrs.	
Ilustración 15. Superior, estudio de sombras 1/Diciembre/2016 15:00 Hrs.	57
Inferior, estudio de sombras 1/Diciembre/2016 17:00 Hrs.	
Ilustración16. Superior, estudio de sombras 1/Enero/2017 15:00 Hrs.	58
Inferior, estudio de sombras 1/Diciembre/2017 17:00 Hrs.	
Ilustración 17. Superior, estudio de sombras 1/Febrero/2017 15:00 Hrs.	58
Inferior, estudio de sombras 1/Febrero/2017 17:00 Hrs	
Ilustración 18. Localización de módulo experimental en la Unidad de Posgrado	62
Ilustración 19. Instalación paneles fotovoltaicos	64
Ilustración 20. Registro de datos	65

Ilustración 21. Izquierda, medición de irradiación en fachada sur Centro y derecha, medición al interior del vidrio sin transparencia	74
Ilustración 22. Izquierda, irradiación de vidrio con 20% Derecha, irradiación de vidrio con 10% de transparencia	74
Ilustración 23. Ubicación de oficinas	75
Ilustración 24. Análisis de iluminación en oficinas 1,2,3 y 4	76
Ilustración 25. Análisis de iluminación en oficinas 1,2,3 y 4 con doble fachada	77
Gráfica 1. Producción de energía en México 2015.	14
Gráfica 2. Consumo final energético por sector 2015.	14
Gráfica 3. Consumo energético sector Residencial, comercial y público 2015.	15
Gráfica 4. Consumo energético sector Transporte 2015.	15
Gráfica 5. Consumo energético sector Industrial 2015	15
Gráfica 6. Consumo energético sector Agropecuario 2015.	15
Gráfica 7. Medición de temperatura en panel fotovoltaico 04-Mayo-2016	53
Gráfica 8. Voltaje en vidrio fotovoltaico de 10% de transparencia.	66
Gráfica 9. Voltaje en vidrio fotovoltaico de 20% de transparencia	67
Gráfica 10. Voltaje en vidrio fotovoltaico sin transparencia.	68
Gráfica 11. Voltaje en vidrio de 0%, 10% y 20% de transparencia.	69
Gráfica 12. Temperatura en paneles fotovoltaicos fachada Sur.	72
Gráfica 13. Temperatura en paneles fotovoltaicos fachada Oeste.	73
Tabla 1. Participación de la Capacidad total instalada para satisfacer la demanda del servicio público a partir de Energías Renovables 2008-2012.	39
Tabla 2. Voltajes maximos en todas las orientaciones	71
Tabla 3. Características de las oficinas	75

A



---

# A. INTRODUCCIÓN

---

La creciente demanda de energía y los efectos dañinos en el ambiente del combustible fósil, con el que actualmente se produce más del 80% de la energía eléctrica en México, han provocado la búsqueda de energías alternativas, entre ellas la renovable (SENER Secretaría de Energía, 2014). En esta investigación se abordará el uso de energía solar mediante materiales para envolventes hechos de tecnología fotovoltaica.

En arquitectura existen dos maneras de utilizar la energía solar, mediante una forma pasiva y activa. La forma pasiva es el correcto diseño mediante la orientación, condiciones ambientales del lugar con la combinación de las propiedades térmicas de los materiales, esto produce condiciones confortables en algunas estaciones del año y reduce el uso de climatización. La forma activa es mediante el uso de tecnologías y materiales emergentes que ayudan a la producción de energía térmica o eléctrica. En estos casos la energía producida en el lugar puede ser almacenada o inmediatamente utilizada para abastecer necesidades específicas del edificio.

En México el uso de sistemas fotovoltaicos es principalmente usado para llevar energía eléctrica a comunidades rurales, en donde se complica o es imposible el acceso a la infraestructura (Islas Samperio, y otros, 2016). En los países en donde se han estudiado las características de estos elementos fotovoltaicos han llevado a un cambio en el proceso del diseño arquitectónico, pensando en estos materiales desde la concepción del edificio, teniendo una integración con la envolvente.

Los desarrollos BIPV (Building Integrated Photovoltaics) son una mezcla de arquitectura pasiva y activa, desde la generación de energía por medio de tecnología en materiales hasta la reducción de aire acondicionado por medio de recursos naturales y diseño de espacios por orientación. La sustentabilidad en diseños de edificios modernos es una necesidad que busca disminuir el gasto energético, así como el aprovechamiento de los recursos naturales (por ejemplo, la luz solar en esta investigación). Estas dos maneras deben de estar interactuando de tal manera que el beneficio sea el confort para el usuario y el ahorro energético en el edificio.

Un sistema derivado de los BIPV son los STPV (Semi-Transparent Photovoltaic), usado principalmente en fachadas, es un material traslucido que genera su energía a través de los rayos solares, tiene diferentes porcentajes de transparencia por lo que permite el paso de iluminación.

Se han realizado diversos estudios sobre el comportamiento de los sistemas BIPV y STPV, como es el caso de los estudios publicados en la revista Solar Energy, realizados por los investigadores Kapsis & Athienitis (2015) en la Universidad de Concordia en Canadá y los investigadores Olivieri, y otros, (2015) en la Universidad Politécnica de Madrid. A pesar de que usaron métodos similares los resultados en generación de energía fueron totalmente diferentes, esto se debió a la irradiación de su localización geográfica.

Actualmente existe una falta de conocimiento sobre soluciones con sistemas STPV aplicados a la Ciudad de México ya que no se cuenta con un estudio. Una mala integración de estos materiales a la envolvente arquitectónica puede ocasionar problemas térmicos, de iluminación y de producción de energía.

El estudio se apoya en los requerimientos que pide la Estrategia Nacional de Cambio Climático y los incentivos fiscales ligados a acciones ambientales que tiene la Secretaría del Medio Ambiente en la Ciudad de México a través del Programa de Certificación de Edificios Sustentables (PCES). El resultado de esta investigación son criterios de diseño a partir del comportamiento de materiales STPV en diferentes orientaciones, principalmente con las variables de temperatura, voltaje e iluminación. Cada proyecto necesita un estudio a detalle del comportamiento y la interacción que tienen estos elementos con el edificio.

B



---

# **B.OBJETIVO / HIPÓTESIS**

---

## Objetivo General.

Crear la vinculación de una envolvente con paneles solares transparentes con el interior de un edificio tomando en cuenta la generación de energía eléctrica, aislamiento térmico y aprovechamiento de la iluminación natural en la Ciudad de México.

## Objetivos Particulares.

- 1) Calcular la producción energética de los vidrios solares transparentes en planos verticales, principalmente en las orientaciones sur, este y oeste en la Ciudad de México.
- 2) Comparar las propiedades de aislamiento térmico e iluminación natural de los vidrios solares transparentes con 0%, 10% y 20% de transparencia.
- 3) Evaluar la viabilidad económica de la envolvente tomando en cuenta los programas en la CDMX que incentivan la producción de energía sustentable.

## Hipótesis.

Si se descomponen las variables de un sistema fotovoltaico tomando en cuenta la parte eléctrica, lumínica, térmica y se realizan las mediciones en diferentes orientaciones entonces se podrá determinar la plástica en la que funcionan estos elementos y se obtendrán patrones de diseño para crear envolventes energéticas en la CDMX.



1



---

# 1. ENERGÍA SOLAR

---

La energía solar es un recurso que se ha aprovechado desde la antigüedad, principalmente en una arquitectura pasiva la cual utiliza el calor y la iluminación como principal fuente de energía.

Actualmente, con el desarrollo de materiales, se puede cambiar este enfoque y utilizar la radiación como un medio de producción de energía renovable. Los dos principales usos que se le está dando a esta energía son la térmica y la eléctrica (RENAC renewables academy, 2016).

Para determinar si en un sitio es factible instalar este tipo de materiales es necesario conocer las características ambientales, especialmente la radiación que llega a ese lugar. La radiación solar se descompone en tres tipos los cuales son (Estrada Gasca, Arancibia Bulnes, Dorantes Rodríguez, Islas Samperio, & Muhlia Velazquez, 2005):

- Radiación Directa. Es el tipo de radiación que llega a la superficie terrestre sin que sufra un cambio de dirección y ningún obstáculo en su camino.
- Radiación Difusa. Este tipo de radiación al momento de atravesar la atmósfera es absorbida y reflejada por las nubes, aunque también puede ser por partículas suspendidas en la atmósfera.
- Radiación Reflejada. Es la reflejada de la superficie terrestre, en este caso incide en planos verticales y no en horizontales.

A la suma de la radiación directa y difusa se le llama radiación solar global. La radiación es expresada usualmente en términos de irradiancia, la cual se expresa como la energía entre área y su unidad es del watt por metro cuadrado  $W/m^2$ . Los datos de radiación también pueden estar disponibles por la frecuencia de exposición, en totales acumulados o periodos de tiempo. Para este caso las unidades serían  $KWh/m^2$  (Estrada Gasca, Arancibia Bulnes, Dorantes Rodríguez, Islas Samperio, & Muhlia Velazquez, 2005).

Para poder aprovechar la energía solar se necesita saber cuál es la distribución temporal de la irradiancia en superficie, es decir, como está llegando esta energía. “En tan sólo una hora, el Sol transmite más energía a la Tierra que la que es consumida en un año. Esta es la razón por la que la energía solar será uno de los principales pilares para la producción de energía en el futuro.” (RENAC renewables academy, 2016).

En la ilustración 1 se muestra el mapa de la radiación solar indicado en  $kWh/m^2$  considerando valores promedios anuales. Estas mediciones fueron tomadas en planos verticales y da un acercamiento de evaluar las posibilidades de instalar sistemas de energía solar.

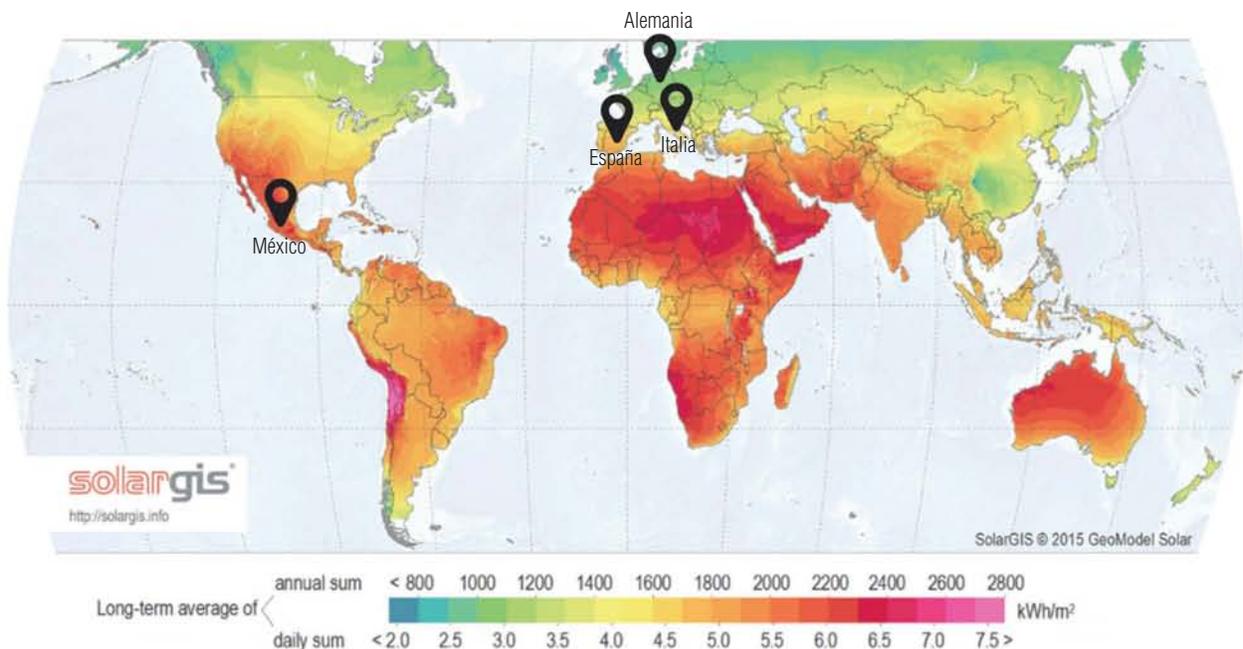


Ilustración 1. Irradiación Global 2015  
Imagen tomada del sitio: <http://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-World-GHI-solar-resource-map-en.png>

Este mapa también nos sirve para hacer una comparación de la irradiación con la que cuenta cada país, poder comparar y saber el potencial que se tiene sobre otros países. A continuación, se enlistarán los tres primeros países con mayor generación de energía solar y la posición en la que se encuentra México, los datos se obtuvieron de la Energy Information Administration (EIA) del año 2012.

- Alemania / 26.38 Billones de Kilowatts
- Italia / 18.86 Billones de Kilowatts
- España / 11.96 Billones de Kilowatts
- México / 0.06 Billones de Kilowatts

Conforme la ilustración 1, México tiene mayor radiación que los países con mayor producción de energía, pero su producción de energía solar es baja en su comparación.

“México, por su ubicación geográfica y sus características climatológicas, está dentro de la denominada franja solar donde el recurso solar es el más alto del planeta. De acuerdo a información oficial de NASA, 2012, en promedio el territorio nacional ofrece una insolación de 5.56 kWh/m<sup>2</sup> por día, con promedios máximos de 6 kWh/m<sup>2</sup> por día en los estados de Jalisco y San Luis Potosí y promedios mínimos de 4.94 y 5.04 kWh/m<sup>2</sup> por día para los estados de Tabasco e Hidalgo, respectivamente. Por su parte, veinte son los estados con insolación promedio mayor a 5.5 kWh/m<sup>2</sup> por día, lo que representa un potencial energético importante y renovable que puede aprovecharse en beneficio del país.” (Islas Samperio, y otros, 2016)

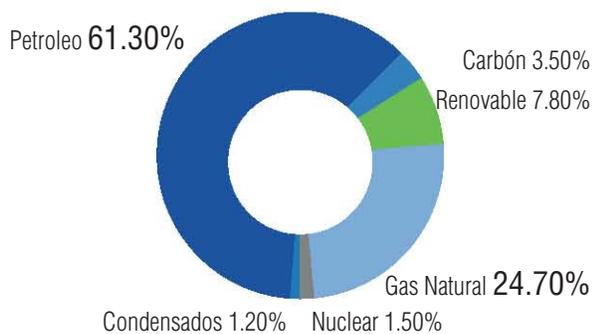
## 1.1 Uso de la energía en México.

El potencial que tiene México para producir energía solar no se está aprovechando y se está utilizando en mayor medida fuentes no renovables como petróleo como principal fuente de energía.

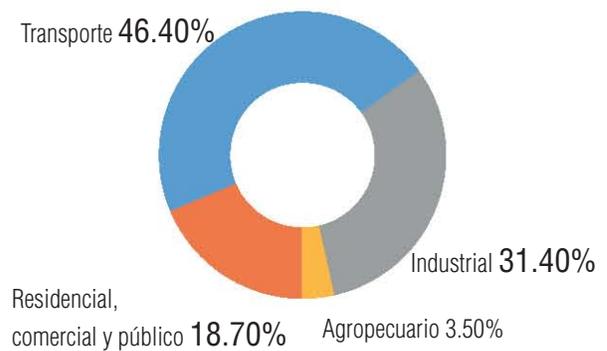
De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2015 en México la energía primaria totalizo 8,261.03 PJ cuya principal fuente de energía fueron los Hidrocarburos con una producción de 7,203.85 PJ lo que significa el 87.20% del total. La energía solar produjo 10.15 PJ lo que significa el 0.12% del total.

En la gráfica 1 se muestra la estructura en que está dividida la energía en la que sobresale el uso de combustibles fósiles. La energía renovable solo abarca el 7.80% y la hidroenergía es la que encabeza la producción renovable con el 1.35% del total.

Para conocer en qué sector se está demandando mayor cantidad de energía es necesario dividirla por sectores, sobretodo el campo que nos incumbe a los arquitectos para así poder contribuir con nuevas formas de producción y tener una eficiencia energética. En la gráfica 2 se muestra esta división en donde el sector de Transporte es quien demanda mayor cantidad de energía, mientras que el sector residencial, comercial y público está en tercera posición.



Gráfica 1. Producción de energía en México 2015

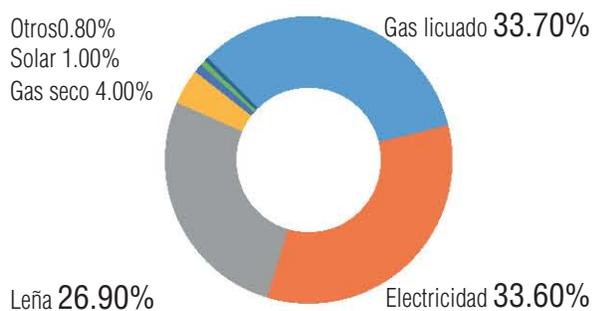


Gráfica 2. Consumo final energético por sector 2015.

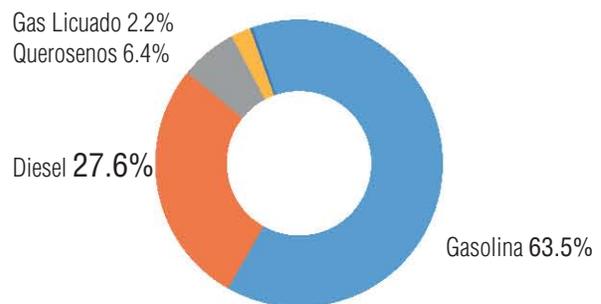
Las gráficas 3,4,5 y 6 son las descomposiciones del consumo de energía por sector, en las cuales se puede apreciar que tipo de energía y recurso es el que se está demandando en mayor cantidad. El principal dato que interesa a esta investigación es el porcentaje de electricidad que se está utilizando para cada sector.

Se podría decir que el gas licuado y la electricidad son los principales energéticos que ocupan en el sector Residencial, comercial y público, ambos tienen un porcentaje muy similar y esta distribución se puede observar en la Gráfica 3.

