



**“Modelado de un colector termo solar mediante BGNN”**

# Proyecto de investigación

Por

**Mario de Jesús Basilio Contreras**

En cumplimiento a los requerimientos para la obtención de

la Especialidad de Tecnólogo en Mecatrónica

Revisor académico: Guillermo Ronquillo Lomelí

Santiago de Querétaro, Qro., México, mayo 14, 2021.

## Contenido

1	Introducción .....	1
2	Planteamiento del problema .....	3
3	Objetivo .....	4
3.1	Objetivo general .....	4
3.2	Objetivos específicos .....	4
4	Justificación .....	5
5	Antecedentes .....	6
5.1	Antecedentes de la energía solar térmica y sus tecnologías. ....	7
5.2	Colectores termosolares .....	10
5.2.1	Colectores termo solares sin concentración solar. ....	12
5.2.2	Colectores termo solares con concentración solar. ....	17
5.3	Factores que afectan la energía solar. ....	22
5.3.1	Radiación solar: conceptos y expresiones de medida.....	25
5.3.2	Motivos de alteraciones de la radiación solar en la tierra.....	27
5.4	Redes neuronales artificiales: predicción de sistemas solares. ....	33
5.4.1	Generalidades sobre redes neuronales artificiales. ....	33
5.5	Técnicas de modelado y simulación para colectores termo solares.....	36
6	Metodología .....	41
6.1	Análisis térmico de los colectores termo solares. ....	41

6.2	Curva característica de los colectores termo solares.....	44
6.3	Red neuronal Bayesian-Gaussian.....	45
6.3.1	¿Cuál es la distribución de probabilidad de $Y(\mathbf{X})$ cuando se conoce una única fuente de información $\mathbf{X}_i, \mathbf{y}_i$ ?.....	45
6.3.2	¿Cuál es la distribución de probabilidad de $Y(\mathbf{X})$ cuando se conoce la fuente de información combinada $\mathbf{X}_i, \mathbf{y}_i, i = 1, \dots, N$ ?.....	47
6.3.3	El modelo de razonamiento Bayesiano-Gaussiano .....	47
6.3.4	La red neural Bayesiano-Gaussiana y su algoritmo de entrenamiento.....	50
7	Resultados .....	53
7.1	Banco de pruebas para sistemas termo solares y sus componentes .....	53
7.1.1	Estación Solarimétrica. ....	54
7.1.2	Estación Meteorológica.....	57
7.1.3	Circuito hidráulico de recirculación.....	58
7.1.4	Pruebas y resultados.....	60
8	Conclusiones .....	64
9	Bibliografía.....	66

## Índice de Figuras

Figura 1. Demanda total de energía solar. Fuente: Datos de la IEA (IEA, Technology Roadmap Concentrating Solar Power, 2010).....	8
Figura 2. Evolución de los colectores solares. Fuente: Renewables 2017 Global Status Report. (REN21, 2017) .....	9
Figura 3. Aumento de la cantidad de CSP para la producción de electricidad. Fuente: (IEA, Technology Roadmap Solar Thermal Electricity, 2014). .....	9
Figura 4. Diagrama de una aplicación SHIP. Fuente: (Payback, 2017). .....	10
Figura 5. Clasificación de colectores solares térmicos. Fuente: (Payback, 2017).....	11
Figura 6. Colector de placa plana de vidrio. Fuente: (Suman, Khan, & Pathak, 2017). .....	13
Figura 7. Colectores parabólicos compuestos (CPC). Fuente: (Suman, Khan, & Pathak, 2017). .....	15
Figura 8. Colector de tubos evacuados (CTE). Fuente: (Hussein, Li, Kolsi, Kata, & Sahoo, 2017).....	16
Figura 9. Colectores de canales parabólicos. Fuente: (Islam, Hasanuzzaman, & Rahim, 2015). .....	18
Figura 10. Reflector lineal de fresnel. Fuente: (Suman, Khan, & Pathak, 2017).....	19
Figura 11. Reflector de disco parabólico. Fuente: (Hijazi, Mokhiamar, Elsamni, & Alexandria Eng, 2016). .....	20
Figura 12. Reflector de campo del heliostato. Fuente: (Hussain, Ménézo, & Kim, 2018). .....	21
Figura 13. Visualización de plataforma “EIE” de Google para la Ciudad de México de emisiones de dióxido de carbono en edificios, transporte y potencial solar para tejados. Fuente: (Google, s.f.).....	23

Figura 14. Visualización del potencial estimado para instalaciones de captación de energía solar de la Ciudad de México en plataforma “EIE” de Google. Fuente: (Google, s.f.) .....	24
Figura 15. Visualización de potencialidad de energía solar (Irradiación promedio) en el municipio de Querétaro con valores del SIGER. Fuente: (Rodrigues Barbalho) .....	25
Figura 16. Grafica de irradiancia e irradiación solar durante el transcurso del día. Fuente: (Renovables, 2019).....	26
Figura 17. Representación de la declinación solar de la Tierra. Fuente: Radiación solar. (Remer, s.f.).....	28
Figura 18. Grafica de modelo espectral de irradiación directa y difusa para una altitud de 60°. Fuente: (rammb.cira, s.f.).....	29
Figura 19. Representación gráfica sobre las coordenadas geométricas latitud y longitud en la Tierra. Fuente: (maralboran, 2017) .....	31
Figura 20. Representación del desplazamiento del Sol según la hora del día y la estación del año. Fuente: (ideam, s.f.).....	32
Figura 21. La neurona biológica. Fuente: (Caicedo Bravo & López Soterlo, Julio 2017).....	34
Figura 22. Modelo de neurona artificial. Fuente: (Caicedo Bravo & López Soterlo, Julio 2017) .....	35
Figura 23. Curvas de eficiencia a $G=1000 \text{ W/m}^2$ para una variedad de colectores solares. Fuente: (Moss, y otros, 2018).....	44
Figura 24. Esquema de Red Neuronal Bayesian-Gaussian.....	50
Figura 25. Planta de ensayos para sistemas solares de CIDESI, sede Querétaro. Fuente: (Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, s.f.) .....	54
Figura 26. Ilustración de piranómetro modelo SR20 (a) y pirheliómetro modelo DR03 (b). Fuente: a) (Wikipedia, 2020), b) (Sensovant, 2016).....	55

Figura 27. Sensores RTD PT100: (a) Cabeza marina y (b) Escudo de radiación 41303-5B. Fuente: a) (Sensors, s.f.) [34], b) (Campbell Scientific, s.f.) .....	56
Figura 28. Sensor anemómetro marca WindSonic M. Fuente: (Ltd, s.f.) .....	57
Figura 29. Estructura del montaje de pruebas a colector termo solar de CIDESI, sede Querétaro. Fuente: (Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, s.f.) .....	58
Figura 30. Esquema de banco de pruebas de colectores de plataforma solar del LESES (Laboratorio de estudios sobre energía solar, UTN FR Buenos Aires, Argentina). Fuente: (Haim & Nores Pondal).....	59
Figura 31. Esquema del modelo de un colector solar basado en una red BGNN.....	60
Figura 32. Estimación de la potencia generada por el colector solar del modelo. ....	63

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores de primera prueba a colector termo solar.....	61
Tabla 2. Valores de segunda prueba a colector termo solar. ....	62

# 1 Introducción

Los temas de mejoramiento y aprovechamiento de recursos permean entre las instituciones relacionadas a las tecnologías de las energías renovables. A través de los años, nuestro planeta ha tenido cambios en muchos aspectos: poblacionales, económicos, climatológicos, que a su vez desencadenan ciertas necesidades para la sociedad, y que naturalmente, abren un abanico de posibilidades y responsabilidades para quienes buscan soluciones; abriendo oportunidades de ofrecer una mejor vida frente a estos cambios constantes.