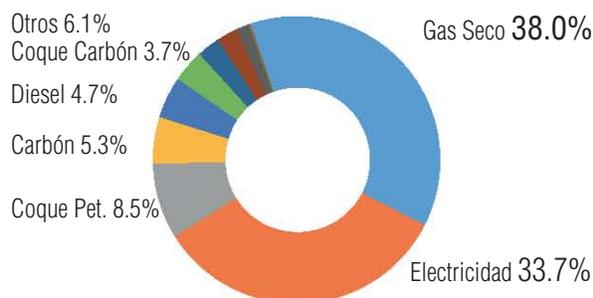
El uso de Gasolinas en el sector Transporte es la principal fuente de contaminación ya que este sector es el que más energía consume. Es importante conocer este dato por la transición que se está llevando en el cambio de uso de gasolinas por electricidad en automóviles particulares. Esta transición hará un cambio en los próximos años en los consumos finales por sector en donde el sector Residencial, comercial y público tendrá un aumento.



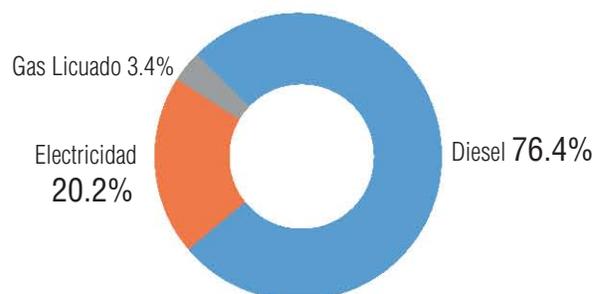
Gráfica 3. Consumo energético sector Residencial, comercial y público 2015.



Gráfica 4. Consumo energético sector Transporte 2015.



Gráfica 5. Consumo energético sector Industrial 2015.



Gráfica 6. Consumo energético sector Agropecuario 2015.

“Para llevar a cabo simulaciones térmicas de instalaciones solares, edificios, etc., lo más conveniente es poder contar con datos de radiación total para cada hora del día (denominada irradiación horaria; MJ/m<sup>2</sup>), ya sea por separado para cada día del año o por promedios sobre los días de un mes.” (Estrada Gasca, Arancibia Bulnes, Dorantes Rodríguez, Islas Samperio, & Muhlia Velazquez, 2005)

El uso de sistemas fotovoltaicos en planos verticales necesita una evaluación del recurso solar, con la cual se podrá conocer la cantidad de energía que puede recibir una envolvente. Esta de preferencia tiene que ser con base en mediciones, aunque también puede tomarse por medio de software. Actualmente el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) opera una red sinóptica de superficie con 79 observatorios meteorológicos.

Para realizar un proyecto de energía solar se requiere información de los recursos energéticos disponibles, determinar en base a consumos de energía las zonas en las que se puede remplazar la energía utilizada por solar, tener información del clima, la ubicación geográfica y el contexto que rodea al edificio. Para el caso de este estudio se requiere adicionalmente la medición de radiación en planos verticales ya que en la mayoría de los mapas con información de radiación solar solo tienen la horizontal.

Como lo menciona el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (2002):

“la tecnología que se utilice para el aprovechamiento de energía, con ciertas condiciones de operación, tiene dos características muy importantes entre tantas otras, una es el umbral de funcionamiento, saber cuál es el mínimo de energía que necesita para comenzar a realizar el proceso para el que fue creado. La segunda es la energía mínima que necesita para alcanzar su máxima eficiencia. Si se conocen ambos valores, y se conoce la distribución energética y temporal de la radiación solar, se sabrá con mucha precisión, y aún antes de comprar cualquier tecnología, cuál será su desempeño.”

2



---

# 2. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

---

La energía renovable se identifica por tener fuentes inagotables, no produce emisiones de CO2 para generar energía y es amigable con el medio ambiente. Dentro de estas energías se encuentra la solar. La transformación de la energía solar se puede aprovechar de dos maneras, la primera es transformando el calor en energía térmica y la segunda transformando la radiación en energía eléctrica (RENAC renewables academy, 2016).

“La utilización de fuentes no renovables para producir energía como el gas, uranio, carbón y petróleo ya no es una alternativa viable para mantener los actuales estilos de vida y sobre todo para disminuir la contaminación que esas fuentes de energía producen. Una de las fuentes de energía renovable con más potencial es sin duda la energía del sol.” (Mundo Hernández, de Celis Alonso, Valerdi Nochebuena, & Sosa Oliver, 2012).

La energía fotovoltaica es precisamente la transformación de la energía solar en electricidad, un tipo de energía renovable. Este tipo de energía inicio con las investigaciones del espectro solar y su relación con el magnetismo y electricidad del físico francés Edmund Bequerel en 1839, sin embargo, los primeros usos que se le dieron fueron para pequeños equipos ya que la capacidad de producción de energía era mínima. En cuanto a su uso, las primeras aplicaciones que se le dio a las células solares fue el de sensores de luz en cámaras fotográficas y se utilizó el cómo semiconductor el Selenio. Posteriormente se reemplazó el Selenio por el Silicio y los principales operadores de estos equipos fueron las naves espaciales iniciando con el satélite Explorer 1 (Escaplés Jover, 2012).

El desarrollo de esta tecnología siguió avanzando y cada vez los equipos eran más eficientes y los costos de su construcción iban disminuyendo lo que motivo a la industria a tener espacios de oportunidad en diferentes sectores, uno de ellos el mercado inmobiliario.

Alemania es uno de los principales países en el uso y desarrollo de esta tecnología por y fueron de los primeros que hicieron prototipos de viviendas con paneles fotovoltaicos como una alternativa al uso de energía producida con petróleo pero sobre todo como solución a la primer crisis petrolera en 1973 (Agredano Díaz, 2016).

La forma en que funciona un sistema fotovoltaico es la siguiente manera: “La luz solar transporta energía en forma de un flujo de fotones, éstos cuando inciden en determinado tipo de materiales bajo ciertas condiciones, provocan una corriente eléctrica. Es lo que se denomina efecto fotovoltaico. Las células solares son pequeños elementos fabricados de un material semiconductor cristalino dopado, es decir, al que han sido adicionados determinados tipos de impurezas.” (Espejo Marín, 2004)

## 2.1 Tipos de Paneles Fotovoltaicos.

Actualmente la mayoría de los paneles fotovoltaicos que se pueden encontrar en el mercado tienen una base en el silicio (Valencia, 2015) y básicamente se pueden identificar por la pureza de este material. Entre más puro sea el material tendrá mayor capacidad de convertir la radiación en energía eléctrica.

Existen dos tipos de paneles fotovoltaicos de silicio que son: el cristalino (monocristalino y policristalino) y silicio amorfo, cada uno de estos elementos tiene sus propias características, ventajas y desventajas (Islas Samperio, y otros, 2016). La propuesta de estos equipos en proyectos arquitectónicos se tiene que evaluar dependiendo las necesidades y propósitos específicos que se quieran cumplir.

Una característica que se debe de tomar en cuenta es el conocimiento de los elementos con los que están contruidos los paneles fotovoltaicos.

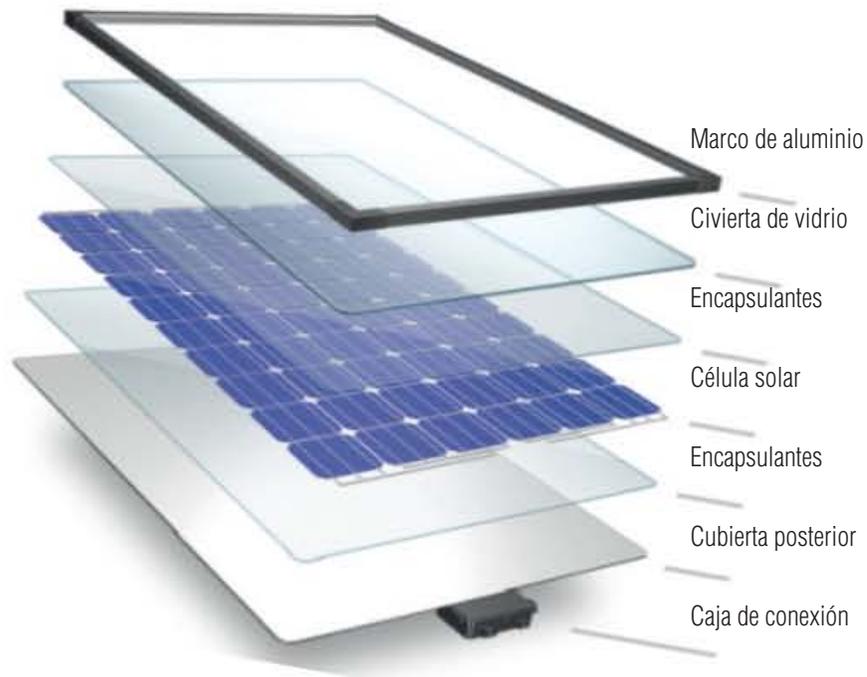


Ilustración 2. Partes de un panel fotovoltaico.  
Imagen tomada del sitio: <https://cambiosolar dot org. files. wordpress. com/2016/02/solar-panel-components.png?w=620>

La ilustración 2 muestra la composición típica de un panel solar, la celda solar puede ser de silicio monocristalino o policristalino, los materiales que “envuelven” a la celda solar pueden cambiar dependiendo si se requiere un material semitransparente u opaco.

### 2.1.1 Paneles de Silicio Monocristalino.

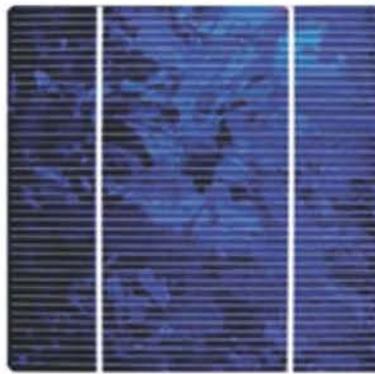
La forma más fácil de reconocerlos visualmente es que tiene las esquinas recortadas. En este tipo de paneles el silicio tiene una pureza alta. Es el tipo de panel con mayor eficiencia, pero también el más caro (Pareja, 2010).

Las ventajas de este tipo de paneles es que ofrecen una eficiencia del 15% e incluso algunas marcas llegan a superar el 20% con una vida útil de hasta 25 años.

Las desventajas que tienen frente a los otros paneles es que son los más caros del mercado y en su método de elaboración, al momento de recortar los lados para que quede semicuadrado se desperdicia material.



Silicio monocristalino



Silicio policristalino



Capa delgada o silicio amorfo

Ilustración 3 Tipos de paneles fotovoltaicos.  
Imagen tomada del sitio: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/wp-content/uploads/tipospaneles1.jpg>

### 2.1.2 Paneles de silicio policristalino.

El proceso de elaboración de los paneles policristalinos es diferente a los monocristalinos, en el policristalino no se usa un monocristal sino pequeños trozos de silicio. Una vez formada la lámina se corta en pedazos cuadrados sin desperdiciar el material (Pareja, 2010).

Las ventajas de los paneles de silicio policristalino son que tienen un menor costo que los monocristalinos y se pierde menos silicio en su proceso de fabricación.

Las desventajas en una menor eficiencia por lo tanto una mayor área a cubrir para tener mayor producción de energía. Las células de estos paneles se degradan más rápido que la de los paneles monocristalinos por lo que su tiempo de vida es menor.

### 2.1.3 Paneles de capa fina de silicio amorfo.

Existen otros materiales aparte del a-Si (Silicio Amorfo) con los que pueden hacer paneles de capa fina como el CdTe (Telurio de Cadmio) o CIGS (Cadmio-Indio-Galio-Selenio) cuya principal característica es el bajo costo en su proceso de construcción (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002).

Las ventajas de estos paneles es que tienen un costo menor a los monocristalinos y policristalinos, se pueden hacer en materiales flexibles o rígidos con lo que se tienen mayores propuestas de diseño y uso. (Valencia, 2015). En este tipo de paneles se puede interactuar con la cantidad de silicio amorfo para dejar espacios transparentes.

La desventaja de este tipo de paneles es que tiene menor eficiencia que los monocristalinos y los policristalinos (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002).

Estas ventajas y desventajas de los paneles fotovoltaicos hacen que se pueda tener una variedad de propuestas y posibles combinaciones de materiales. En la actualidad es posible mandar a realizar bloques de diferentes formas e inclusive se puede proponer el color del fondo del panel

La evolución del diseño de los paneles fotovoltaicos se desarrolló rápidamente debido a la implementación no solo en las azoteas de los edificios sino planteadas como fachadas en donde la interacción con el espacio exterior es mayor.

## 2.2 Integración de paneles fotovoltaicos en arquitectura.

Como se mencionó en capítulos anteriores, los paneles fotovoltaicos no fueron realizados exclusivamente para el sector residencial sino han tenido diferentes usos como la rama aeroespacial (Escaplés Jover, 2012). Conforme fue evolucionando la tecnología y la eficiencia en los paneles se tuvo la oportunidad de que fueran una alternativa de generación de energía renovable viable. El uso de la energía renovable en la arquitectura busca reducir el gasto energético por generación de fuentes fósiles las cuales no son renovables y generan un daño ambiental.

Para tener el mayor ahorro energético se deben de combinar principalmente tres factores los cuales son la arquitectura pasiva, la activa y el uso adecuado de equipos electrónicos. Es preferible que los equipos electrónicos tengan alguna certificación como la del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) la cual se encarga de evaluar estos equipos (Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica, 2017).

La integración de los paneles fotovoltaicos en la arquitectura se dio principalmente después de la primera crisis petrolera y el lugar en donde fueron instalados estos elementos fueron las azoteas de los edificios (Agredano Díaz, 2016). Esto sucedió porque se tomó a este elemento como una adición a los edificios existentes, en esos momentos no se tenía la consideración de incluirlos dentro del diseño y tampoco los parámetros con los que mejor funcionan.

El uso de paneles fotovoltaicos en envolventes hace que se tenga un elemento prefabricado modular el cual sustituye a los materiales convencionales. Este material al funcionar con la radiación solar hace que la orientación sea su principal referencia de diseño y funcionalidad. En la implementación de este tipo de materiales se tiene que estudiar la cantidad de radiación que va a tener el edificio y su viabilidad.

La integración de módulos fotovoltaicos está dividida dependiendo de su nivel de integración y las funcionalidades que pueden desarrollarse y se clasifican en:

#### 2.2.1 BAPV: Building Applied Photovoltaics.

Se refiere a la implementación de sistemas fotovoltaicos en edificios existentes, con la adición de estos materiales no se sustituyen los existentes, ocasionalmente se tienen problemas en su instalación debido a que no hay alguna preparación para su implementación.

Esta fue la primera implementación que se hizo en los edificios para el ahorro energético y llevar energía a lugares remotos en donde no existiera la posibilidad de conectarse a la red como se muestra en la ilustración 4 (Agredano Díaz, 2016).

## 2.2.2 BIPV: Building Integrated Photovoltaics.

En este sistema los elementos fotovoltaicos han estado presentes en el proyecto desde el inicio y son una parte del diseño integral. En este modo los elementos fotovoltaicos sustituyen materiales de envolventes y se mezclan como un elemento constructivo y de diseño. La gran variedad y las diferentes características de los productos hacen posible que puedan reemplazar muchos componentes de la edificación, principalmente en fachadas y azoteas, ilustración 5 (Mundo Hernández, de Celis Alonso, Valerdi Nochebuena, & Sosa Oliver, 2012).

La envolvente del edificio garantiza una frontera entre el edificio y el ambiente. Tiene que proporcionar una calidad de aire estable evitando el intercambio de masa de aire sin control, permitiendo así el adecuado funcionamiento y la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado exterior. Por otra parte, está destinada a ejercer como capa impermeabilizante al edificio.

Cuando los módulos solares van a ser integrados a la fachada del edificio deben ser considerados en la fase de diseño para así conseguir un producto que reúna todas las características de una envolvente arquitectónica.

La característica principal de estas soluciones se encuentra la generación de energía eléctrica, lo que se conoce como propiedad activa (Espejo Marín, 2004). Esta energía puede ser utilizada para el propio consumo del edificio o para ser inyectada a la red. Dependerá principalmente del nivel de radiación de la zona geográfica, la inclinación y orientación del módulo y de su eficiencia.

Existen elementos a considerar que pueden modificar la energía producida por la instalación. Escaplés Jover (2012) nos dice que: "la presencia de sombras sobre el captador fotovoltaico supone en primer lugar la disminución de captación de irradiación solar y después la presencia del llamado efecto mismatch (perdidas energéticas originadas por la conexión de módulos fotovoltaicos de potencias ligeramente diferentes), que se traduce en una disminución de la energía generada."

Es importante realizar un modelo 3D del entorno donde se realizará un edificio BIPV para conocer las sombras que generaran los edificios alternos o elementos verticales como alumbrado o arboles, y posiblemente afecten el diseño para la integración de módulos fotovoltaicos.



Ilustración 4. Ejemplo de clasificación BAPV  
Imagen tomada del sitio: <http://energia-rural.com/wp-content/uploads/Electricidad-para-casa-rural-1024x383.jpg?d8dfb8>



Ilustración 5. Ejemplo de sistemas BIPV  
Imagen tomada del sitio: <http://www.bsp.lt/upload/gallery/62.jpg>

Cuando los elementos fotovoltaicos son integrados como una envolvente de un edificio son capaces de contribuir propiedades pasivas y activas en función de las características alcanzadas en el edificio (Valencia, 2015).

Las más comunes son:

- Aislante térmico.
- Protección solar.
- Entrada de luz natural
- Impermeabilidad.
- Aislamiento acústico

El uso de estos elementos en envolventes arquitectónicas tiene como consecuencia un cambio de percepción del uso tradicional en azotea permitiendo tener más área en fachadas para su instalación.