Con el mencionado cambio poblacional en forma de crecimiento, se interpreta fácilmente un mayor (y muchas veces desproporcionado) requerimiento de energía para la subsistencia de la población mundial con las necesidades que esta conlleva. Y entonces dentro de este contexto, se comprende la razón de los cambios climatológicos (en forma del fenómeno conocido como calentamiento global) ocasionados por la generación de energía a partir de la utilización de combustibles fósiles, incrementando la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Ante esta problemática establecida, dentro de este proyecto de investigación se aborda inmiscuirse en el campo de la energía solar y su aprovechamiento mediante el uso de colectores termo solares. El uso a largo plazo de estos sistemas ofrece una opción atractiva económicamente hablando para el usuario. Consecuentemente, para la contraparte requiere un diseño de alta precisión para garantizar las ventajas que ofrece esta tecnología emergente.

Un colector termo solar consume las irradiaciones solares y las transmuta en calor, que luego se transfiere al fluido de trabajo (puede ser aire o agua). La energía térmica así recogida, será ejecutada por el fluido de trabajo y podrá ser utilizada directamente para alimentar el agua o

cualquier equipo de calefacción/refrigeración de espacios. (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019).

Por tal motivo, el principal desafío a considerar será la eficiencia que puedan cubrir estos equipos de concentración solar. Conociendo de forma general el principio de funcionamiento de estos equipos mencionado en el párrafo anterior, se puede deducir que el primer objetivo será captar de forma eficiente la mayor irradiación solar posible. Sin embargo, al estar presentes en la atmosfera los gases de efecto invernadero esta irradiación variara inequívocamente y a su vez existirán factores geográficos, climatológicos, entre otros, que se sumarán en la atenuación de los rayos solares para la captación de los equipos.

Además de describir estos factores, el informe incluye una revisión de forma general a la actualidad de la energía solar térmica y sus tecnologías, el tipo de colectores existentes en el mercado, así como las plataformas (también llamado bancos de prueba) donde se puedan realizar ensayos de eficiencia para estos equipos.

Dentro de la metodología, se detallan las variables a considerar para el análisis térmico de los colectores según su tipo, además de las técnicas utilizadas para el modelado y simulación, incluyendo la estructura del modelo de red neuronal artificial propuesto.



## 2 Planteamiento del problema

En el presente, se pretende obtener y presentar criterios de desempeño de un colector termo solar con la herramienta de predicción y modelado mediante redes neuronales artificiales.

Sin embargo y para evaluar correctamente el desempeño del colector, previamente se deben considerar el estado de los componentes del sistema; así como condicionantes meteorológicas y geográficas que puedan afectar la calidad de medición y el aprovechamiento de la energía concentrada en el colector a analizar.

Si bien anteriormente se han realizado estudios de modelado y predicción de sistemas de energía solar, se considera pertinente proponer una técnica alternativa con una estructura de modelo capaz de afrontar las variables complejas o mal especificadas antes mencionadas, obteniendo resultados esperados o satisfactorios, adicionalmente es necesario buscar técnicas de modelado flexibles con algoritmos de entrenamiento de fácil entrenamiento y con características que permitan la auto sintonización en línea.

## **3 Objetivo**

### **3.1 Objetivo general**

Modelar el desempeño de un colector termo solar utilizando metodologías basadas en datos para la predicción de sistemas de energía solar mediante redes neuronales artificiales.

### **3.2 Objetivos específicos**

1. Documentar banco de pruebas para la evaluación del colector termo solar.
2. Seleccionar datos de las pruebas experimentales realizadas a un colector termo solar.
3. Determinar variables para el modelado del sistema.
4. Calcular variables del colector termo solar como: energía generada, desempeño, o eficiencia.
5. Proponer una estructura del modelo y predicción de parámetros mediante redes neuronales artificiales.
6. Obtener modelo del colector termo solar a partir de datos experimentales del colector termo solar.
7. Evaluar y discutir los valores obtenidos del colector termo solar mediante la estructura del modelo de redes neuronales artificiales.

## 4 Justificación

Considerando el constante cambio climatológico, así como el desarrollo y demanda de nuevos procesos industriales en la actualidad, es fundamental involucrarse en la estabilidad y crecimiento de las energías renovables, propiamente de la energía solar térmica.

Sin embargo, la inversión inicial en un campo tecnológico solar es entendiblemente alta debido a la complejidad en el diseño, fabricación y calibración de sus componentes y sus procesos. Así como en la certificación de los servicios y productos que cualquier empresa proveedora esté interesada en ofrecer al mercado.

Es por ello, que para que este producto tecnológico se mantenga viable dentro del mercado, cobrando mayor relevancia y proyección, debe contar con un respaldo que garantice una pronta y visible recuperación monetaria; maximizando aspectos técnicos de eficiencia y captación de la energía solar. Esta colaboración puede ser atendible mediante el uso de redes neuronales artificiales; para predecir resultados presupuestados, en este caso, en el análisis del desempeño de colectores termo solares.

Por otro lado, tomando en cuenta factores como las variadas disposiciones geográficas a lo largo y ancho de nuestro planeta, así como las variabilidades climatológicas inevitables a lo largo del año; la eficiencia de estos equipos y servicios tecnológicos emergentes puede variar sistemáticamente. En la búsqueda de actualizarse y superar estas variables, se tiene la consigna de mejorar el control inteligente de los equipos.

Una evaluación económica de este tipo de sistemas solares para diferentes sectores industriales incluye el período de recuperación. Este parámetro se calcula comúnmente en base al combustible ahorrado debido a la instalación del sistema solar. Algunos estudios realizados en

diferentes partes concluyen que los sistemas termo solares son rentables debido al aumento de los precios de los combustibles y el período de recuperación se encuentra en seis años aproximadamente.

Siguiendo esa misma línea, se considera necesario el modelado de colectores termo solares, que además de permitir una mayor comprensión del proceso, sea capaz de predecir el comportamiento del sistema frente a distintos escenarios posibles y esto ayude a una mejor toma de decisiones.

## **5 Antecedentes**

La investigación referida en cuanto al desempeño de colectores solares térmicos y su metodología, engloba diferentes perspectivas a considerar; inicialmente precisar la actualidad del aprovechamiento de la energía solar en el mundo y propiamente en nuestro país, México, así como concientizar desde un punto de vista conceptual a las tecnologías “limpias” bajo la importancia de una permanente proyección de cara al constante cambio climático, económico, social y cultural. Constantes de una innegociable realidad.

Propiamente, es pertinente fundamentar los tópicos relacionados al tema propuesto, exponiendo las características y el tipo de colectores solares térmicos disponibles según sus requerimientos para los sectores industriales o de servicios, describiendo la funcionalidad de aquellos sistemas de pruebas experimentales en cuanto al desempeño de colectores solares térmicos. Asimismo, mostrando a detalle las condicionantes geográficas y meteorológicas inherentes al campo de estudio en cuestión.

Conocidas estas condiciones y para predecir el comportamiento de los sistemas térmicos, se acude a un apartado referente del control inteligente, extensión de la ingeniería de control automático, mediante técnicas de predicción y modelado de sistemas de energía solar; se sienta un análisis a priori del uso de redes neuronales artificiales; como una herramienta alternativa para un mayor rendimiento de colectores termo solares.

### **5.1 Antecedentes de la energía solar térmica y sus tecnologías.**

Antecedentes de la energía solar térmica y sus tecnologías: Es importante mencionar que, a día de hoy, la tecnología termo solar podría ser considerada madura. Los últimos años, este desarrollo tecnológico se ha ido incrementando a nivel global, como consecuencia a la variación de los precios de combustibles fósiles, así como a las políticas ambientales en el cuidado de protección del clima y su medio ambiente.

Con aproximadamente 885 millones de TWh que inciden en la tierra por año, lo cual escenifica alrededor de 6,200 veces la energía elemental comercial utilizada por el hombre en el 2008 (IEA, Solar Energy Perspectives, 2011).

En la actualidad, se considera al calor solar como contribuyente a la energía total demandada para la generación de calor. En el año 2010, la IEA informó que a nivel mundial el 47% de la energía demandada está vinculada con procesos térmicos (generación de calor); destacando el alto valor del aprovechamiento del recurso solar, sobre todo a niveles industriales. Véase la Figura 1. (IEA, Inteligencia tecnológica, 2010).

Como se aprecia, el consumo de calor sigue estando fuertemente basado en combustibles fósiles. Sólo el 9.8% del calor utilizado en todo el mundo en 2016 se produjo a partir de las energías renovables modernas, incluida la electricidad generada de forma renovable

(Renewables, 2017). Sin embargo, cada vez se valora más el papel que las energías renovables en forma de tecnología solar, mediante la generación de energía no solo eléctrica, sino también para aplicaciones de calor e incluso regeneración.

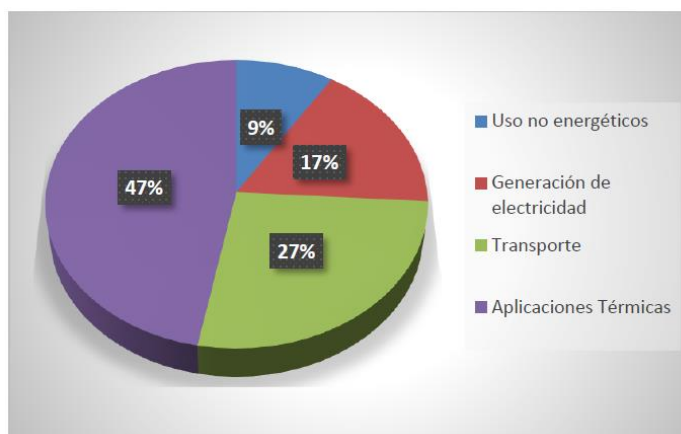


Figura 1. Demanda total de energía solar. Fuente: Datos de la IEA (IEA, Technology Roadmap Concentrating Solar Power, 2010).

La tecnología solar permite convertir la energía solar en calor, el cual se transporta mediante líquidos especiales para poder ser utilizado en diferentes procesos.

Cabe mencionar que para la preparación de agua caliente existen dos tecnologías: colectores cubiertos (planos y tubos evacuados) y colectores no cubiertos.

Según el informe del REN21, en 2016 se contaba a niveles internacionales, la cantidad de colectores para generar 456 GW de energía termo solar para agua caliente (REN21, 2017). La Figura 2 ejemplifica el avance las diferentes tecnologías de los colectores solares.

En relación al sector industrial, la tecnología empleada permite obtener las temperaturas requeridas en el intervalo de 60 a 280°C, e incluso alcanzando los 400°C (González Cabrera, García Saldivar, C: , García Valladares, & Pilatowsky Figueroa, 2017).

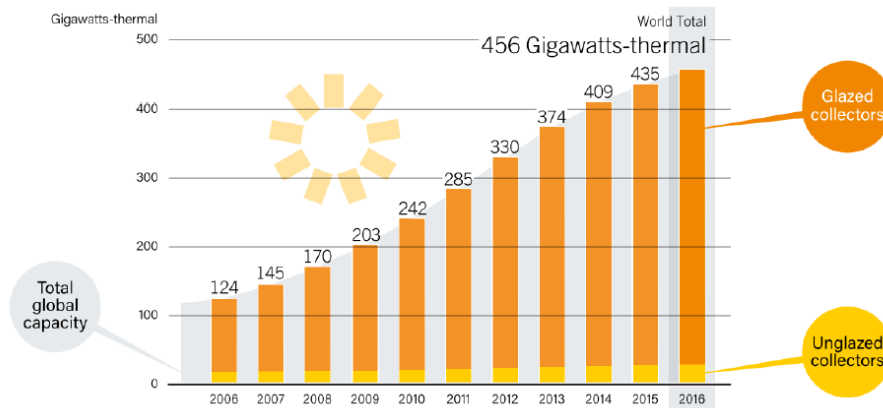


Figura 2. Evolución de los colectores solares. Fuente: Renewables 2017 Global Status Report. (REN21, 2017)

Los componentes que conforman los colectores termo solares se dividen en equipos sin concentración, por ejemplo, los colectores planos, y de concentración, por ejemplo, los sistemas parabólicos compuestos, de canales parabólicos, concentradores tipo fresnel etc.

La Figura 3 ejemplifica el impacto y la tasa de aumento de la capacidad establecida en campos de colectores solares de concentración para la producción de energía eléctrica.

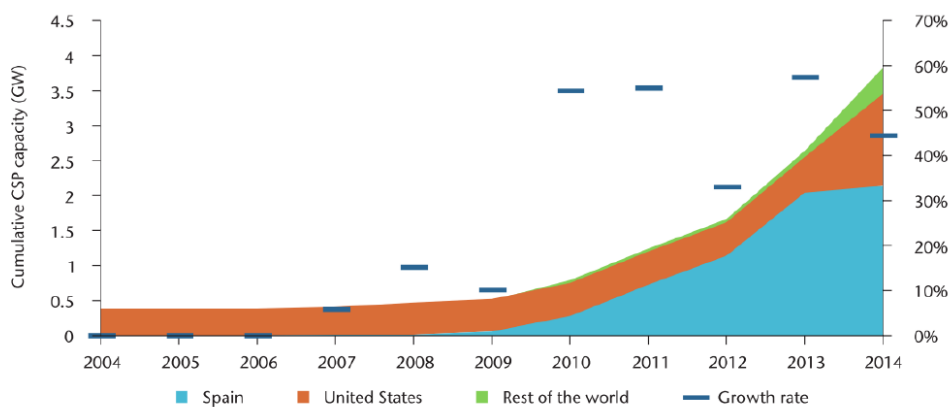


Figura 3. Aumento de la cantidad de CSP para la producción de electricidad. Fuente: (IEA, Technology Roadmap Solar Thermal Electricity, 2014).

Según el informe de REN21 (REN21, 2017) en 2016 se anexaron 110 MW de capacidad CSP, con lo que la capacidad establecida logró alcanzar los 4.8 GW alrededor del planeta. (IEA, Inteligencia tecnológica, 2010).

## 5.2 Colectores termosolares

Los colectores termo solares transformar los rayos solares en calor aprovechable. La ilustración de la Figura 4 muestra una planta SHIP (Solar Heat for Industrial Processes por sus siglas en inglés) para un cierto número de captadores solares que operan el fluido del proceso y los intercambiadores de calor transmiten este valor a otro proceso productivo en la planta, en forma de agua caliente, flujo de aire o vapor.

Durante el día y con cielos despejados, el colector eleva la temperatura del líquido de transmisión térmica (ya sea aire, agua, aceite térmico, etc.). Los colectores están acoplados al proceso de producción o a un tanque de almacenamiento, directamente o a mediante un intercambiador de calor.