“Por otro lado, dentro de los núcleos urbanos, se estima que cerca del 60-80% de la superficie de un edificio corresponde a fachadas, a pesar de ello no existen estudios profundos sobre la integración de los sistemas fotovoltaicos en estas superficies. Principalmente esto es debido a que el sombreado generado por la propia geometría urbana es complejo y particular, de hecho, los estudios solares para la integración de energía solar se centran principalmente sobre las azoteas, ya que cuentan con unas condiciones geométricas más favorables y con menos impedimentos estéticos que la instalación en fachadas” (Escaplés Jover, 2012)

Es importante señalar que los estudios que se van a realizar contemplan las variables de temperatura, iluminación y generación de energía de dos tipos de paneles fotovoltaicos, panel monocristalino y paneles de película delgada.

A continuación, se mencionan los conceptos de envolvente, confort térmico e iluminación para tener una claridad de la interacción que tienen los paneles fotovoltaicos con el edificio.

## Envolventes.

También llamada en arquitectura como fachadas, la envolvente arquitectónica tiene como objetivo el cuidado de los usuarios, evitar la excesiva radiación y mantener un ambiente controlado. El correcto diseño de una envolvente puede generar una eficiencia energética por medio de sistemas pasivos de enfriamiento, ventilación cruzada y uso de iluminación natural (Espejo Marín, 2004).

Un factor que aumenta considerablemente el consumo energético del edificio es el acondicionamiento del aire, por lo que se deben de considerar diversas variables para bajar el consumo. La principal variable es la sobre exposición a los rayos solares por lo que se debe de analizar el clima por estación del año, así como contemplar el uso de materiales con aislante térmico.

Existen dos normas oficiales en México que se encargan de verificar el uso correcto de materiales para fachadas dependiendo de la localidad donde se vayan a instalar, estas normas son la NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales y la NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional (Diario Oficial, 2001) (Diario Oficial, 2011) .

Para el caso de todos los elementos BIPV que son utilizados como parte de la envolvente, se tendrá que hacer, en conjunto con todos los elementos constructivos que conforman las fachadas, la NOM-008-ENER-2001 o la NOM-020-ENER-2011 según sea el caso.

En el uso correcto de una envolvente se pueden aprovechar las propiedades de los materiales y del clima para tener un ambiente confortable en el interior del inmueble y con ello también bajar costos energéticos.

El uso de sistemas fotovoltaicos en envolventes aporta las propiedades activas del material por lo que se tiene energía renovable, la cual ayuda a la disminución de contaminantes provocados por combustibles fósiles. Es necesario tener en cuenta la cantidad de radiación horizontal que se tiene en el lugar donde se van a instalar estos equipos ya que la cantidad de radiación difiere por orientación y por latitud.

Existe una variedad de paneles fotovoltaicos pudiendo ser opacos, semi transparentes y de doble vidrio. Todos tienen diferentes cualidades como material de envolventes y es necesario especificar el más acorde al sitio y a las necesidades que se tienen.

## Confort térmico.

Se refiere a la satisfacción térmica del usuario, en donde las variables de temperatura y humedad son idóneas para realizar alguna actividad. Aunque cada persona tiene diferente condición física y por lo tanto diferente sensación térmica, se puede tener un rango que oscila entre 20° C - 23.5° C en Invierno y 23° C - 26° C en Verano, para que las personas tengan este confort térmico (ASHRAE 55, 1992).

Existen diversos factores que pueden aumentar la temperatura interna de un edificio como lo son la radiación, los equipos electrónicos y las luminarias. De estas la que más afecta es la radiación solar, principalmente cuando las proporciones de la fachada tienen más vano que macizo y la orientación no favorece.

Los equipos electrónicos y las luminarias tienen dos papeles en el edificio, el primero es como consumidores de energía y el segundo como generadores de calor. El aumento de temperatura por parte de los equipos electrónicos y las luminarias dependerá en gran parte por la cantidad y la eficiencia energética que tengan estos equipos.

Al momento de proyectar la envolvente es necesario conocer el tipo de actividades que se van a realizar al interior del edificio, específicamente aquellos espacios que tienen interacción con las fachadas. Es relevante conocer la cantidad de equipos que se van a tener por espacio, la cantidad de iluminación que se necesita y la que se puede aprovechar de la fachada. El confort térmico existe cuando las personas no reconocen los cambios de temperatura independientemente del espacio en donde se encuentren, esto permite que puedan realizar las actividades sin ninguna molestia. (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo , 2007)

## Iluminación.

Si bien una envolvente es un elemento que protege al edificio del medio ambiente, a su vez debe de permitir el paso o bloqueo, según sea el caso, de iluminación natural asegurando el funcionamiento de las actividades y minimizando el uso de iluminación artificial.

La iluminación es el elemento principal para la realización de alguna actividad. Para su evaluación es necesario contrastarlas con los niveles recomendados para una actividad en específico. En México la norma NOM-025-STPS-2008 es la que indica las condiciones de iluminación para centros de trabajo. Esta norma nos permite tener comparaciones de cantidad de iluminación para diferente actividad, es decir, un salón de clases necesita menos iluminación que un laboratorio (Secretaría del Trabajo y Prevención Social, 2008).

De acuerdo al último inventario de generación de energía de la SENER en México, realizado del 1 de julio del 2014 al 30 de junio del 2015, la electricidad fue la fuente más importante de energía del sector comercial y de servicios pues en 2009 representó 50.5% de la energía final consumida, seguido por gas L.P. con 39.8%, gas natural con 5.7%, diésel con 2.2% y energía solar con 1.7%.

Agredano Díaz (2016) nos dice que se puede reducir hasta el 66% en el consumo de energía con el aprovechamiento de la iluminación natural y utilizando luminarias de bajo consumo.

3



---

## **3. PROGRAMAS FOTOVOLTAICOS EN EL MUNDO Y MÉXICO**

---

Son diversos los programas que se han desarrollado a nivel mundial, los países con más desarrollo tecnológico fueron los que tuvieron problemas con la crisis petrolera de inicios de los 70s.

Los datos cronológicos que se muestran a continuación son los programas con tecnología fotovoltaica, lo que incentivo al desarrollo y formas de adaptación en la arquitectura que integraba estos elementos. Datos de: Agredano Díaz (2016) y Escaplés Jover (2012)

- 1970. Japón. Lanza el proyecto Sunshine
- 1972. Estados Unidos. Se crea la Agencia de Desarrollo e Investigación de Energía.
- 1974. Alemania. Inicia el apoyo para la investigación y desarrollo y se presentan 70 proyectos demostrativos.
- 1980. México. Electrificación de clínicas rurales IMSS
- 1981. Estados Unidos. Sale al mercado la primera célula cuadrada de 4 pulgadas
- 1990. Alemania. Se lanza el programa 1000 techos solares el cual fue rebasado y se redimensiona a 2000 techos solares.
- 1991. Alemania. Se promulga la ley Stromeinspeisungsgstz la cual pretende inyectar electricidad a la red.
- 1998. Japón. Se instalaron cerca de 16 000 sistemas fotovoltaicos en casa habitación.
- Estados Unidos. Se lanza el programa Million Solar Roofs Initiative con el objetivo al
- 2010. México. Programa PRONASOL. Electrificación básica rural

- 1999. Alemania. Se realiza el programa 100 000 techos solares con créditos a 10 años.
- Estados Unidos. Se definen estrategias para producir 7GW para el 2020.
- Japón. El Ministro de Construcción acepto el módulo fotovoltaico como material para techos en los proyectos de casa habitación
- 2001. Estados Unidos. Se han instalado 2 000 sistemas fotovoltaicos
- 2004. Alemania. Se precisan los lineamientos para la venta de energía eléctrica de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red.
- México. Programa de Energías Renovables para la Agricultura, PERA
- 2007. Proyectos de interconexión a la red de CFE
- 2012. México. Ley General de Cambio Climático cuya finalidad es generar el 35% de energías limpias al 2024
- 2013. México. Entra en vigor la Reforma Energética.

Como se muestra en los datos cronológicos, en México, hasta antes del 2007, el uso de sistemas fotovoltaicos estaba ligado a programas rurales en donde llevar la electricidad era demasiado costoso y se optaba por colocar fuentes de energía alterna.

La interconexión a CFE inicio en 2007 y es usada principalmente por viviendas que tienen tarifa Doméstica de Alto Consumo DAC las cuales usan estos sistemas fotovoltaicos como medida para bajar su tarifa (Islas Samperio, y otros, 2016).

Actualmente no se tienen modelos de crédito por parte del Gobierno para cambiar el modo en que se inyecta energía a las viviendas. Existen algunas empresas como Galt y Enlight que están otorgando un sistema de inversión principalmente a viviendas con tarifa DAC y comercio para implementar sistemas fotovoltaicos (Galt Energy, 2017) (Enlight, 2017).

4



---

## **4. REFORMAS Y LEYES EN MÉXICO PARA LA ENERGÍA SUSTENTABLE**

---

### 4.1 Reforma Energética.

La Reforma Energética tiene entre algunos objetivos garantizar la eficiencia, la calidad, reducir la exposición ambiental y modernizar la manera en que se genera la energía en México (México, Gobierno de la República, 2013).

En cuestión de energías renovables el objetivo es fomentar el uso de energías limpias sustituyendo las centrales que más contaminan.

En esta reforma se propone un impacto inmediato a la generación de energía renovable por medio de la meta nacional de generar el 24% de la energía con fuentes renovables para el 2018 y para el 2024 la meta es de generar el 35%.

A raíz de esta Reforma se emitieron diversos informes como la Prospectiva de Energías Renovables que dirige la Secretaría de Energía (SENER) en la cual se muestra el objetivo a largo plazo en cuál es el de generar el 40% de la energía con fuentes limpias para el 2035.

La manera en que se plantea el generar esta energía es mediante la asociación del sector privado ya que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) fortalecerá su cartera de inversión en energía renovable con la inclusión de este sector.

La Secretaría de Energía (2014) en su documento Prospectivas de Energías Renovables 2014-2028, argumenta que: “El principal instrumento para fortalecer las energías limpias serán las obligaciones y certificados de energías limpias, las cuales permitirán generar condiciones de certidumbre que favorecen el desarrollo de instrumentos contractuales y de financiamiento para reducir el costo de capital en la inversión, además de ofrecer un incentivo económico directo a los desarrolladores por la energía generada”

## 4.2 Certificado de Energías Limpias.

A través de las modificaciones que hizo la Reforma Eléctrica los usuarios que tengan una demanda mayor a 3MW podrán elegir a una empresa privada o a CFE. Los usuarios tendrán la opción de contratar a la empresa que mejor se adapte a sus necesidades.

Los certificados de energías limpias es método para repartir los objetivos de producción de energías limpias que propuso la Reforma Energética, es decir, para llegar a la meta de generar el 35% con energías renovables los productores de energía particular deberán generar energía renovable y en caso de no alcanzar la meta podrán adquirir Certificados de Energías Limpias de alguna central eléctrica que genere energía renovable (Deloitte, 2015)..

La Comisión Reguladora de Energía será la encargada de emitir los certificados, así mismo también tiene la labor de verificar la información de las centrales de energía limpia.

En el caso de los edificios residenciales la energía la seguirá suministrando CFE, esta modalidad de elegir proveedor de energía no aplica para estos, sin embargo, pueden participar de manera independiente con sistemas fotovoltaicos conectándolos a un medidor bidireccional que suministra CFE, la energía producida será descontada de la energía consumida (Deloitte, 2015).

## 4.3 Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables 2014-2018.

La Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERTFTE) fue quien elaboro el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables (PEAER) y uno de los elementos fundamentales es la promoción de proyectos a base de energías renovables (Gobierno de la República. Secretaría de Energía, 2013)

La Secretaría de Energía realizó en el 2013 un inventario con la información de la viabilidad de proyectos de energía renovable, esta información cuenta con estudios técnicos y económicos en donde se muestra la perspectiva de factibilidad para cada tipo de generación de energía, en primer lugar, está la energía eólica y en el último la energía solar, la cual es la que menos estudios tiene. México tiene un potencial para la generación de energía solar por la zona donde está ubicado (Islas Samperio, 2016), pero hasta no hacer estudios de factibilidad de ubicación con materiales no se podrá conocer el total de energía que se puede producir.

Los estudios técnicos de las energías renovables es el primer paso de una inversión para el desarrollo de infraestructura funcional y es por eso que se creó el Fondo Sectorial SENER-CONACYT el cual está encargado del desarrollo de información en el sector de energía renovable.

En la Tabla 1 se puede mostrar que la energía solar fotovoltaica es la más baja, seguida de la energía eólica. El objetivo de este programa es impulsar el desarrollo de energías renovables en base a estudios previos que generen la base para nuevos proyectos causando una economía a favor del medio ambiente.

#### 4.4 Programa de Certificación de Edificios Sustentables (PCES) para la CDMX.

	2008	2009	2010	2011	2012
Hidroeléctrica	91.53%	91.55%	91.64%	92.19%	89.11%
Geotermoeléctrica	7.79%	7.76%	7.69%	7.11%	6.27%
Eoloeléctrica	0.69%	0.68%	0.68%	0.70%	4.61%
Solar fotovoltaica	-	-	-	-	0.01%
<b>Total</b>	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 1. Participación de la Capacidad total instalada para satisfacer la demanda del servicio público a partir de Energías Renovables 2008-2012. Fuente SENER.

Este programa es realizado por la Secretaría del Medio Ambiente (2014) y busca mediante incentivos fiscales que los edificios existentes y nuevos proyectos adopten sistemas sustentables de eficiencia energética.

El objetivo del programa es disminuir la cantidad de CO2 emitidos por factores energéticos principalmente por la generación de energía eléctrica mediante combustibles fósiles.

El programa ofrece a los interesados incentivos fiscales de acuerdo al artículo 277:

Apoyo a programas de mejoramiento de condiciones ambientales (energía, agua, residuos) o por reducción de límites permisibles en normas. El apoyo es de hasta 40% en impuesto sobre nómina y hasta 20% en predial (Asamblea Legislativa del Distrito Federal, 2015).

Para darle continuidad a esta certificación se tiene que informar semestralmente el desempeño energético del edificio.

5



---

## 5. INVESTIGACIONES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

---

Se han realizado estudios en diversas universidades acerca de los paneles STPV, como los titulados: A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings (Kapsis & Athienitis 2015), Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate (Peng, y otros 2016), Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration (Olivieri y otros 2015), entre otros. Estas investigaciones están enfocadas a las aportaciones de energía eléctrica, la disminución de energía requerida por sistemas de climatización artificial y el aprovechamiento de la iluminación. Los resultados son diferentes en cada uno de ellos.

Olivieri, y otros, (2015) llevaron a cabo el análisis que se realizó en el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid y muestran que para fachadas grandes y abiertas el potencial ahorro de energía proporcionada por las soluciones de STPV oscila entre el 18% y 59% en comparación con un cristal claro.

En Singapur se hizo un estudio similar en donde el potencial ahorro de energía es de 16.7% a 41.3% en comparación con un vidrio claro. También utilizaron la herramienta Energy Plus. Estos porcentajes no son solo de energía eléctrica, sino también térmica. En China se utilizó un doble cristal para ventanas en donde el ahorro de ganancia de calor es de 46% (Peng, y otros, 2016)

Se llevó a cabo el estudio de una simulación térmica de una Envolvente con STPV en Madrid utilizando el software EnergyPlus y Design Builder. Se tomó como referencia una porción del edificio y como valor U del muro exterior  $0.66 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Olivieri, y otros, 2015). Se realizó bajo las normas de eficiencia térmica en envolventes de España y para la determinar la iluminación se utilizó el programa del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), se realizó un levantamiento 3D del edificio y la simulación de iluminación natural en un día nublado y soleado. Esta simulación da como resultado la cantidad de iluminación que se puede aprovechar dependiendo el porcentaje de transparencia del vidrio STPV.

Un estudio similar es el que realizaron los investigadores Kapsis & Athienitis (2015) en la Universidad de Concordia, Canadá, en el cual sus resultados fueron que la selección de un módulo STPV con 10% de transparencia visible resulto con la ganancia energética más baja anual con  $5\text{KWh/m}^2/\text{año}$  y el funcionamiento de las células hasta  $64^\circ\text{C}$  podría causar la degradación acelerada de la película de orgánica .

Las condiciones climáticas y la orientación de la envolvente tienen una relación directa al rendimiento de los sistemas BIPV y STPV porque de esto depende la generación anual de electricidad, ganancias de calor y disponibilidad de iluminación natural. Los estudios realizados en la Universidad de Concordia en Toronto y la Universidad Politécnica de Madrid tienen resultados diferentes al análisis del STPV debido a las condiciones climáticas que presenta cada zona.

Los dos estudios utilizaron un método de simulación por computadora utilizando SketchUp 3D, Matlab y EnergyPlus. En estos dos estudios no se realizaron experimentos y tampoco se hizo la vinculación de mejoramiento interno del edificio a partir de las ganancias energéticas. Uno de los factores por lo cual los resultados fueron diferentes es por la proporción de las ventanas en las fachadas, en las cuales, las temperaturas interiores se ven directamente influenciadas por la ganancia de calor solar. La finalidad de las protecciones solares es reducir el consumo de energía del aire acondicionado y evitar la pérdida de temperatura para evitar la calefacción.

La Ciudad de México es un lugar favorable para la instalación de un sistema fotovoltaico gracias a su ubicación, es una zona donde la radiación solar es alta y constante a lo largo del año, con un valor promedio de  $5\text{Kwh/m}^2$  al día, un valor mucho mayor que el de países como Alemania, Japón,

España y Estados Unidos. Es por ello que se tiene que realizar un estudio de las STPV en la Ciudad de México y conocer sus características y adaptarlas a la solución que más le convenga al edificio. En los países desarrollados la demanda de energía crece pese a las políticas de ahorro y eficiencia energética que han logrado atenuar el ritmo de crecimiento de la demanda. El uso eficiente de la energía y de las tecnologías es fundamental en el futuro.

Existen edificios que ya cuentan con sistemas STPV como la envolvente del edificio del Laboratorio Pfizer, edificio Genyo en Granada, España, en el cual hay una combinación de materiales STPV translucidos y opacos dependiendo de la función interna. Las propiedades de este edificio es que evita 21.33t anuales de CO<sub>2</sub>, su potencia pico es de 19,30W, tiene una superficie activa de 523 m<sup>2</sup> y genera una energía anual de 31,837 KWh/año. Este edificio es similar a las oficinas de la empresa Onyx Solar en Ávila, España, tiene una envolvente de STPV con lo cual ahorran 53% en climatización y 32% en electricidad. La modernización y equipamiento de estos edificios con tecnologías apropiadas para el control solar, y el aislamiento térmico, logran reducir el consumo de energía térmica y tener una producción de energía eléctrica, ayudando al medio ambiente con la baja productividad de CO<sub>2</sub>.



6



---

## **6. ANÁLISIS DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD**

---

Para entender la importancia de la planeación de fachadas con sistemas PV se realizaron mediciones del 2 de mayo del 2016 al 6 de mayo del 2016 en el Centro de Ciencias de la Complejidad C3 el cual se encuentra ubicado en Ciudad Universitaria, Circuito Mario de la Cueva número 20, Insurgentes Cuicuilco, Delegación Coyoacán. Latitud Norte N 19°18', y Longitud Oeste 99°11'.

El edificio se encuentra levantado sobre terreno natural de roca volcánica y en su mayoría tiene el desplante como planta libre. Cuenta con un patio de forma triangular al centro del edificio con el cual permite su ventilación en planta baja y primer nivel, como se muestra en la Ilustración 6.

Consta de tres niveles:

Planta Sótano donde se ubican los servicios: almacén, intendencia, cisternas.

En Planta Baja se encuentra el acceso al edificio, salón audiovisual, cubículos de investigadores, baños, cafetería, escaleras, elevadores, salidas de emergencia.

En la Planta Alta se localizan las salas de junta y cubículos de investigadores.

Una característica de este edificio es que cuenta con la instalación de paneles fotovoltaicos tanto en azotea como en la fachada Sur del edificio. Los paneles instalados en la fachada fueron el principal punto de investigación. Estos paneles fueron colocados entre los niveles Planta Baja y Primer Nivel y en la parte superior del Primer Nivel como se muestra en la ilustración 7.



Ilustración 6. Localización del Centro de Ciencias de la Complejidad C3



Ilustración 7. Modelo del Centro de Ciencias de la Complejidad C3 realizado en el software Revit.

El motivo de las mediciones se originó por quejas de los usuarios en relación a la alta temperatura registrada en las oficinas ubicadas en la fachada sur, así como el exceso de iluminación natural afectando las actividades en su interior. La temperatura que reportaron fue de 40°C al interior de una oficina en la fachada sur.

Para entender el comportamiento lumínico y de radiación, el primer paso que se realizó fue hacer el levantamiento del edificio en el software Revit y en este mismo programa se realizó el análisis solar como se muestra en la ilustración 8.

El segundo paso fue instalar equipo de medición de temperatura y humedad marca HOBO, el tiempo que se midió fue el 2 y 3 de mayo del 2016. El equipo se colocó al centro de las oficinas, sobre las mesas de trabajo, a una altura de 0.75m y a una distancia de la fachada de 2.00m. Se instalaron en 4 oficinas de la fachada Sur, 3 de estas oficinas tienen la protección solar con paneles fotovoltaicos y una no tenía protección.

Para conocer el funcionamiento y la temperatura que puede alcanzar un panel solar es necesario conocer los elementos que lo conforman.



Ilustración 8. Análisis solar del C3 realizado en el software Revit.



Ilustración 9. Medición de temperatura de un panel fotovoltaico de silicio monocristalino en la Unidad de Posgrado, UNAM

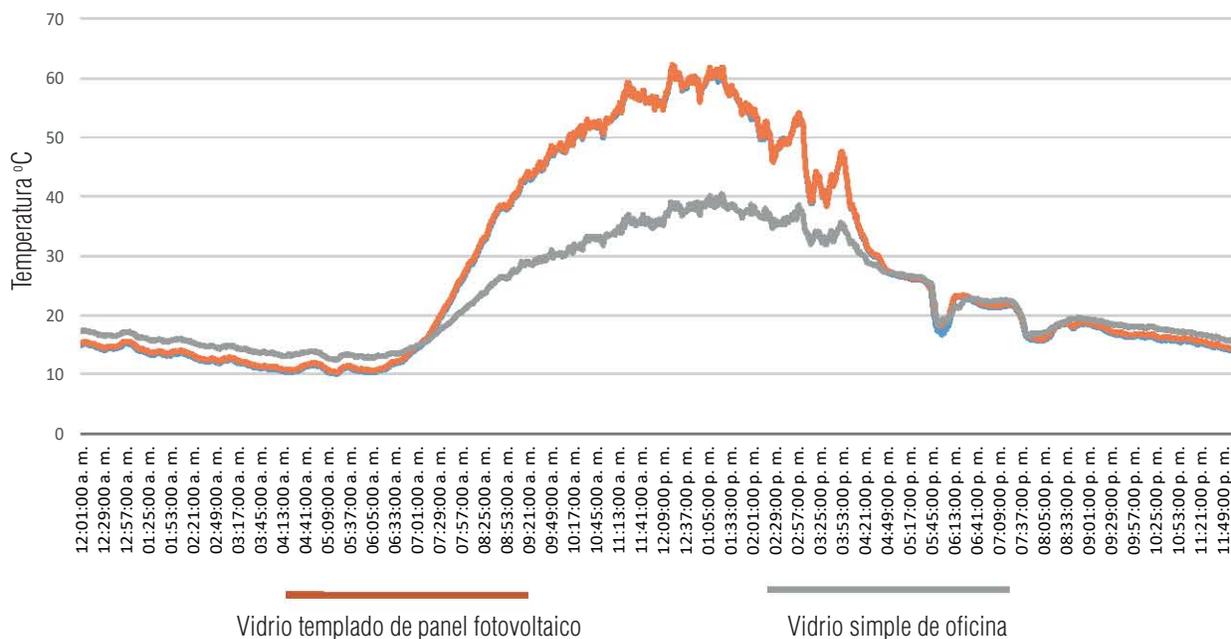
Se realizó una simulación del efecto que tienen los paneles fotovoltaicos con la fachada de cristal del edificio C3, para la medición térmica de los paneles solares se utilizaron termistores, los cuales fueron colocados en el cristal templado del panel fotovoltaico, en la cubierta posterior y en un cristal claro de 6mm simulando la fachada del edificio.

El objetivo de esta medición es conocer el comportamiento térmico de la envolvente, evaluar el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos como generadores de energía y protección solar.

### Resultados.

Las mediciones de temperatura del panel arrojaron que el 4 de Mayo del 2016, como se muestra en la gráfica 7, la temperatura máxima que se registro en el panel fotovoltaico fue de 62.09°C a las 12:22 PM, mientras que la temperatura máxima del vidrio fue de 40.45°C a las 13:22 PM, para verificar la temperatura también se tomaron algunas fotografías en la cámara térmica y los resultados son similares con los de la gráfica.

En las fotografías de la cámara termografía se puede apreciar la influencia que tienen los paneles solares hacia el interior del edificio ya que es el elemento que presenta una mayor temperatura y la cercanía a este hace que transfiera.



Gráfica 7. Medición de temperatura en panel fotovoltaico 4/Mayo/2016

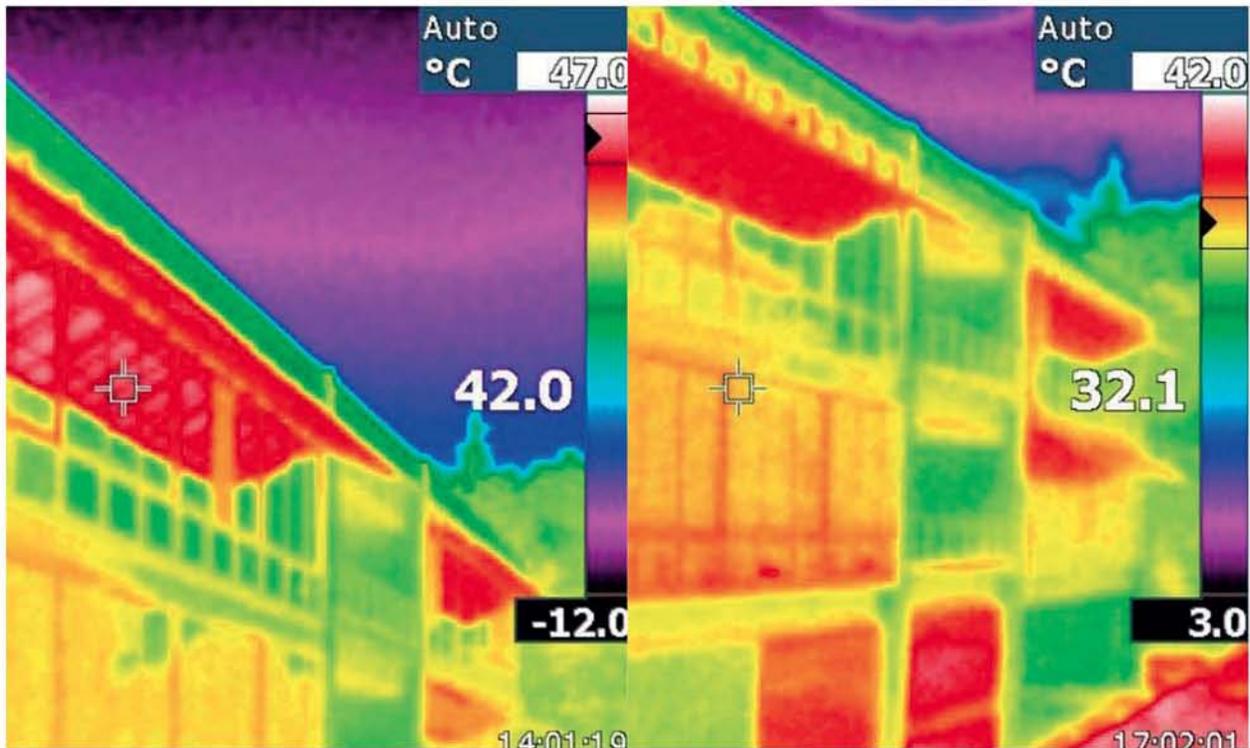


Ilustración 10. Fotos de la cámara termográfica 4/Mayo/2016

En base al estudio de asoleamiento en el programa Revit, se encontró que los paneles instalados en el primer nivel quedan sombreados por los instalados en el segundo nivel. Este fenómeno se da prácticamente en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre como se muestra en la ilustración 11. Los paneles fotovoltaicos al estar sombreados reducen su producción de energía.

Por otra parte, los paneles solares no están funcionando como protección solar en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero por la inclinación del Sol en invierno. Por lo que se espera que durante esos meses tengan problemas térmicos en el interior de las oficinas.

La comparación entre las temperaturas del vidrio del panel fotovoltaico y del vidrio colocado en la fachada sur del C3, llevó a buscar literatura específicamente a este hecho. Peng, y otros (2016) mencionan que para una doble fachada en un clima Mediterráneo la distancia mínima para que funcione correctamente es de 60cm, se realizaron simulaciones en el programa Energy Plus con distancias menores a esta y los resultados fueron una alta transferencia de calor por parte de los paneles fotovoltaicos.

En la Ilustración 11 se muestra que a las 12:22 Hrs. del 4 de mayo la mayor temperatura alcanzada por el panel solar fue de 62.09 °C mientras que la oficina 1 tiene 24.41°C y la oficina 2 cuenta con 26.06°C . En esta imagen también se puede mostrar la sombra que proyectan los paneles superiores a los inferiores en donde están prácticamente sombreados en su totalidad. La simulación de la ilustración 12 se realizó con el objetivo de comprobar la similitud de sombras del programa Revit 2017 con una fotografía tomada en sitio.

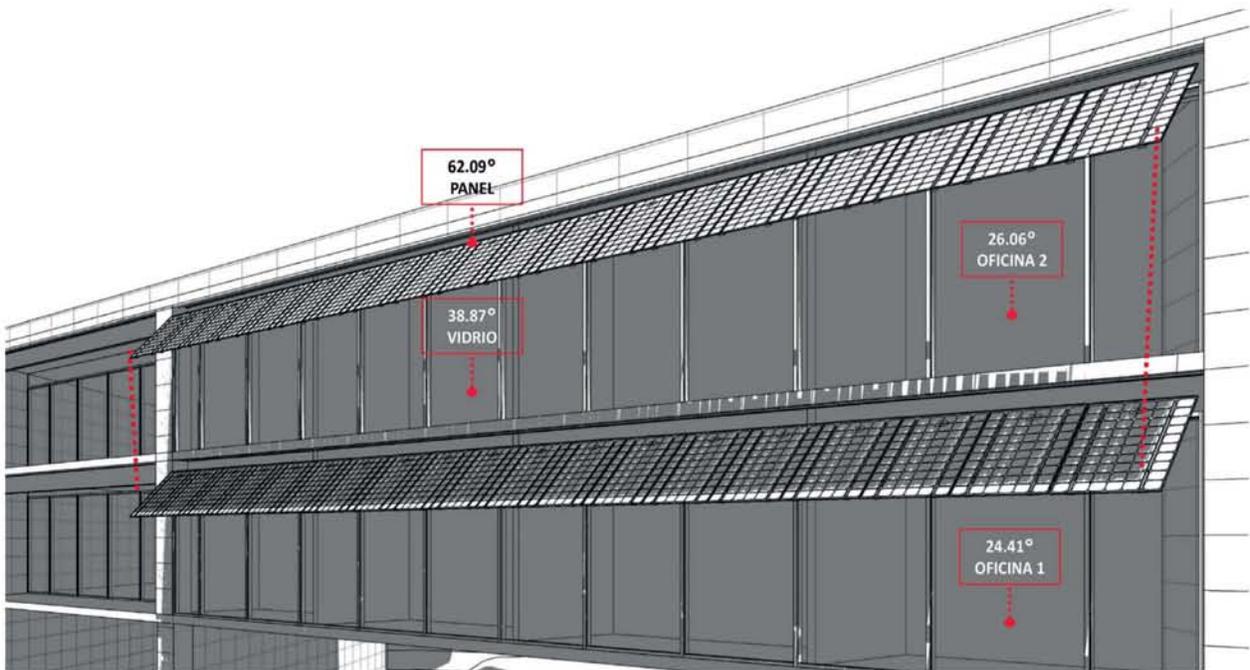


Ilustración 11. Estudio de sombras 4/Mayo/2016 12:22 Hrs.



Ilustración 12. Sombras 4/Mayo/2016 14:02 Hrs.

Los paneles fotovoltaicos son una influencia térmica en el aumento de temperatura de las oficinas del C3 ya que la separación de los paneles a la fachada es menor de 60cm. y no existe una correcta circulación del viento que mitigue la influencia térmica de los paneles hacia el interior del edificio, ilustración 13.

De acuerdo a ASHRAE 55 (1992) la temperatura máxima de confort en verano para el interior de un espacio es de 26 °C y la temperatura que alcanzaron las oficinas el 2 de mayo del 2016 son mayores: oficina 1 con 27.67°C, oficina 2 con 28.39 °C, oficina 13 con 30.74 °C y oficina 15 con 31.02°C. Estas temperaturas se dieron en primavera, si lo hacemos exponencial hacia el verano la temperatura al interior del edificio posiblemente aumente.

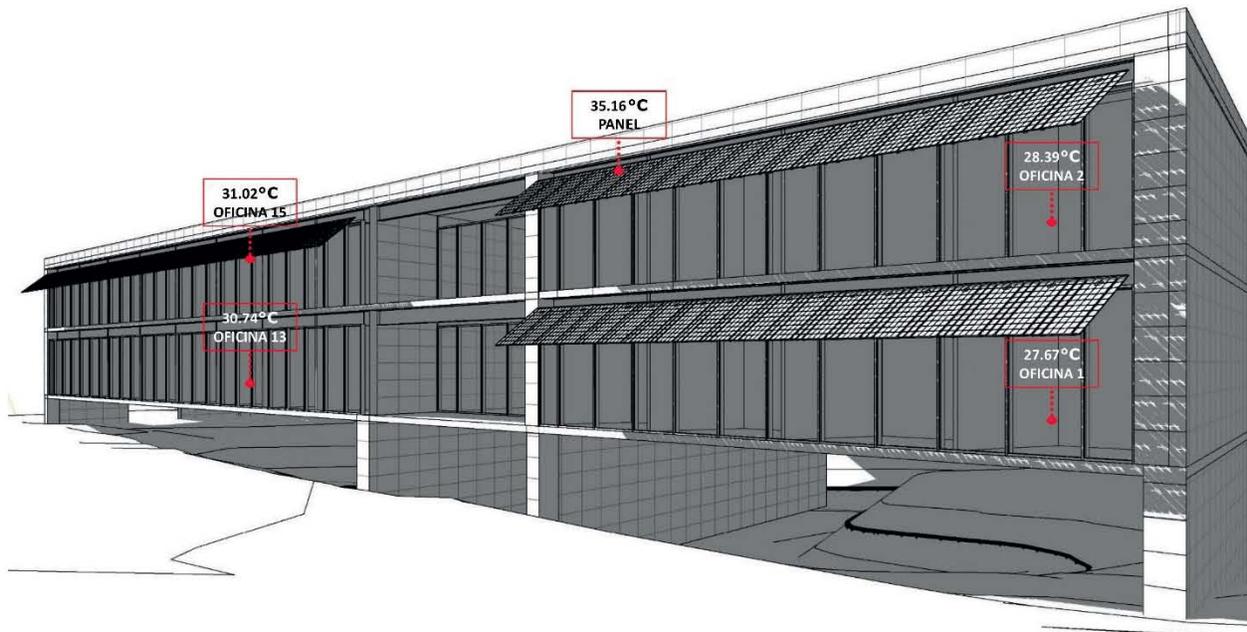


Ilustración 13. Estudio de sombras 2/Mayo/2016 16:44 Hrs

Existe una variable que se debe de considerar y es que, en los meses de noviembre (ilustración 14), diciembre (ilustración 15), enero (ilustración 16) y febrero (ilustración 17) a partir de las 15:00 Hrs. los paneles fotovoltaicos dejan de cubrir la radiación y esta empieza a entrar en las oficinas.