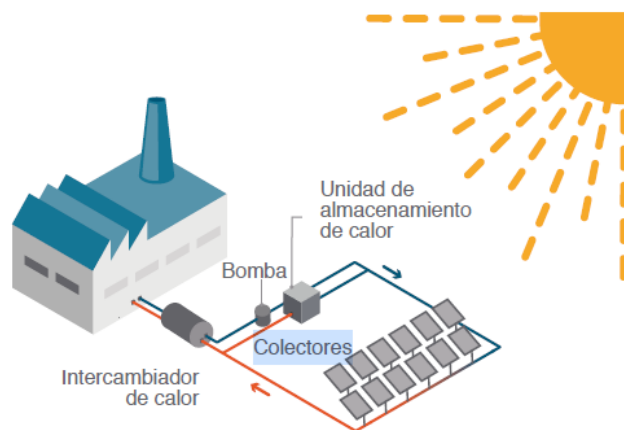


Figura 4. Diagrama de una aplicación SHIP. Fuente: (Payback, 2017).



Los colectores se pueden catalogar como estáticos y de seguimiento. Los colectores estáticos se encuentran dirigidos a una posición de referencia solar sobre bases fijas.

Las aplicaciones son catalogadas según al tipo de captador termo solar (IEA, Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling., 2012):

- Colector termo solar sin concentración solar
- Colector termo solar con concentración solar

Los colectores sin concentración tienen una zona similar de captación y absorción de calor, mientras que los colectores con concentración poseen exteriores reflectantes cóncavos para captar y enfocar la radiación solar a una zona de captación reducida, lo que da lugar a un aumento de la radiación/flujo de calor.


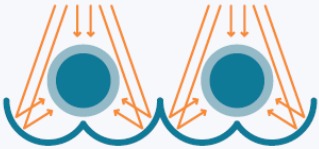
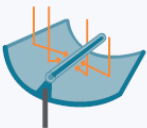
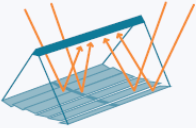

<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Colector de placa plana (CP)</li> <li>+ Colector de tubos evacuados (CTE)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Colector de tubos evacuados con concentrador parabólico compuesto (CPC)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Colector cilíndrico-parabólico</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Colector Fresnel lineal</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Colector de plato parabólico</li> </ul>	

Figura 5. Clasificación de colectores solares térmicos. Fuente: (Payback, 2017).

En la Figura 5 se muestra mediante un mapa conceptual, la clasificación de estos colectores. A continuación, se describen los diversos tipos de colectores solares térmicos en términos generales de diseño, orientación, importancia y factores que puedan afectar su eficiencia térmica.

La adecuada selección entre una u otra tecnología de colectores tiene que ver en buena parte de los requerimientos térmicos del proceso. Se consideran, además de la temperatura, como factores más importantes para la selección del tipo de tecnología solar para procesos industriales los siguientes:

- La temperatura de servicio específica del captador cumpla con los requerimientos para el calor demandado en el proceso industrial
- El diseño debe ser idóneo para el fluido calo conductor seleccionado
- Certificaciones de acuerdo a estatutos nacionales e internacionales
- Rentabilidad energética certificada por una tercera parte acreditada
- Adecuada resistencia a la presión
- Uso conveniente del estancamiento y predisposición del sobrecalentamiento
- Costo de la aplicación (Ortega & (GIZ), 2018).

### *5.2.1 Colectores termo solares sin concentración solar.*

Los colectores no concentrados están dispuestos de tal manera que pueden ampliar la colección de radiación solar. La ubicación de estos colectores se establece en una inclinación y ángulos de orientación específicos, que dependen de la latitud geográfica (Suman, Khan, & Pathak, 2017). Generalmente, los colectores térmicos solares no concentrados se clasifican en tres tipos:

- Colectores de placa plana (CPP)
- Colectores parabólicos compuestos estacionarios (CPC)
- Colectores de tubo evacuado (CTE)

### **Colectores de placa plana (CPP)**

Los colectores de placas planas son el tipo de colectores que pueden recoger ambos tipos de radiaciones directas y difusas. Estos pueden clasificarse además como colectores de placa plana de vidrio y sin vidrio. El colector de placa plana de vidrio contiene una protección de vidrio compuesta por una o varias capas de vidrio o cualquier material difusor de radiación, el tubo, las aletas, la placa absorbente puede ser lisa o estriada a la que se unen los tubos y las aletas, la capa aislante y otros auxiliares como se muestra en la Figura 6.

En este tipo de colectores, cuando la energía solar incidente se transmite sobre una cubierta cristalina y golpea sobre la zona oscura del absorbedor. El absorbedor absorbe un porcentaje considerablemente más significativo de la energía y luego pasa al líquido que circula por los tubos. Mientras que en los colectores solares sin vidrio no hay ninguna capa de vidrio o ningún material transmisor radiante.

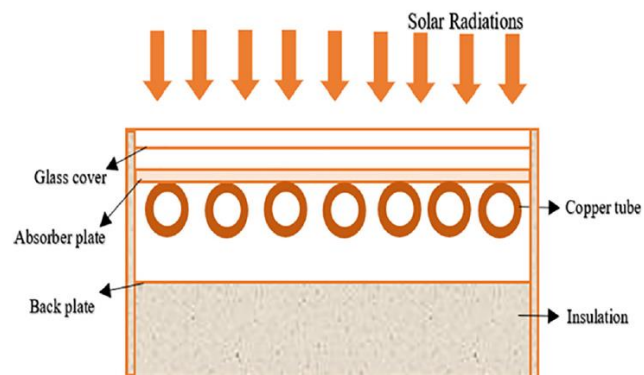


Figura 6. Colector de placa plana de vidrio. Fuente: (Suman, Khan, & Pathak, 2017).

El coeficiente de pérdida global determina la eficiencia térmica de los colectores de vidrio y sin vidrio. Incluye las pérdidas térmicas por conducción, convección y radiación. Para aumentar la eficiencia térmica global, es muy esencial minimizar estas pérdidas térmicas del colector (Suman, Khan, & Pathak, 2017). Generalmente, las pérdidas térmicas por convección y radiación desde la placa del panel absorbente al aire exterior se reducen mediante un escudo de vidrio en la parte superior del colector. Las pérdidas de conducción dependen del material de la estructura. Mientras que, en un colector sin vidrio, al no haber cubierta de vidrio, se producen más pérdidas de convección, pero no hay pérdidas ópticas en los colectores sin vidrio. Para minimizar aún más las pérdidas de calor, ambos colectores están protegidos tanto por los lados como por la parte inferior (Pandey & Chaurasiya, 2017).

La eficiencia del CPP depende de la relación de aspecto (longitud/anchura), y con el aumento de la relación de aspecto del colector, la eficiencia térmica también aumenta para un área constante del colector (Yeh & Lin, 1995). Para maximizar el potencial de la energía solar, el CPP debe estar ubicado adecuadamente. La orientación de los colectores debe ser en la dirección del ecuador, frente al norte en el hemisferio sur y al sur en el hemisferio norte. La posición óptima de inclinación equivale al ángulo de latitud geográfica del lugar con variaciones de 10-15°, pero todo depende de la aplicación del calor térmico solar (Kalogirou, The potential of solar industrial process heat applications, 2003).

### **Colectores parabólicos compuestos estacionarios (CPC)**

Como se muestra en la Figura 7, los CPC están típicamente protegidos con vidrio para protegerlos del polvo y de los materiales exteriores que afectan negativamente a su rendimiento y a la reflectividad de sus paredes (Suman, Khan, & Pathak, 2017). Los concentradores lineales o

de tipo canaleta en el CPC son generalmente útiles y pueden absorber las radiaciones incidentes en un amplio rango de ángulos.