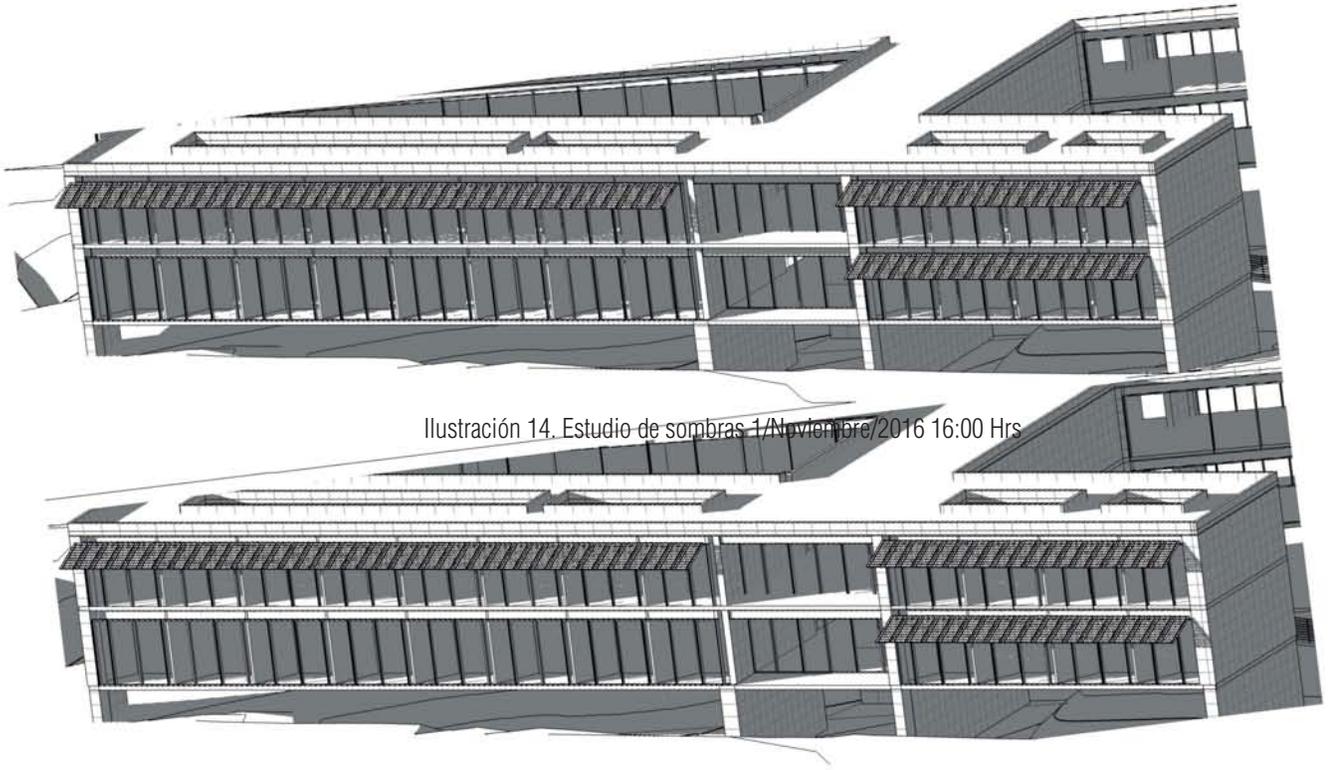


Ilustración 14. Estudio de sombras 1/Noviembre/2016 16:00 Hrs

Ilustración 14 Superior, estudio de sombras 1/Noviembre/2016 15:00 Hrs, Inferior, estudio de sombras 1/Noviembre/2016 17:00 Hrs.

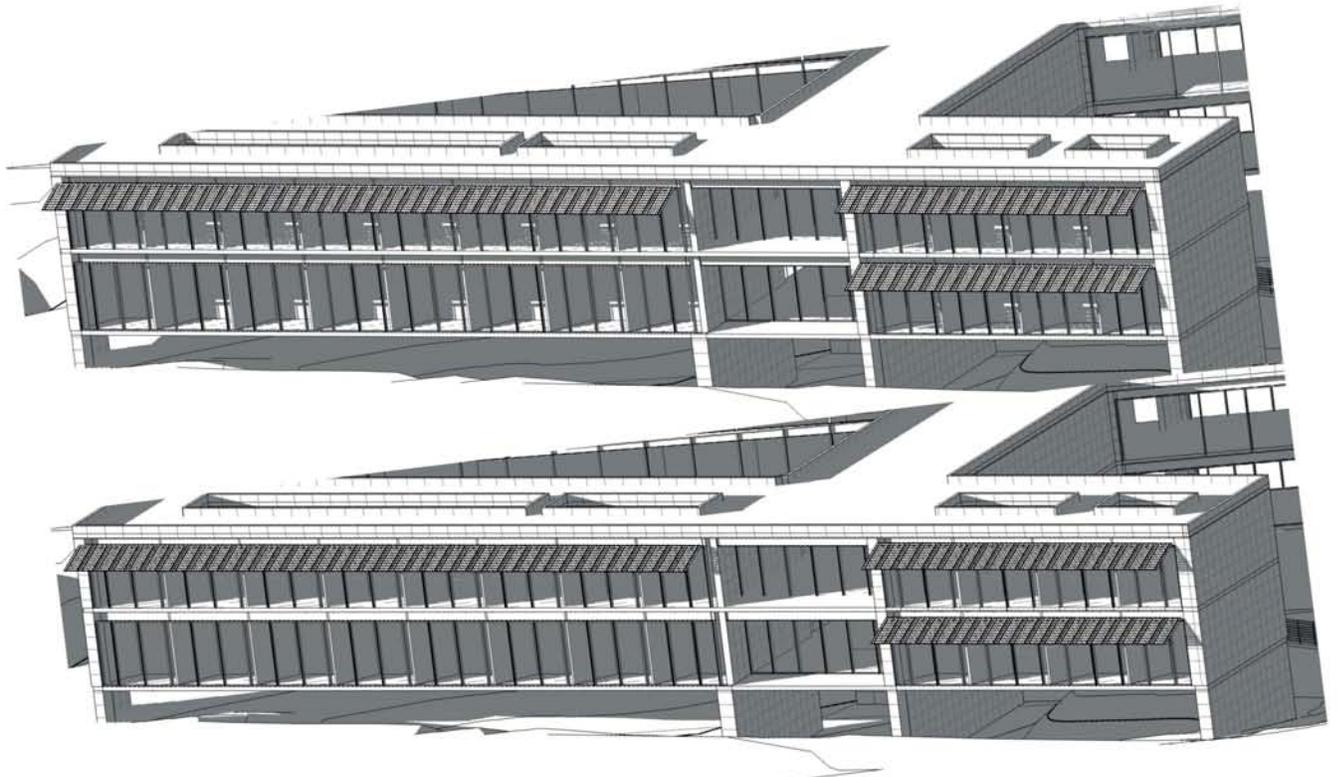


Ilustración 15 Superior, estudio de sombras 1/Diciembre/2016 15:00 Hrs. Inferior, estudio de sombras 1/Diciembre/2016 17:00 Hrs.

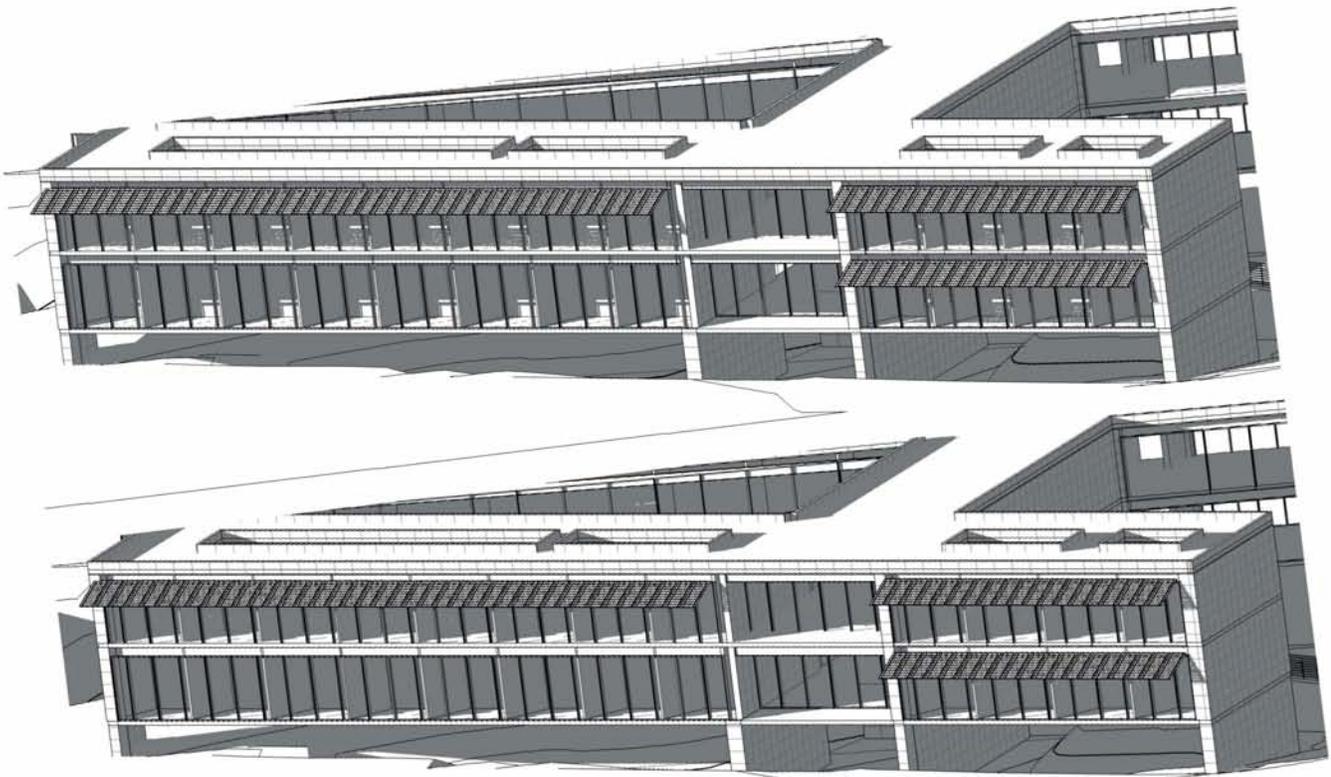


Ilustración 16 Superior, estudio de sombras 1/Enero/2017 15:00 Hrs. Inferior, estudio de sombras 1/Enero/2017 17:00 Hrs.

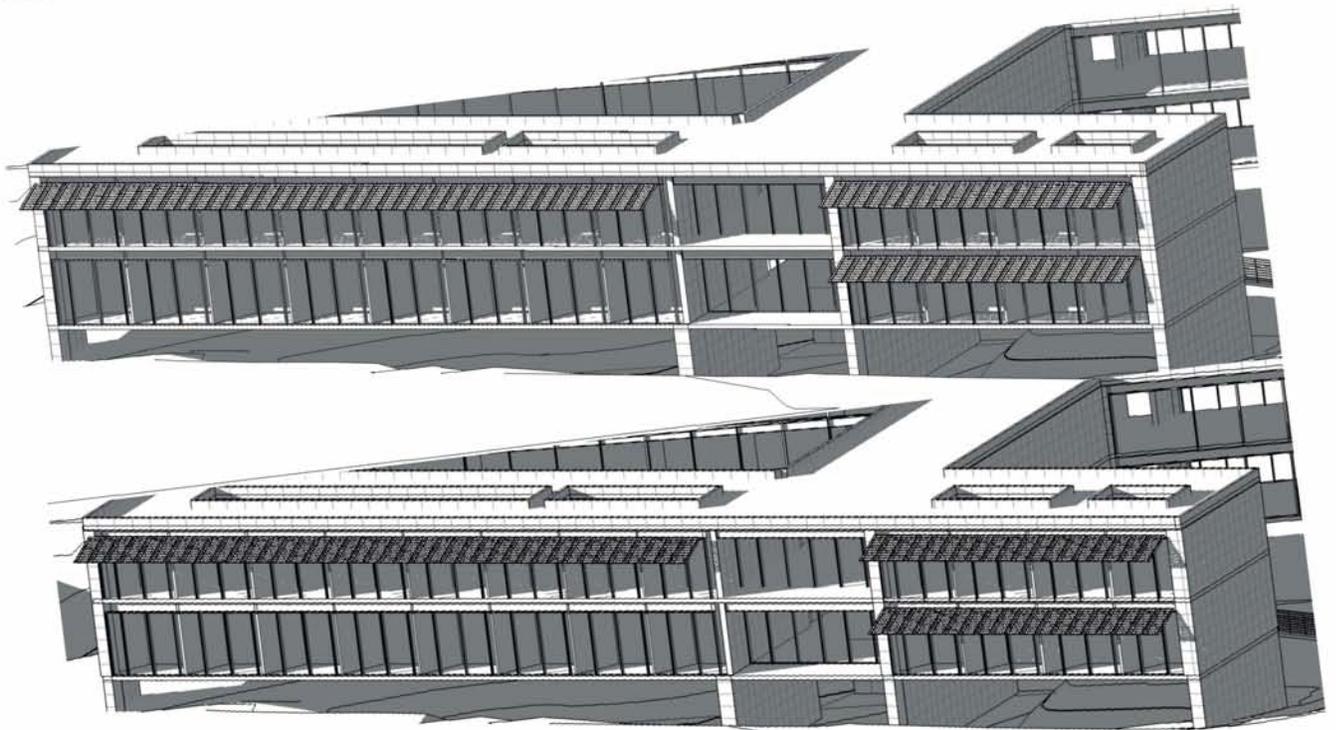


Ilustración 17 Superior, estudio de sombras 1/Febrero/2017 15:00 Hrs. Inferior, estudio de sombras 1/Febrero/2017 17:00 Hrs.

7



---

## **7. ANÁLISIS DE VIDRIO FOTOVOLTAICO CON TRANSPARENCIA DE 10%, 20% Y SIN TRANSPARENCIA**

---

Para determinar las variables de temperatura, energía e Iluminación que influyen en una envolvente con vidrio fotovoltaico se realizaron mediciones en la azotea del edificio J de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México cuyas coordenadas son 19 30´ 92” Norte y 99 19´49” Oeste.

Los vidrios fotovoltaicos que se utilizaron para estas mediciones tienen diferentes tipos de transparencia, 20%, 10% y 0%. Esta transparencia está definida por el número de filamentos de silicio amorfo, entre mayor número de filamentos menor transparencia.

El objetivo de estas mediciones es crear criterios de diseño en base a los resultados obtenidos, tener las bases del comportamiento de estos elementos constructivos para poder establecer envolventes eficientes en la CDMX.

### **7.1 Método.**

La primera etapa consistió en crear una estructura en la cual se pudieran instalar 3 vidrios fotovoltaicos de 20% de transparencia, 3 vidrios de 10% de transparencia, 3 vidrios de 0% de transparencia y 3 paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino. La estructura se realizó a base de perfil cuadrado de 1” X 1” calibre 16. Esta estructura se montó en la azotea del edificio “J” de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ilustración 18.

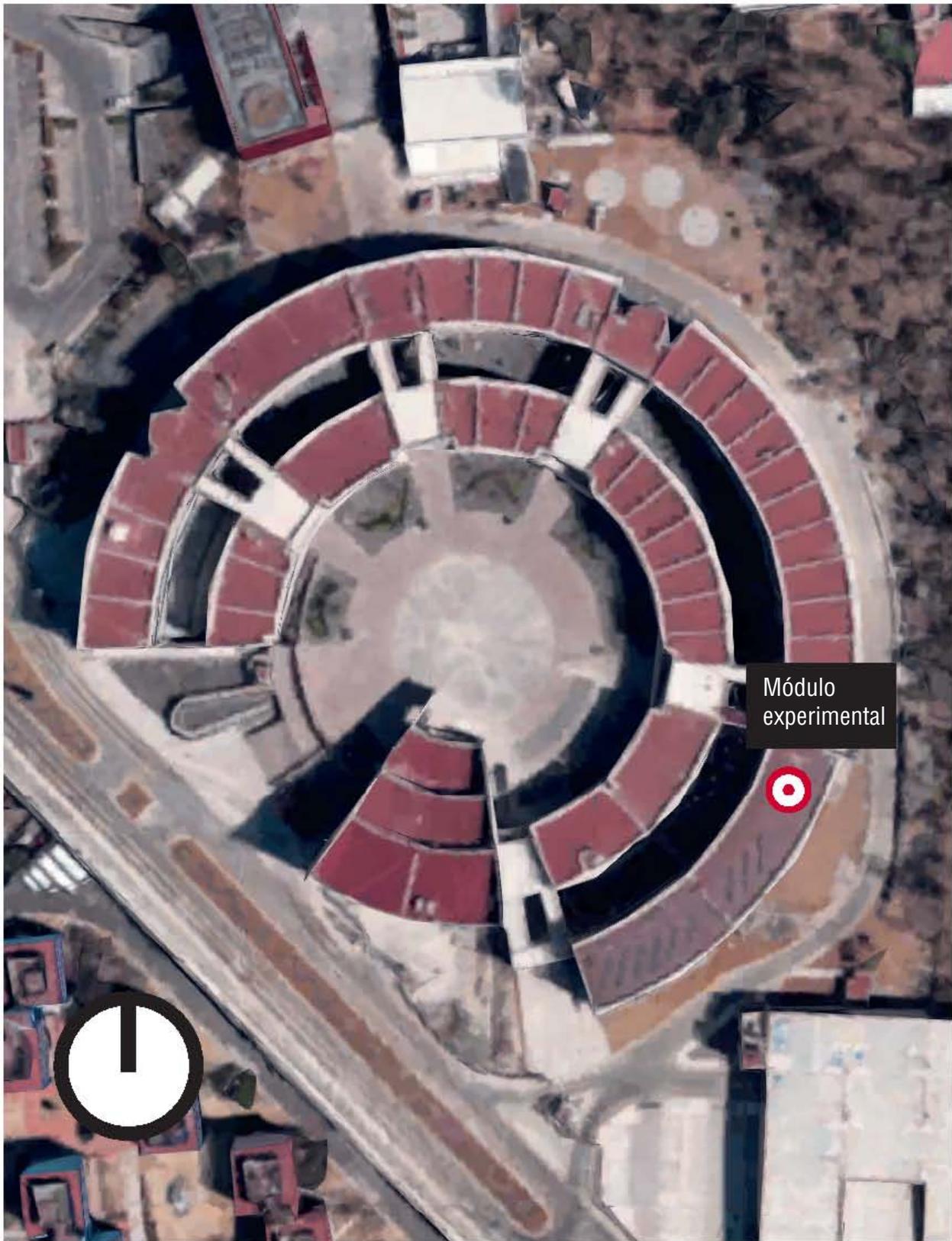


Ilustración 18. Localización de módulo experimental en la Unidad de Posgrado

Para registrar la temperatura y la energía que producen los elementos fotovoltaicos se ocuparon los siguientes instrumentos:

1) CR1000. Es un módulo de almacenamiento de datos en el cual se programan los sensores como los termopares.

2) Termopares. Son sensores para medir la temperatura por medio de micro voltajes, estos instrumentos son instalados en el adquisidor de datos CR1000.

3) Fluke 435. Es un analizador de energía que puede medir hasta 1000V y se puede programar para capturar las mediciones por ciclos de tiempo.

En la Ilustración 19 se muestra la estructura con los paneles ya instalados. La configuración de instalación de los paneles quedo de la siguiente manera, de la parte superior al inferior, panel de silicio monocristalino, vidrio fotovoltaico de silicio amorfo de 10% de transparencia, vidrio fotovoltaico de silicio amorfo de 20% de transparencia y finalmente vidrio fotovoltaico de silicio amorfo sin transparencia.

Antes de la instalación se le colocaron cables de cobre calibre 22 a todos los paneles, esto para tener una mayor facilidad de localizar cada cable del panel para poderlos medir de forma individual.

En la ilustración 19 se muestra la instalación de los termopares al centro de cada panel, se colocaron en una primera fase en la fachada sur, posteriormente se midio cada panel fotovoltaico. Antes de colocarlos se limpiaron los paneles para que el vinil con el que se unió el termopar tuviera una mejor adherencia, este vinil es de uso exterior por lo que es contra intemperie.

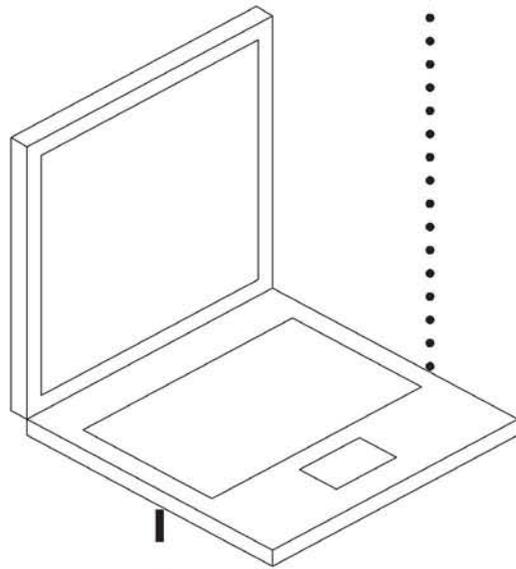
Finalmente se utilizó el Fluke 435 para registrar el comportamiento de los voltajes, se programó para medir por periodos de 4 días con el fin de intercambiar de cables hacia otro panel, Ilustración 20. La fachada con la que se iniciaron las mediciones fue la Sur.



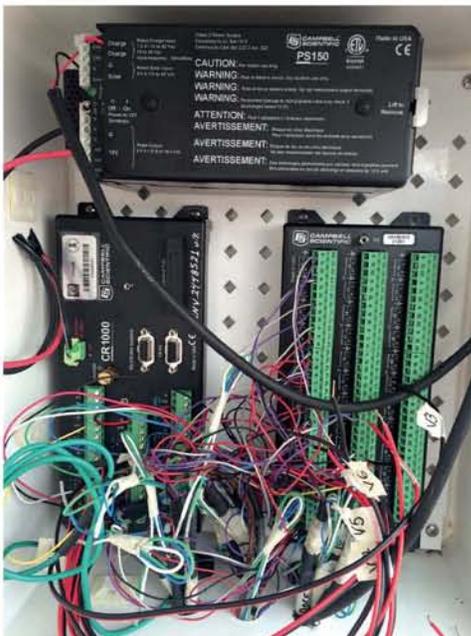
Ilustración 19. Instalación paneles fotovoltaicos.



Conexión de corriente al analizador de energía Fluke 435



Descarga de datos a Laptop



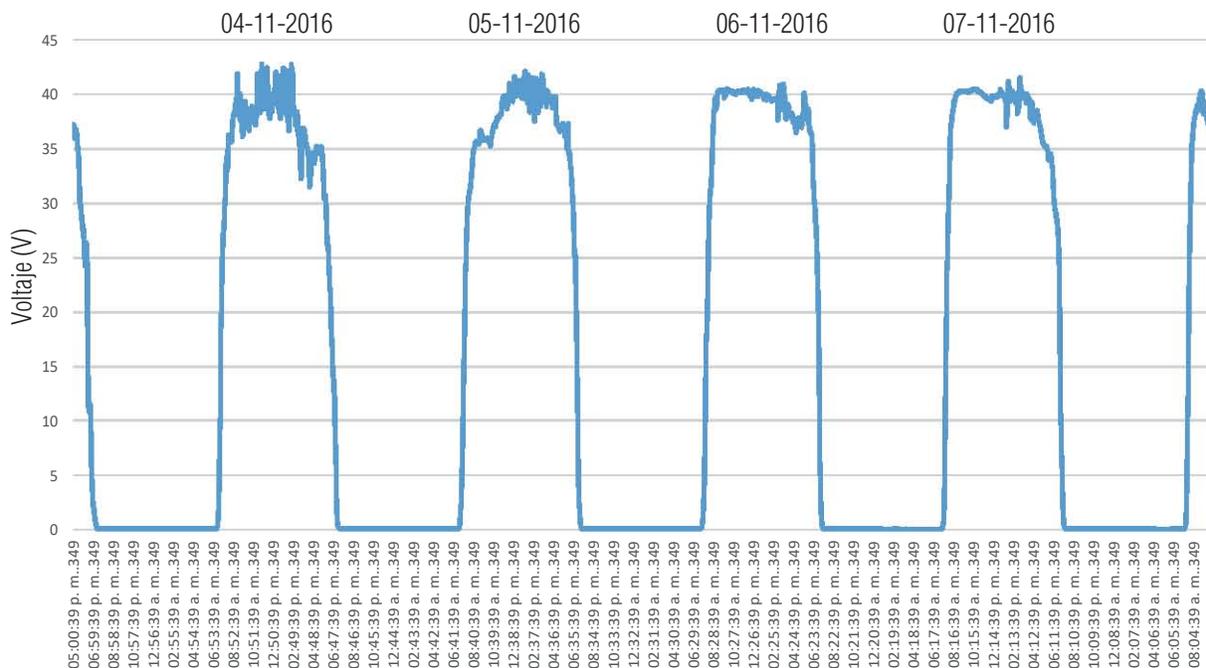
Conexión de termopares al data logger CR1000

Ilustración 20. Registro de datos.

## 7.2 Resultados voltaje

La primer fachada que se analizo fue la Sur, en esta se empezo a medir el voltaje del vidrio fotovoltaico que tiene 10% de transparencia, se analizo desde el día 4 de Noviembre del 2016 al 7 de Noviembre del 2016 (ver Gráfica 8).

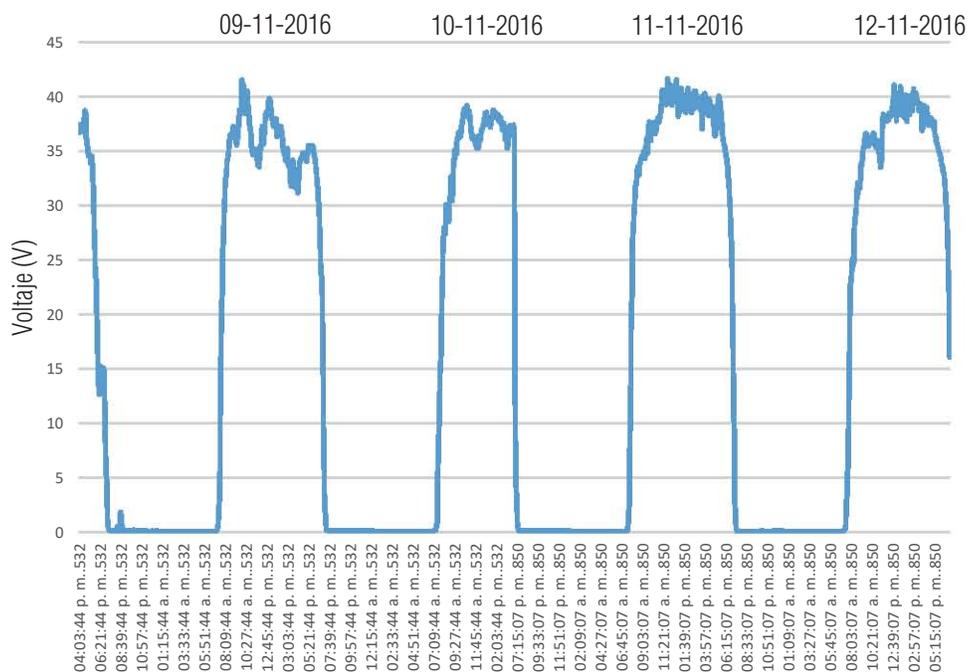
El día 4 de Noviembre se empezo a generar el primer volt a las 7:24 a.m. y el ultimo a las 7:12 p.m. El maximo voltaje se logro a las 11:42 a.m con 42.78 Volts. Esta es la curva que presenta mas variaciones de voltaje debido al clima. Para el día 5 de Noviembre el primer volt se genero a las 7:25 a.m. y el ultimo a las 7:16 p.m. El maximo voltaje fue a la 1:48 p.m. y se obtuvieron 42.12 Volts. Para el día 6 de Noviembre el primer volt se genero a las 7:27 a.m. y el ultimo a las 7:13 p.m., el voltaje maximo fue a las 3:25 p.m. con 40.93 Volts. Por ultimo para el día 7 de Noviembre el primer volt se genero a las 7:21 a.m. y el ultimo a las 7:13 y el maximo voltaje se dio a las 2:53 p.m con 41.53 volts. Con estos datos se puede observar que los voltajes mas altos no se dan en horas determinadas, la nubosidad del clima influye en la generación de energía. En la gráfica 8 tambien se nota el rapido asenso de voltaje, del volt 1 al 35 hay un tiempo de diferencia de una hora aproximadamente. El



Gráfica 8. Voltaje en vidrio fotovoltaico de 10% de transparencia.

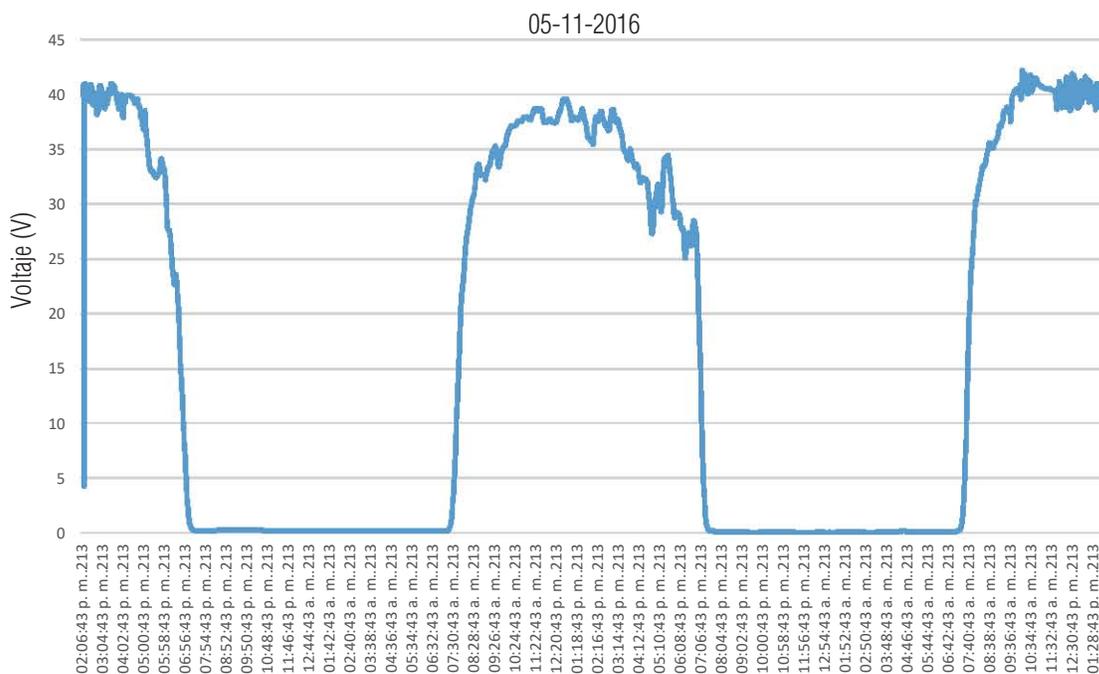
descenso aunque tambien es rapido este tarda aproximadamente 1 hora 30 minutos. Los rangos de voltaje maximo son muy similares para los 4 dias, estos osilan entre los 35-40 volts.

Las mediciones para voltaje en el vidrio de 20% de transparencia se iniciaron a medir el 9 de Noviembre del 2016 y se termino de medir el 12 de Noviembre del 2016 . El dia 9 de Noviembre se empezo a generar el primer volt a las 7:25 a.m. y el ultimo 7:12 p.m, el maximo voltaje se logro a las 10:01 a.m con 41.53 Volts. Esta es la curva que presenta mas variaciones de voltaje debido al clima. Para el día 10 de Noviembre el primer volt se genero a las 7:30 a.m., el maximo voltaje fue a las 10:45 p.m. y se obtuvieron 39.22 Volts. Para el día 10 de Noviembre el primer volt se genero a las 7:30 a.m. y el ultimo a las 7:17 p.m., el voltaje maximo fue a las 11:49 p.m. con 41.62 Volts. Por ultimo para el día 11 de Noviembre el primer volt se genero a las 7:28 a.m. y el maximo voltaje se dio a las 12:47 p.m con 41.08 volts. Vease gráfica 9.



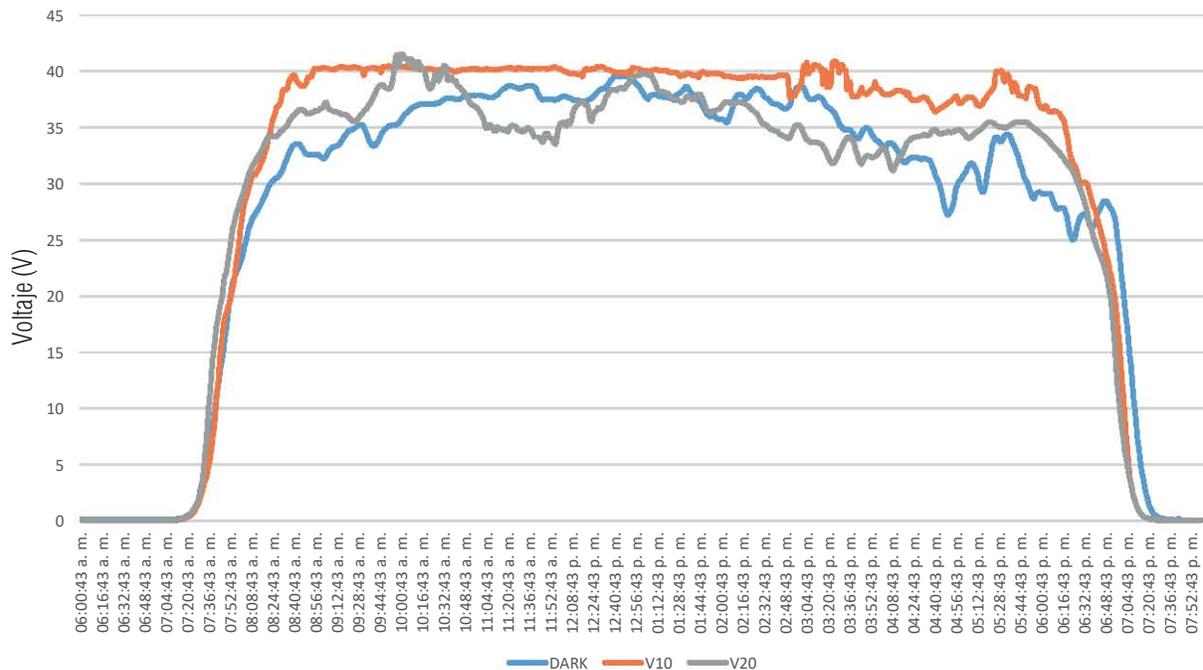
Gráfica 9. Voltaje en vidrio fotovoltaico de 20% de transparencia

La medición para el vidrio sin transparencia se hizo el 5 de Noviembre del 2016 en la que se obtuvo que el primer volt inicio a las 7:26 a.m., el ultimo a las 7:22 p.m. y el maximo a las 12:48 con 39.61 volts. A pesar de que este es el vidrio que debería generar mas voltaje es el que ha registrado hasta el momento la menor maxima. Vease gráfica 10.



Gráfica 10. Voltaje en vidrio fotovoltaico sin transparencia.

La gráfica 11 muestra la comparación de voltaje de los diferentes vidrios fotovoltaicos, se tomaron los días 6 de Noviembre del 2016 para el vidrio con 10% de transparencia, el 9 de Noviembre del 2016 para el vidrio con 20% de transparencia y para el vidrio sin transparencia el 16 de Noviembre del 2016. En esta primer muestra el resultado es que el vidrio con 10% de transparencia presenta los voltajes mas altos, sobre 40 volts, mientras que el mas bajo es el vidrio con 20% de transparencia. El inicio de produccion de energía es similar en los tres. En estos elementos, la nubosidad tiene un papel fundamental ya que los días 9 y 16 de Noviembre el clima no fue lo bastante favorable para las mediciones.