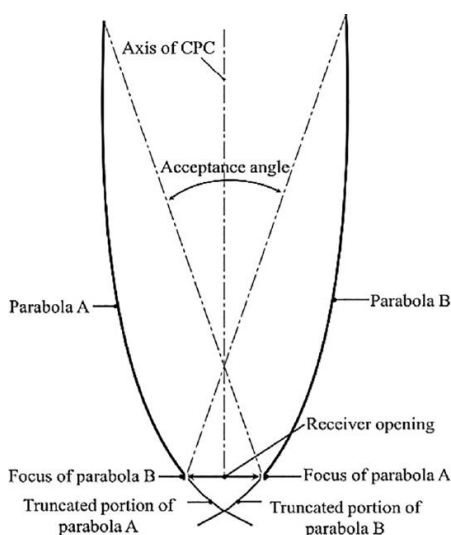


Figura 7. Colectores parabólicos compuestos (CPC). Fuente: (Suman, Khan, & Pathak, 2017).

La posición del colector del CPC depende del ángulo de recepción (Rönnelid, Perers, & Karlsson, 1996). Se han diseñado dos tipos básicos, a saber, el simétrico y el asimétrico de los colectores CPC. Estos tipos suelen constar de las dos principales categorías de absorbedores, es decir, el modelo de tipo aleta con tubos y absorbedores tubulares (O'Gallagher, Snail, Winston, Peek, & Garrison, 1982) (McIntir, 1980). En el CPC, la eficiencia óptica se mejora significativamente porque entre la lente y el reflector se forma una brecha de aire. Este espacio de aire reduce las pérdidas ópticas debido a la reflexión interna total (Mills & Giutronich, 1978) (Guiqiang, Gang, Yuehong, Yunyun, & Jie, 2014).

### **Colectores de tubos evacuados (CTE)**

Como se muestra en la Figura 8, estos colectores consisten en un tubo de cobre sellado que está conectado a una aleta de cobre oscuro que carga el tubo absorbedor (Hussein, Li, Kolsi,

Kata, & Sahoo, 2017). La punta metálica que sobresale de la parte superior del tubo está conectada al tubo hermético (condensador). Por lo general, el tubo caliente consiste en un fluido que lleva a cabo un ciclo de condensación y evaporación. Cuando se reciben las radiaciones solares, el fluido dentro del tubo caliente cambia su fase en vapor. Cuando el calor se transmite al fluido, el vapor se condensa de nuevo al fluido y, bajo la gravedad, fluye hacia el fondo del tubo (Suman, Khan, & Pathak, 2017) (Engeland, y otros, 2017).

De manera similar, la eficiencia térmica global del CTE está vinculada con el coeficiente de pérdida global que incluye las pérdidas térmicas por conducción, convección y radiación. Para aumentar la eficiencia térmica global, es muy esencial minimizar estas pérdidas del colector. Generalmente, las pérdidas de calor por conducción y convección son minimizadas por una tubería de alta temperatura dentro de una tubería sellada al vacío, y debido a que este colector opera a muy alta temperatura con mayor eficiencia.

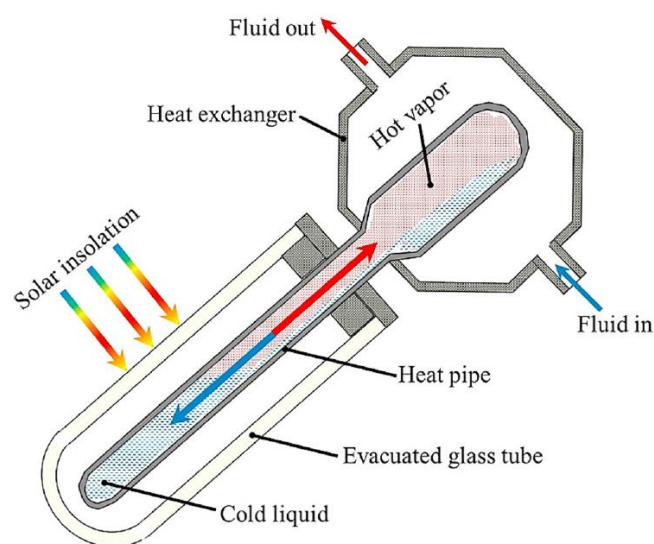


Figura 8. Colector de tubos evacuados (CTE). Fuente: (Hussein, Li, Kolsi, Kata, & Sahoo, 2017).

Además, se proporciona aislamiento entre las cubiertas frontal y posterior debido a este tubo sellado al vacío. En los ángulos de incidencia más bajos, la eficiencia del CTE es mayor y este efecto le da un rendimiento durante todo el día. Por consiguiente, ofrece una vida útil económica y mejorada (Moss, y otros, 2018) (Alam, Singh, Suresh, & Redpath, 2017).

### ***5.2.2 Colectores termo solares con concentración solar.***

La adición de un sistema óptico que conecte las radiaciones solares incidentes y la energía absorbida del exterior puede concentrar las radiaciones incidentes en un área de recolección ligeramente pequeña. Los concentradores pueden ser refractores o reflectores, continuos o no continuos y cilíndricos o parabólicos. Además, el receptor puede ser plano, convexo, cóncavo o cilíndrico y puede ser con cristal o descubierta. En los colectores de concentración, el posicionamiento de un sistema óptico es muy importante debido al movimiento del sol a lo largo del día. Generalmente, los colectores de concentración se clasifican en cuatro:

- Colector de canales (o cilindros) parabólicos (CCP)
- Reflector lineal de Fresnel (RLF)
- Reflector de disco parabólico (RDP)
- Receptor central o reflector de campo del Helioestado (RCH) (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019)

#### **Colectores cilindro-parabólicos (CCP)**

Los colectores cilindro-parabólicos (CCP) se denominan parabólicos porque se fabrican retorciendo el material reflectante en forma de parábola, como se muestra en la Figura 9. Contiene un exterior reflectante parabólico con un tubo absorbedor situado a lo largo de su línea focal. El CCP podría alcanzar una temperatura más alta de hasta 400 °C con una buena eficiencia,

pero también opera eficientemente y produce calor entre 50 y 400 °C. Un tubo de vidrio cubierto por un tubo de metal negro que se encuentra a lo largo de la línea focal del receptor.

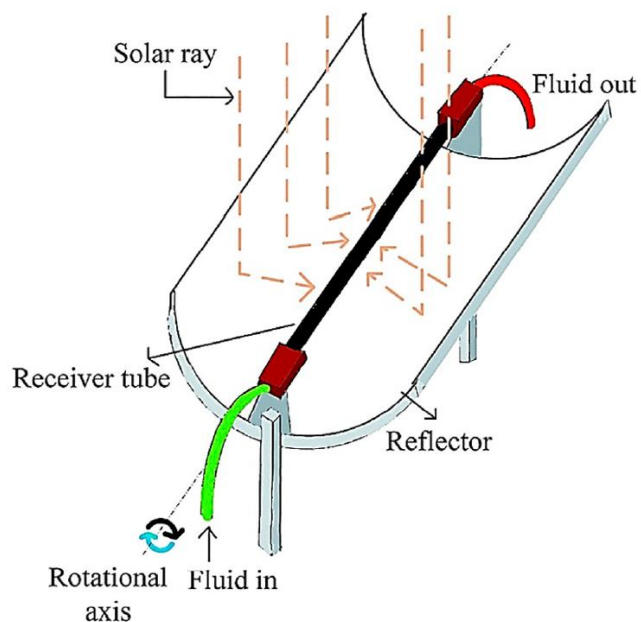


Figura 9. Colectores de canales parabólicos. Fuente: (Islam, Hasanuzzaman, & Rahim, 2015).