Gráfica 11. Voltaje en vidrio de 0%, 10% y 20% de transparencia

Para conocer el voltaje máximo de cada panel y teniendo como referencia la radiación que le está llegando se midieron todos los paneles por periodos de 3-4 días. La tabla 2 muestra los resultados encontrados para el máximo voltaje registrado para cada tipo de panel o vidrio fotovoltaico. Dentro de estos datos se destaca el mayor voltaje registrado por el vidrio fotovoltaico con 20% de transparencia con orientación Oeste para el día 15 de marzo del 2017 a las 3:13 p.m. con 44.6 Volts y una radiación de 579.5 kW/m<sup>2</sup>

Un dato a considerar dentro de estas mediciones es del vidrio fotovoltaico con 10% de transparencia en la orientación Oeste, el día 28 de marzo del 2017 en donde se obtuvo 40.5 Volts con una radiación de 810 kW/m<sup>2</sup>, esto quiere decir que tuvo un menor voltaje que el vidrio fotovoltaico antes mencionado y con 230 kW/m<sup>2</sup> más de radiación.

### 7.3 Resultados de Temperatura.

Como se mostro en las mediciones de temperatura realizadas a un panel solar estas pueden alcanzar hasta los 62°C en un plano inclinado a 19°. La temperatura es un factor que influye al momento de diseñar una envolvente por la cantidad de calor que va a transmitir al interior pudiendo provocar el uso excesivo de refrigeración o el disconfort de un individuo. Además de que la alta temperatura en el entorno impacta el desempeño del sistema fotovoltaico.

Las siguientes pruebas de temperatura se dividieron en 2, en la gráfica 12 se muestran las temperaturas de la fachada Sur y en la gráfica 13 las temperaturas de la fachada Oeste.

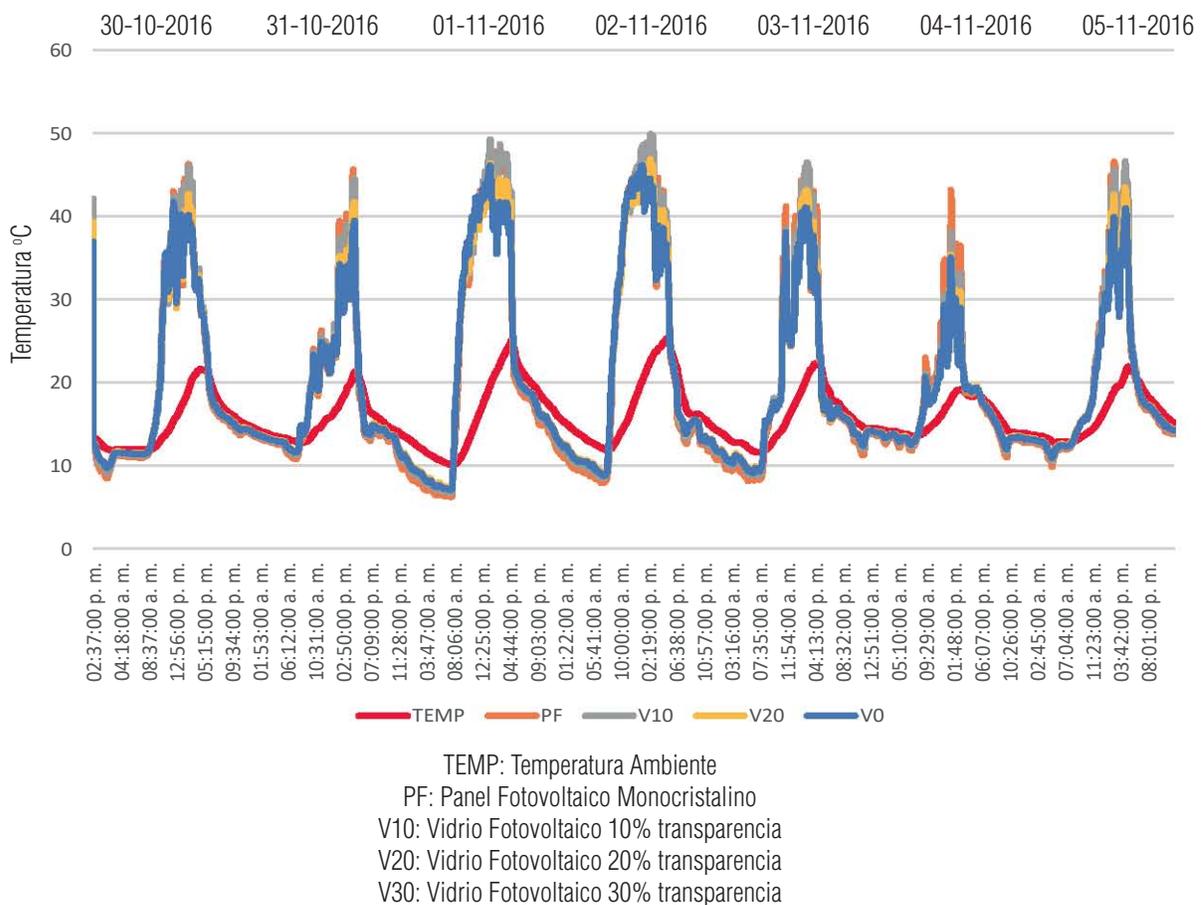
Se realizaron las mediciones de estas fachadas principalmente porque la orientación que tiene el Centro de Ciencias de la Complejidad es Sur-Oeste. Se pretende tener un parámetro de la temperatura a la que pueden llegar los tipos de paneles y vidrios fotovoltaicos en relación con la temperatura ambiente.

Tipo de Panel	Orientación	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
PV Panel Monocristalino	Este	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		19/01/2017	09:30 a. m.	20.89	769.5
20%	Este	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		07/07/2017	09:30 a.m.	42.78	583.2
10%	Este	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		09/01/2017	09:17 a. m.	44.51	556.4
0%	Este	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		14/01/2017	09:01 a. m.	43.3	658.6
PV Panel Monocristalino	Sur	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		11/02/2017	02:00 p. m.	20.34	651.8
20%	Sur	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		29/01/2017	11:23 p. m.	40.99	510.4
10%	Sur	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		05/02/2017	01:05 p. m.	39.63	455.5
0%	Sur	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		09/02/2017	10:11 a. m.	39.2	475.7
PV Panel Monocristalino	Oeste	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		26/03/2017	04:59 p. m.	22.46	687.5
20%	Oeste	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		15/03/2017	03:13 p. m.	44.6	579.5
10%	Oeste	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		28/03/2017	04:24 p. m.	40.5	810
0%	Oeste	Día	Hora	Voltaje (V)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )
		12/03/2017	05:26 p. m.	43.9	667

Tabla 2. Voltajes maximos en todas las orientaciones.

El periodo de medición de temperatura fue del 30 de Octubre del 2016 al 5 de Noviembre del 2016. Se realizo la medición de la temperatura ambiente como una manera de contrastar la temperatura que alcancen los elementos fotovoltaicos, en la grafica esta marcada con las siglas TEMP y en color rojo. En esa semana la temperatura maxima que alcanzaron los elementos fotovoltaicos fue el 2 de Noviembre a las 2:35 p.m. con el panel fotovoltaico de silicio monocristalino con una temperatura de 49.65°C, el vidrio de 10% de transparencia 49.89°C, el vidrio con 20% de transparencia 46.83°C y el vidrio sin transparencia 44.46 °C. La temperatura ambiente ese día a la misma hora fue de 22.53°C por lo que hay una diferencia de temperatura con la mas alta registrada de 27.36°C.

Durante esa semana la maxima temperatura de los materiales supera los 40°C inclusive aun cuando la temperatura ambiente esta por debajo de los 20 °C por ejemplo el 4 de Noviembre a la 1:20 p.m. la temperatura ambiente fue de 17.92 °C y el panel de silicio monocristalino alcanzo una temperatura de 43.13 °C. Vease gráfica 12.

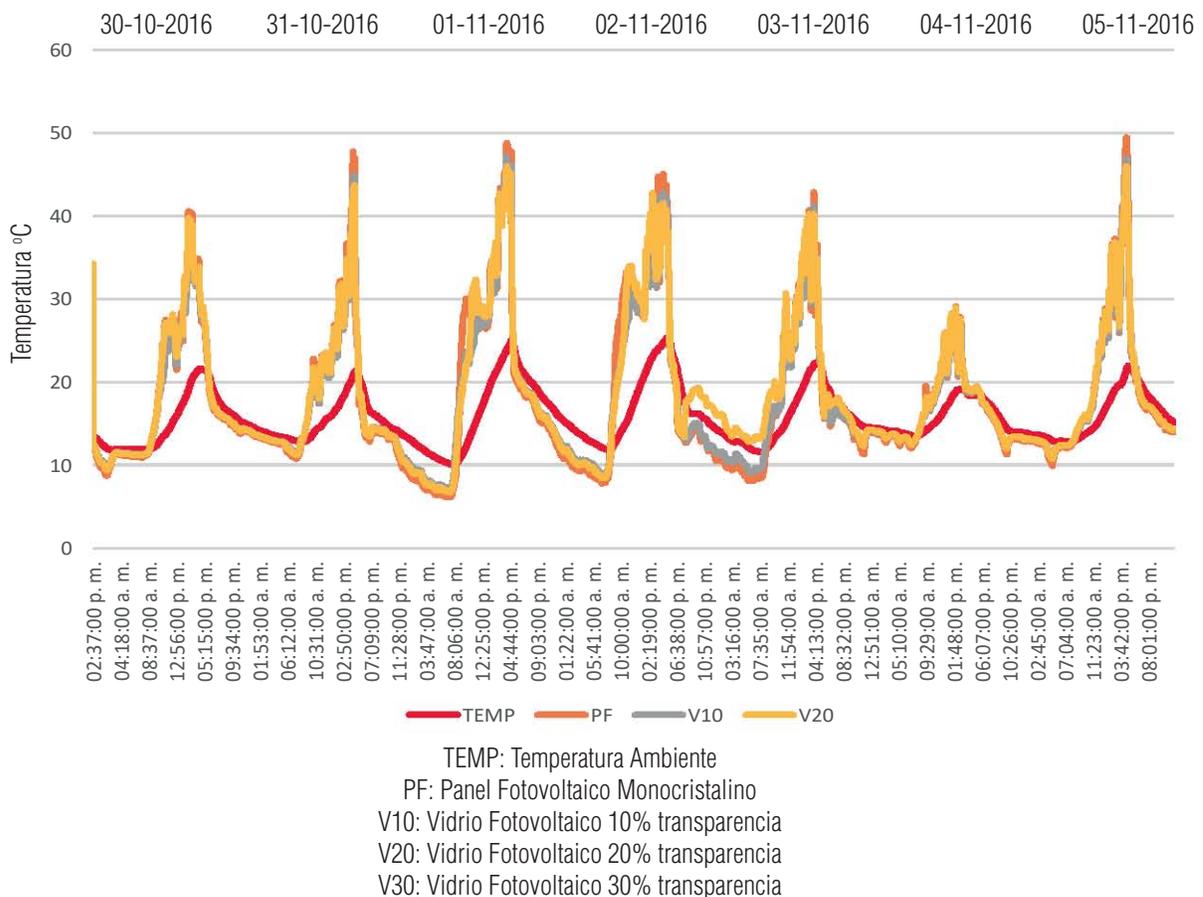


Gráfica 12. Temperatura en paneles fotovoltaicos fachada Sur

El periodo de medición para la fachada Oeste fue el mismo que para la Sur. En esta fachada se midieron 3 elementos fotovoltaicos, el panel de silicio monocristalino, un vidrio con 20% de transparencia y el vidrio con 10% de transparencia. La temperatura máxima alcanzada con esta orientación fue el 5 de Noviembre a las 4:34 p.m. con 49.39°C por parte del panel de silicio amorfo, 46.9 °C para el vidrio con 10% de transparencia y 45.94 °C para el vidrio con 20%. La temperatura ambiente en ese momento fue de 21.29 °C lo que significa que hubo una diferencia de 28.1 °C con el panel de silicio amorfo.

Durante esa semana, de igual manera que la fachada Sur, el panel de silicio amorfo fue el que obtuvo los mayores registros de temperatura.

La temperatura de los elementos fotovoltaicos en la fachada Oeste empiezan a ser más altos que la fachada Sur a partir en promedio de las 4:00 p.m. con una diferencia de hasta 4.69 °C para esa semana. Vease gráfica 13.



Gráfica 13. Temperatura en paneles fotovoltaicos fachada Oeste

## 7.4 Resultados de Iluminación.

El paso de iluminación es una ventaja que tienen los vidrios fotovoltaicos a comparación de los paneles de silicio monocristalino, para determinar el paso de iluminación y la irradiación se realizaron mediciones y los datos se registraron de manera manual, se utilizó el solarímetro marca KIMO para determinar la irradiación. Las mediciones se realizaron el 22 de Noviembre del 2016 a las 3:01 p.m., bajo un cielo despejado y se realizó lo más rápido posible para evitar variaciones conforme al movimiento solar.

Para esto se hizo una comparación de la irradiación de la fachada con el lado interior del vidrio. Los resultados fueron los siguientes: fachada Sur con  $614 \text{ W/m}^2$  y vidrio sin transparencia con  $21 \text{ W/m}^2$  en la Ilustración 21 y vidrio con 20% de transparencia con  $106 \text{ W/m}^2$ , vidrio con 10% de transparencia con  $63 \text{ W/m}^2$  en la ilustración 22. Con estos datos se podría decir que el vidrio sin transparencia reduce el 96.57% la irradiación, el vidrio con 10% reduce el 89.73% la irradiación y el vidrio con 20% reduce el 82.73% la irradiación.



Ilustración 21. Izquierda, medición de irradiación en fachada sur. Centro y derecha medición al interior del vidrio sin transparencia.



Ilustración 22. Izquierda irradiación de vidrio con 20%. Derecha irradiación en vidrio con 10% de transparencia.

Comparación de iluminación con un panel fotovoltaico monocristalino y uno de silicio amorfo con 20% de transparencia en el C3.

Este estudio determina la cantidad de iluminación que reciben las oficinas ubicadas en la fachada Sur y evalúa los elementos de protección solar.

Actualmente las oficinas cuentan con paneles fotovoltaicos como protección de iluminación y para evitar el aumento de temperatura. Las oficinas que se van a evaluar se encuentran en los extremos del edificio, tres cuentan con paneles fotovoltaicos y una no tiene protección, Ilustración 23. El edificio C3, donde están contenidas estas 4 oficinas, fue modelado en el programa Revit 2017 y es el caso base (basecase) para el análisis. El modelo del C3 tiene la orientación Sur-Oeste conforme a los planos arquitectónicos existentes, las características de las oficinas (tabla 3) y tiene las protecciones solares (paneles fotovoltaicos) para determinar su funcionamiento.

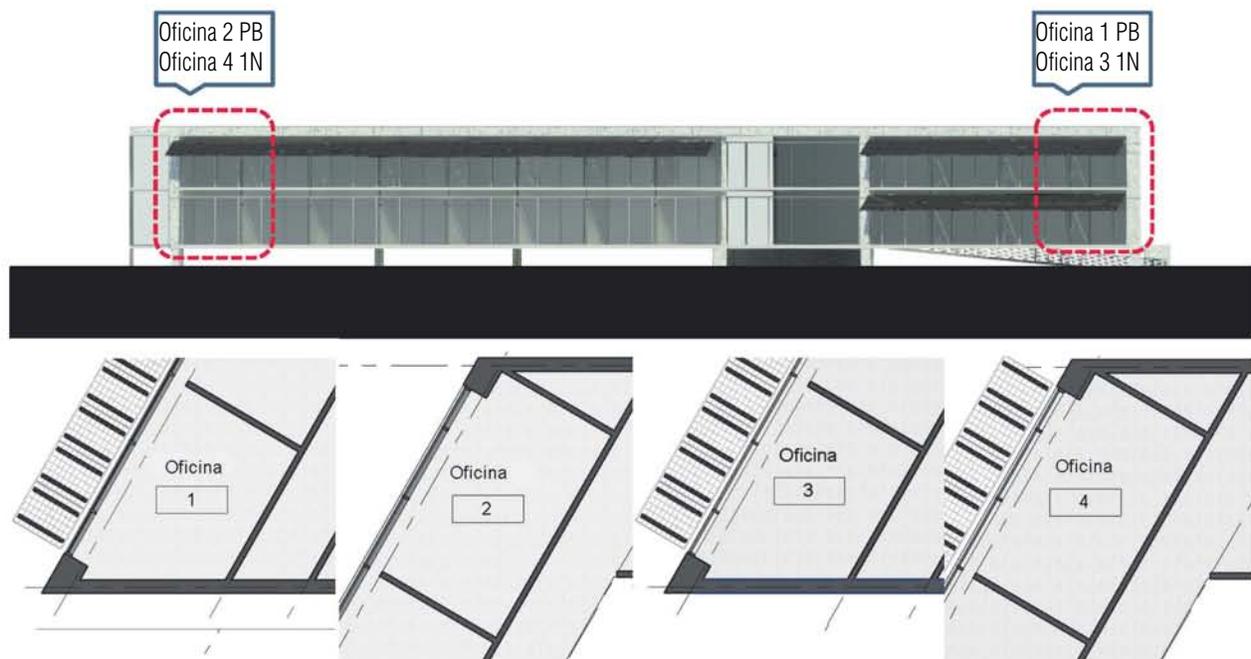


Ilustración 23. Ubicación de oficinas.

Oficina	Área	Volumen	Material fachada	Material cancel
1	14.11 m <sup>2</sup>	36.00 m <sup>3</sup>	Vidrio claro	Aluminio
2	17.25 m <sup>2</sup>	44.00 m <sup>3</sup>	Vidrio claro	Aluminio
3	14.11 m <sup>2</sup>	36.00 m <sup>3</sup>	Vidrio claro	Aluminio
4	17.2 m <sup>2</sup>	44.00 m <sup>3</sup>	Vidrio claro	Aluminio

Tabla 3. Características de las oficinas

La primera prueba de las 4 oficinas seleccionadas fue simular y determinar con Revit 2017 la iluminación de las oficinas del caso base (basecase).