El receptor es lineal, y el exterior del receptor está característicamente cubierto con un revestimiento para una gran absorción y baja disipación de la radiación térmica. Por lo general, el tubo recubierto de vidrio se coloca a lo largo del tubo receptor y debido a esto se reducen las pérdidas de convección, y el colector funciona a muy alta temperatura con buena eficiencia. El mecanismo de seguimiento es una parte muy sensible de los colectores solares porque no sólo sigue al sol con un cierto grado de precisión, sino que también protege al colector en caso de condiciones ambientales peligrosas como ráfagas de viento, sobrecalentamiento, etc. Para el CCP, normalmente basta con el seguimiento del sol en un solo eje, y el colector se orienta en la dirección Este-Oeste (E-O), siguiendo la dirección Norte-Sur (N-S) o Norte-Sur siguiendo la dirección Este-Oeste. Sin embargo, es preferible la orientación en dirección N-S con seguimiento



solar E-O porque se requiere un ajuste muy pequeño en el colector y la apertura total siempre apunta a la posición del sol al mediodía.

### **Reflector lineal de Fresnel (RLF)**

El diseño del reflector lineal de Fresno (RLF) consiste en una disposición de tiras lineales que enfocan la luz de a un receptor adjunto dispuesto en una torre lineal. Es como los colectores cilindro-parabólicos rotos, pero su forma no es de parábola como se muestra en la Figura 10 (Suman, Khan, & Pathak, 2017).

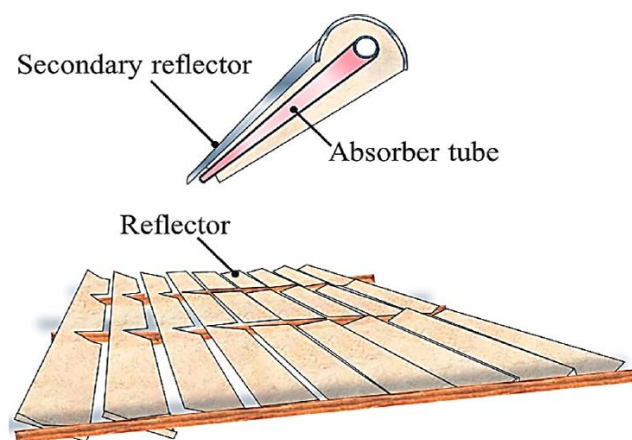


Figura 10. Reflector lineal de fresnel. Fuente: (Suman, Khan, & Pathak, 2017).

El RFL opera con una eficiencia menor y se alcanzan las temperaturas de operación más bajas. Generalmente, estos reflectores son más económicos que el CCP porque se utilizan reflectores planos o elásticamente redondeados que se montan en el suelo, lo que también reduce el costo de montaje. El RLF es fiable y más barato para un rango de temperatura de trabajo de hasta 300 °C (Barlev, Vidu, & Stroeve, 2011). Un gran inconveniente de esta tecnología es que el sistema RLF requiere un gran espacio entre los reflectores para evitar el efecto de sombreado. Sin embargo, esto puede disminuirse elevando la altura de las torres de absorción, pero adoptando esta

disposición, el costo del sistema también aumenta. Este tipo de tecnología es adecuada para zonas desérticas donde el espacio enorme no es un problema (Mills D. , 2004).

### **Reflector de disco parabólico (RDP)**

Es un colector de tipo punto focal en el que el receptor o la unidad de conversión está dispuesto en el punto focal del plato como se muestra en la Figura 11 (Hijazi, Mokhiamar, Elsamni, & Alexandria Eng, 2016). Consiste en un sistema de seguimiento de dos ejes que concentra las radiaciones solares en el receptor. El mecanismo de seguimiento es similar al CCP, y el rayo de luz solar se concentra en el área donde está posicionado el receptor. La disposición es como una antena parabólica. El receptor, después de absorber la radiación, transmite la energía de calor en un fluido circulante a través de un intercambiador de calor. El RDP puede alcanzar rangos de temperatura más altos de más de 1500 °C debido a que su orientación siempre está orientada hacia el sol y también tiene una relación de concentración entre 600 y 2000.

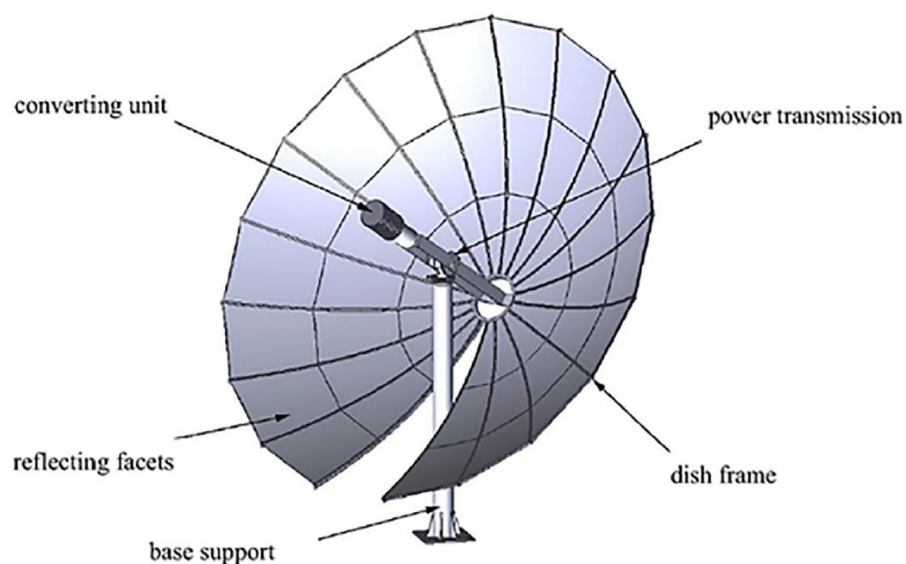


Figura 11. Reflector de disco parabólico. Fuente: (Hijazi, Mokhiamar, Elsamni, & Alexandria Eng, 2016).

### **Receptor central o reflector de campo del Heliostato (RCH)**

Se realizan una serie de múltiples arreglos de espejos planos, dispuestos de tal manera que todos los reflectores reflejan su radiación incidente a un punto común, para obtener una energía radiante de mayor temperatura, dicho campo se conoce como Receptor Central o Reflector de Campo de Heliostatos (RCH) como se muestra en la Figura 12 (Hussain, Ménéz, & Kim, 2018).

En esta disposición, se puede obtener una gran cantidad de energía térmica para obtener el agua o el vapor en ebullición a una temperatura y presión muy superiores. La energía térmica absorbida por el fluido de trabajo puede ser utilizada para la generación de energía térmica industrial o para aplicaciones de calor. El receptor central es muy eficiente para altas temperaturas debido a un solo receptor, llegando a un rango de hasta 2000 °C (Barlev, Vidu, & Stroeve, 2011).

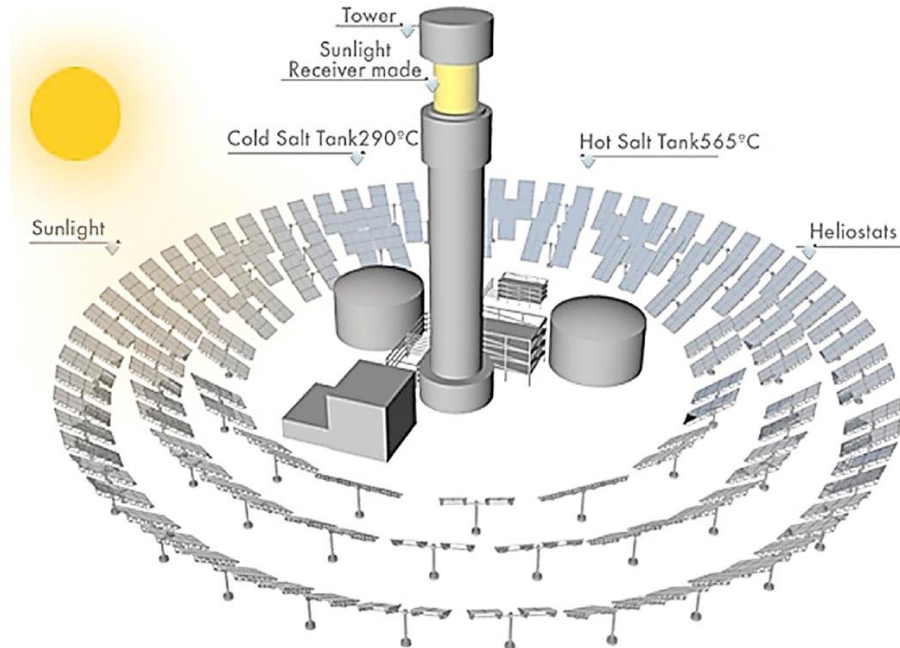


Figura 12. Reflector de campo del heliostato. Fuente: (Hussain, Ménéz, & Kim, 2018).

### **5.3 Factores que afectan la energía solar.**

Mencionadas las diferentes tecnologías de colectores solares, concierne explicar el comportamiento típico de la eficiencia térmica para cada uno de estos sistemas. Para evaluar el desempeño, se muestran los factores para el análisis térmico y de modelización de los colectores solares térmicos.

La energía solar térmica se considera intermitente; esto debido a la imprevisibilidad natural del clima en cuestión de la temperatura en el aire, la densidad, la velocidad del viento, la irradiación solar presente y los cambios de estación durante el año. Por tanto, debido a esta intermitencia en espacio-tiempo se considera almacenar dicha energía proveniente del Sol previamente a ser transformada y redirigida a nuevos procesos industriales o de servicio. En otras palabras, la energía solar térmica que quiera ser almacenada y aprovechada, dependerá exclusivamente de la calidad y cantidad de radiación solar que exista en el lugar donde se encuentre, en este caso, el colector termo solar.

Diversos estudios se han encargado mediante correlaciones en diferentes lugares, zonas y países en todo el mundo de dar a conocer resultados diferentes de radiación solar según la topografía geográfica como altitudes y terrenos. A día de hoy, existen diversas herramientas que ponen al alcance esta información con fines de aprovechamiento de la energía solar.

Recientemente, durante el mes de junio del 2020, Google News Initiative (proyecto informático de innovación de dicha empresa) presentó herramientas de libre y fácil acceso como “Envirolment Insights Explorer (EIE)” y “Sunroof Project” desarrolladas por la misma empresa para explorar y monitorear el impacto ambiental en distintas ciudades y el potencial ahorro energético a partir del uso de paneles solares. (Singh, 2020)

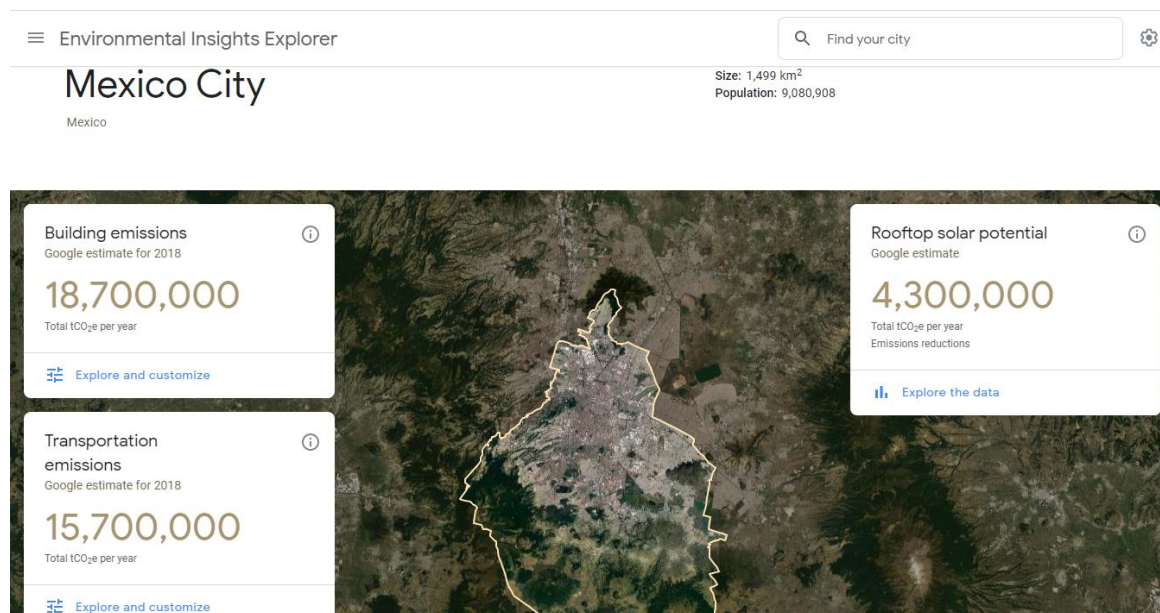


Figura 13. Visualización de plataforma “EIE” de Google para la Ciudad de México de emisiones de dióxido de carbono en edificios, transporte y potencial solar para tejados. Fuente: (Google, s.f.)

En la Figura 13, se muestra una visualización de la herramienta “EIE” con vista satelital de la Ciudad de México. El usuario tiene acceso a la información de los tres parámetros medidos para su interés, priorizando el conocimiento de un posible ahorro de emisiones de dióxido de carbono si se llegara a maximizar el aprovechamiento de la energía solar.

En el apartado de potencial estimado de instalación solar mostrado en la Figura 14, se estima en una cobertura de datos del 80% sobre edificios en el área geográfica mostrada, con un periodo de tiempo anual basado e inspeccionado en mayo de 2013. Los paneles que se incluyen reciben al menos el 75% del máximo sol anual en la ciudad. Para Cd-Mx., el valor promedio del umbral que entrega la plataforma es de 1156.00 kWh/kW. (Google, s.f.)

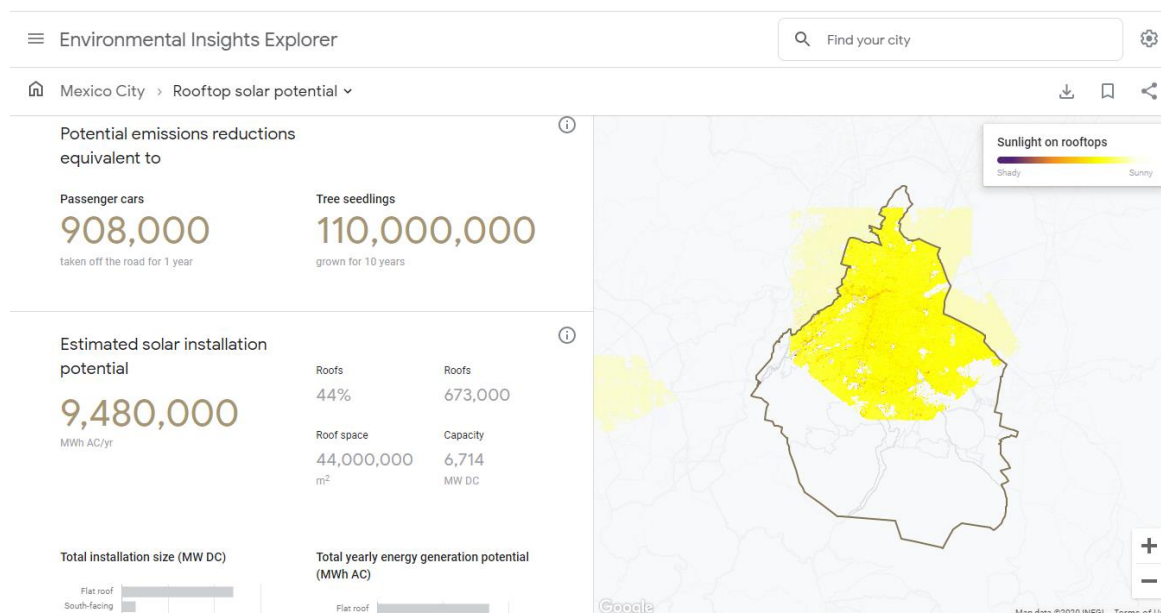


Figura 14. Visualización del potencial estimado para instalaciones de captación de energía solar de la Ciudad de México en plataforma “EIE” de Google. Fuente: (Google, s.f.)