Para las pruebas de simulación con Revit 2017, los resultados dieron que se pueden llegar a tener una iluminación de hasta 6,000 luxes, y una mínima de 924 luxes. La NOM-025-STPS-2008 marca que para un área de trabajo de oficinas la iluminación mínima es de 300 luxes y en esta misma norma, la iluminación para el área más especializada de trabajo es de 2,000 luxes en donde se indica que las tareas visuales son de bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados (Secretaría del Trabajo y Prevención Social, 2008).

En la misma Ilustración 24, se muestra la comparación de los resultados de simulación en los cuatro tipos de oficina en donde la más afectada es la Oficina 2 cuya iluminación general es de 6,000 luxes. La Oficina 4 tuvo la iluminación más baja con 1,000 luxes. Ninguna oficina cumple con la NOM-025-STPS-2008 por lo que también se puede notar el usuario tendrá un discomfort lumínico.

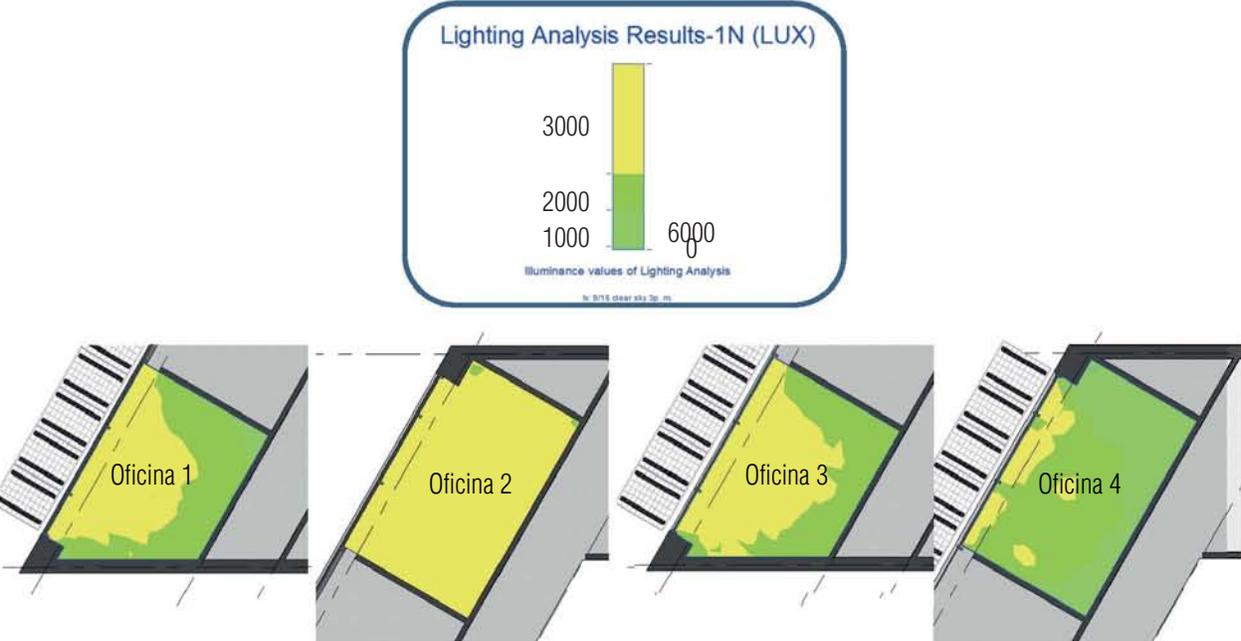


Ilustración 24. Análisis de iluminación en oficinas 1,2,3 y 4

Para la siguiente simulación se eliminaron los paneles fotovoltaicos que estaban siendo usados como protección solar y se colocaron vidrios fotovoltaicos con 10% de transparencia como doble fachada. Ilustración 25. Los resultados de esta simulación son los siguientes:

Los resultados muestran que la mayor parte del área de las oficinas 2 y 4 tienen un rango de 300 luxes, el mínimo de iluminación para una oficina. Para las oficinas 1 y 3 el rango de iluminación sube en un rango de 300 a 1,000 luxes.

La comparación de iluminación entre la primera simulación con los paneles como protección solar y utilizados como doble fachada son de 5,000 luxes. Se tiene un mejor comportamiento de la iluminación con esta forma de colocación.

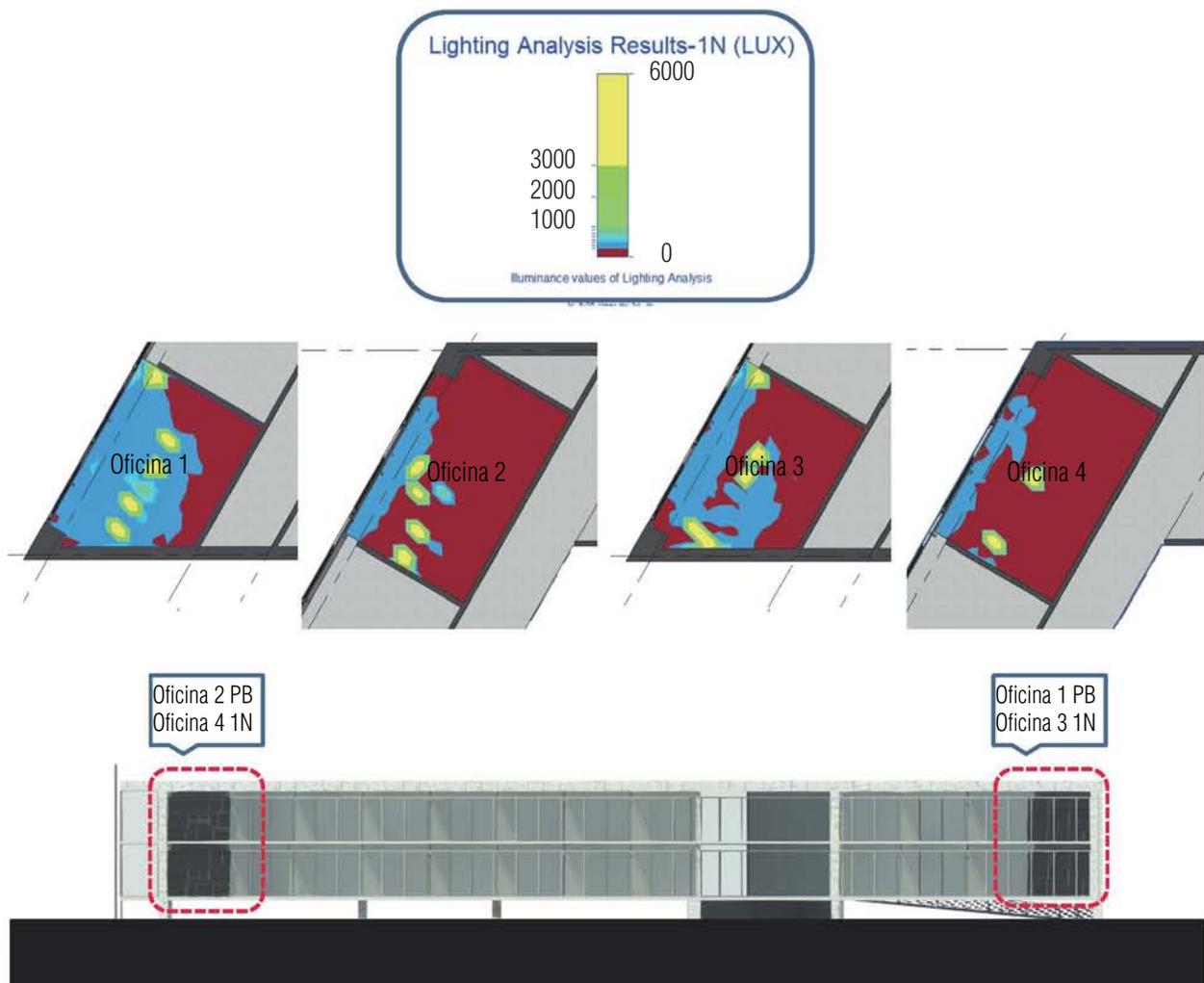


Ilustración 25 . Análisis de iluminación en oficinas 1,2,3 y 4 con doble fachada

8



---

## **8. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA**

---

Se determinó el valor máximo de voltaje por tipo de elemento fotovoltaico, por orientación y tomando en cuenta la irradiación emitida. Estos parámetros ayudan a establecer la cantidad de voltaje que puede producir una fachada con estos elementos.

Las gráficas presentadas de temperatura permiten tener un parámetro térmico con el cual se pueden diseñar doubles fachadas sin que el factor térmico que emiten los paneles fotovoltaicos afecten al edificio.

El conocimiento de la cantidad de iluminación que pueden pasar por los vidrios fotovoltaicos permitirá el ahorro de energía por el aprovechamiento de la iluminación natural. La cantidad de iluminación en cada espacio la fijará la actividad a realizar, con lo que se puede usar el vidrio fotovoltaico con el porcentaje de transparencia adecuado.

Para realizar algún proyecto en donde se integre cualquier tipo de elemento fotovoltaico es necesario concebirlo desde el proceso de diseño. La planeación de estos elementos constituye su correcto funcionamiento.

Es indispensable realizar un estudio de asoleamiento incluyendo el contexto inmediato para evitar pérdida de energía por sombras.

Se destaca el análisis de mediciones que determinan los criterios de diseño para el uso de elementos fotovoltaicos en la Ciudad de México. Es necesario realizar el estudio de la propiedad de los materiales en cada ciudad donde se quiera usar este tipo de elementos o al menos hacer una simulación por medio de un software.

---

# REFERENCIAS

---

Agredano Díaz, J. (2016). Prospectiva de la tecnología solar fotovoltaica para la generación de electricidad. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de [http://s5baa09c2994dfc21.jimcontent.com/download/version/1424111524/module/8388893571/name/A7\\_Fotovol.pdf](http://s5baa09c2994dfc21.jimcontent.com/download/version/1424111524/module/8388893571/name/A7_Fotovol.pdf)

Alonso García, M., Ruiz, J., & Chenlo, F. (23 de Mayo de 2005). Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024805001145>

Alonso García, M., Ruiz, J., & Herrmann, W. (11 de Noviembre de 2005). Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105002880>

Asamblea Legislativa del Distrito Federal. (30 de Diciembre de 2015). Asamblea Legislativa del Distrito Federal. Recuperado el 15 de Enero de 2018, de Asamblea Legislativa del Distrito Federal web site: <http://www.aldf.gob.mx/archivo-afa2182ed56e3aebca333d7b68feed36.pdf>

ASHRAE 55. (1992). ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, EUA: GA: America Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Brecl, K., & Topic, M. (30 de Marzo de 2011). Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811100125X>

Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión. (12 de Enero de 2012). Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. Recuperado

el 12 de Agosto de 2016, de Senado de la República: [http://www.senado.gob.mx/comisiones/energia/docs/marco\\_LAERFTE.pdf](http://www.senado.gob.mx/comisiones/energia/docs/marco_LAERFTE.pdf)

Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión. (1 de Julio de 2016). Ley General de Cambio Climático. Recuperado el 20 de Mayo de 2016, de Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_010616.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_010616.pdf)

Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. (2002). Energía Solar Fotovoltaica. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de <https://www.coit.es/file/4245/download?token=F3kPOsFh>

Deloitte. (2015). Certificados de energías limpias. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Deloitte: [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/energy-resources/Certificados\\_Energias\\_Limpias\\_2015.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/energy-resources/Certificados_Energias_Limpias_2015.pdf)

Dereli, Z., Yücedag, C., & Pearce, J. (19 de Julio de 2013). Simple and low-cost method of planning for tree growth and lifetime effects on solar photovoltaic systems performance. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13002491>

Diario Oficial. (2001 de Abril de 2001). NORMA Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Recuperado el 14 de Octubre de 2016, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181648/NOM\\_008\\_ENER\\_2001.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181648/NOM_008_ENER_2001.pdf)

Diario Oficial. (9 de Agosto de 2011). NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.-Envolvente de edificios para uso habitacional. Recuperado el 14 de Octubre de 2016, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM\\_020\\_ENER\\_2011.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf)

Ding, C., Ngo, T., Mendis, P., R., L., & M., Z. (30 de Mayo de 2016). Dynamic response of double skin façades under blast loads. Recuperado el 15 de Agosto de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616302516>

Eke, R., & Demircan, C. (16 de Agosto de 2015). Shading effect on the energy rating of two identical PV systems on a building facade. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15004582>

Eke, R., & Senturk, A. (28 de Abril de 2013). Monitoring the performance of single and triple junction amorphous silicon modules in two building integrated photovoltaic (BIPV) installations. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913002869>

- Enlight. (2017). Obtenido de <https://www.enlight.mx/>
- Escaplés Jover, J. (Noviembre de 2012). Adaptabilidad de la energía solar fotovoltaica sobre fachadas urbanas. Recuperado el 14 de Julio de 2016, de Universidad de Alicante: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/44245/1/tesis\\_francisco\\_javier\\_esclapes.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/44245/1/tesis_francisco_javier_esclapes.pdf)
- Espejo Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en España. NIMBUS, 5-31. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1173549.pdf>
- Estrada Gasca, C., Arancibia Bulnes, C., Dorantes Rodríguez, R., Islas Samperio, J., & Muhlia Velazquez, A. (Mayo de 2005). Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de DocPlayer: <http://docplayer.es/2033814-Vision-a-largo-plazo-sobre-la-utilizacion-de-las-energias-renovables-en-mexico-energia-solar.html>
- Favoino, F., Goia, F., Perino, M., & Serra, V. (19 de Marzo de 2016). Experimental analysis of the energy performance of an ACTIVE, RESPONSIVE and SOLAR (ACTRESS) facade module. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16002310>
- Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica. (2017). FIDE. Recuperado el 29 de Diciembre de 2017, de <http://www.fide.org.mx/>
- Fong, K., & Lee, C. (29 de Enero de 2012). Towards net zero energy design for low-rise residential buildings in subtropical Hong Kong. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912000128>
- Galt Energy. (2017). galt. Obtenido de <http://galt.mx/>
- Gobierno de la República. Secretaría de Energía. (20 de Mayo de 2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Gobierno de la República. Secretaría de Energía: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf>
- Han, J., Lu, L., Peng, J., & Yang, H. (15 de Agosto de 2012). Performance of ventilated double-sided PV facade compared with conventional clear glass facade. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004215>
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo . (2007). Confort térmico. ERGA-Noticias, 4.
- Islas Samperio, J., Sánchez Juárez, A., Manzini Polo, F., Grande Acosta, G., Carrasco Gonzalez, F., & Zenon Olvera, E. (12 de Mayo de 2016). Potencial de los sistemas fotovoltaicos en México. Análisis de los sectores residencial, público e industrial por entidad federativa. Obtenido de

DocPlayer: <http://docplayer.es/14574526-Potencial-de-los-sistemas-fotovoltaicos-en-mexico.html>

Kapsis, K., & Athienitis, A. (05 de Mayo de 2015). A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15000869>

Li, D., & Wong, S. (25 de Julio de 2007). Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. Recuperado el 15 de Agosto de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261907000694>

México, Gobierno de la República. (Diciembre de 2013). Reforma Energética. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de [http://reformas.gob.mx/wp-content/uploads/2014/04/Explicacion\\_ampliada\\_de\\_la\\_Reforma\\_Energetica1.pdf](http://reformas.gob.mx/wp-content/uploads/2014/04/Explicacion_ampliada_de_la_Reforma_Energetica1.pdf)

Mundo Hernández, J., de Celis Alonso, B., Valerdi Nochebuena, M., & Sosa Oliver, J. (31 de Diciembre de 2012). Integración de sistemas de energía solar fotovoltaica en el edificio de oficinas del ZAE en Alemania. Recuperado el 9 de Mayo de 2016, de Revistas Universidad del Bío-Bío: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/421/383>

Olivieri, L., Camaño-Martin, E., Moralejo-Vázquez, F., Martín-Chivelet, N., Olivieri, F., & Neila-Gonzalez, F. (16 de Mayo de 2015). Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214009906>

Orioli, A., & Di Gangi, A. (12 de Septiembre de 2013). Review of the energy and economic parameters involved in the effectiveness of grid-connected PV systems installed in multi-storey buildings. Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913006491>

Pareja, A. M. (2010). Energía solar fotovoltaica. En A. M. Pareja, Energía solar fotovoltaica (pág. 316). Barcelona: Marcombo.

Peng, J., Curcija, D., Lu, L., Selkowitz, S., Yang, H., & Zhang, W. (11 de Abril de 2016). Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915016475>

RENAC renewables academy. (2016). Energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable global. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de RENAC México: [http://www.renacmexico.com/fileadmin/user\\_upload/Download/RENAC\\_Mexico/Introduccion\\_fotovoltaica.pdf](http://www.renacmexico.com/fileadmin/user_upload/Download/RENAC_Mexico/Introduccion_fotovoltaica.pdf)

Secretaría del Trabajo y Prevención Social. (30 de Diciembre de 2008). NORMA Oficial

Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Recuperado el 6 de Noviembre de 2017, de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-025.pdf>

SENER Secretaría de Energía. (2014). Prospectiva de Energías Renovables 2014-2028. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de Gobierno de la República. Secretaría de Energía: [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62945/Energ\\_as\\_Renovables\\_2014-2028.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62945/Energ_as_Renovables_2014-2028.pdf)

Silvestre, S., & Chouder, A. (14 de Septiembre de 2007). Effects of shadowing on photovoltaic module performance. Recuperado el 14 de Agosto de 2016, de Wiley Online Library: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.780/abstract>

Tae Chae, Y., Kim, J., Park, H., & Shin, B. (30 de Abril de 2014). Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914004693>

Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). Energía solar disponible. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de Geofísica UNAM: [http://www.geofisica.unam.mx/radiacion\\_solar/archivos/energia\\_solar1.pdf](http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar/archivos/energia_solar1.pdf)

Valencia, C. D. (8 de Octubre de 2015). Aplicaciones de films y nanocoatings como mejora activa y pasiva en la integración fotovoltaica en edificios. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de UVA Biblioteca Universitaria: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/3525>