La herramienta arroja como dato principal 4,300,000 toneladas de reducción en emisiones al año en caso de utilizar la energía solar basado en el potencial de la Cd. de México. Además, como muestra la Figura 14, la herramienta proyecta la importancia comparando cantidades de viajes en coche durante un año (908,000) y una cantidad de árboles plantados a diez años (110,000,000) equivaliendo si se aprovechara esta energía solar disponible en la ciudad. (Google, s.f.).

Estos breves ejemplos e ilustraciones mostradas, son demostraciones de los avances que las empresas han tenido con el propósito de alcanzar valoraciones reales en el ámbito de la tecnología solar y de las energías renovables.

Por otro lado, hablando puntualmente a nivel estatal local y según el Sistema Nacional de Información Geográfica de Energías Renovables (SIGER), el municipio de Querétaro está ubicado como una región de magnífico recurso solar para su utilización con fines energéticos

como se aprecia en la Figura 15 , rebasando en toda superficie municipal el valor de 6 kWh/día  $m^2$ , lo cual lo hace factible para proyectos de utilización de la energía solar. (Rodrigues Barbalho)

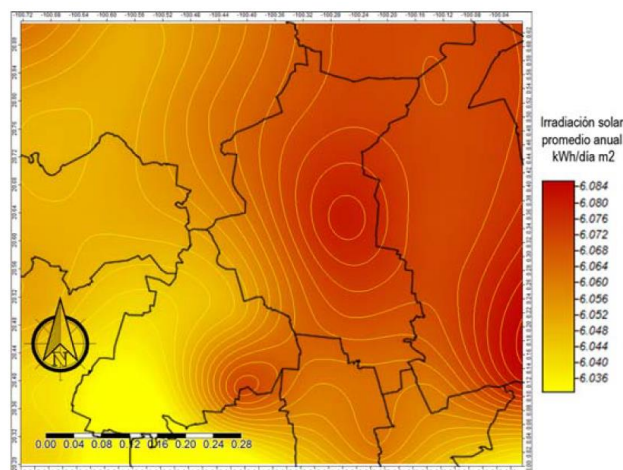


Figura 15. Visualización de potencialidad de energía solar (Irradiación promedio) en el municipio de Querétaro con valores del SIGER. Fuente: (Rodrigues Barbalho)

Entendiendo el alcance real de esta energía solar disponible para su aprovechamiento, abordaremos los conceptos físicos involucrados en el potencial de la radiación solar: Unidades de medida, tipos de irradiación, causas de sus variaciones respecto a la tierra, posicionamiento del sol, atenuaciones en la atmosfera, coordenadas geográficas (latitudes), y ángulos de incidencia del sol respecto a la Tierra.

### 5.3.1 Radiación solar: conceptos y expresiones de medida.

La radiación solar se puede describir como una oleada de energía recibida del Sol en forma de ondas electromagnéticas que proporciona la transmisión de dicha energía a nuestro planeta. Estas ondas electromagnéticas contienen distintas frecuencias y aproximadamente la mitad de las que

recibimos van de rangos de longitud de onda de  $0.4 \text{ } [\mu\text{m}]$  y  $0.7 \text{ } [\mu\text{m}]$ , constituyendo aquello que se conoce como luz visible. (Marengo Moreira, Merino Ruano, & Orellana Castillo, 2017)

Las magnitudes de radiación se expresan de forma general en términos de irradiancia, siendo esta una medida de la corriente de energía percibida por unidad de área en forma instantánea como energía/área-tiempo, donde sus unidades son el Watt sobre metro cuadrado ( $W/m^2$ ). La manifestación radiante es la magnitud de la radiación solar, en la cual dicha radiación se integra en el tiempo como energía/área y cuya unidad es el  $kWh/m^2$  por día (si es integrada en el día) o  $MJ/m^2$  por día. (Radiación Solar, Marzo 2004)

### Irradiancia e Irradiación Solar

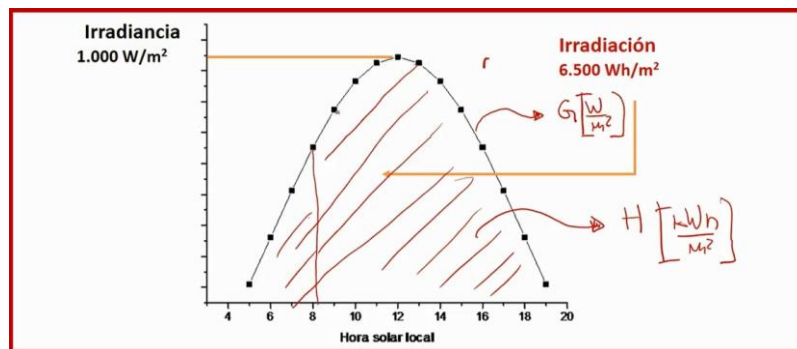


Figura 16. Grafica de irradiancia e irradiación solar durante el transcurso del día. Fuente: (Renovables, 2019)

Si se habla de irradiancia, se refiere a un momento dado, por otro lado, si se refiere a la irradiación, se describe como un periodo dado, pudiendo tratarse de un día, una hora, un mes, etc. La Figura 16 ejemplifica mediante una gráfica momentos y cantidades en el transcurso de un día de ambos conceptos.

La irradiación dentro de su amplio estudio, se puede descomponer en tres diferentes tipos como son:



Directa. Ésta percibe de forma directa los rayos del sol en línea recta, sin que se desvíen en su paso por la atmósfera. Es la más influyente en las aplicaciones fotovoltaicas.

Difusa. Aquella percibida del sol posteriormente desviada por dispersiones atmosféricas. Es decir, la que se recibe mediante aparición nubes, así como la que llega del cielo azul.

Reflejada. Es una combinación de las dos antes mencionadas; es decir aquella que se recibe por reflexión en la superficie o suelo u otras entidades próximas. (Radiación Solar, Marzo 2004)

Por lo tanto, se considera a la irradiación global a la suma de las tres radiaciones mencionadas, como una radiación total incidente sobre una superficie. La medición de la irradiación global la realizan los instrumentos conocidos como piranómetros, mientras que para la medición de la radiación directa se utilizan los pirheliómetros.

### **5.3.2 *Motivos de alteraciones de la radiación solar en la tierra.***

Nuestro planeta en su movimiento natural por la órbita del Sol realiza dos desplazamientos principales, sobre su propio eje (rotación) y alrededor del Sol (traslación), donde se determinan las cantidades de luz, calor, y por ende energía que llegará a las diferentes regiones de la Tierra a lo largo del pasar de los días y estaciones del año.

#### **Declinación Solar**

Nuestro planeta rota sobre un eje conocido como eje polar, que se inclina  $23.5^\circ$  de la normal del plano conocido como “plano eclíptico”. La rotación de nuestro planeta provoca cambios naturales de la energía solar que inciden sobre la superficie y a su vez causan los cambios de estación reflejados. Este ángulo es conocido como “*Declinación Solar*” y puede representarse mediante la letra griega  $\delta$  como se aprecia en la Figura 17. En el solsticio de verano posee

aproximadamente un ángulo con un valor de  $+23.5^\circ$ , mientras que en el solsticio de invierno el valor del ángulo cambia a  $-23.5^\circ$ . (Radiación Solar, Marzo 2004)

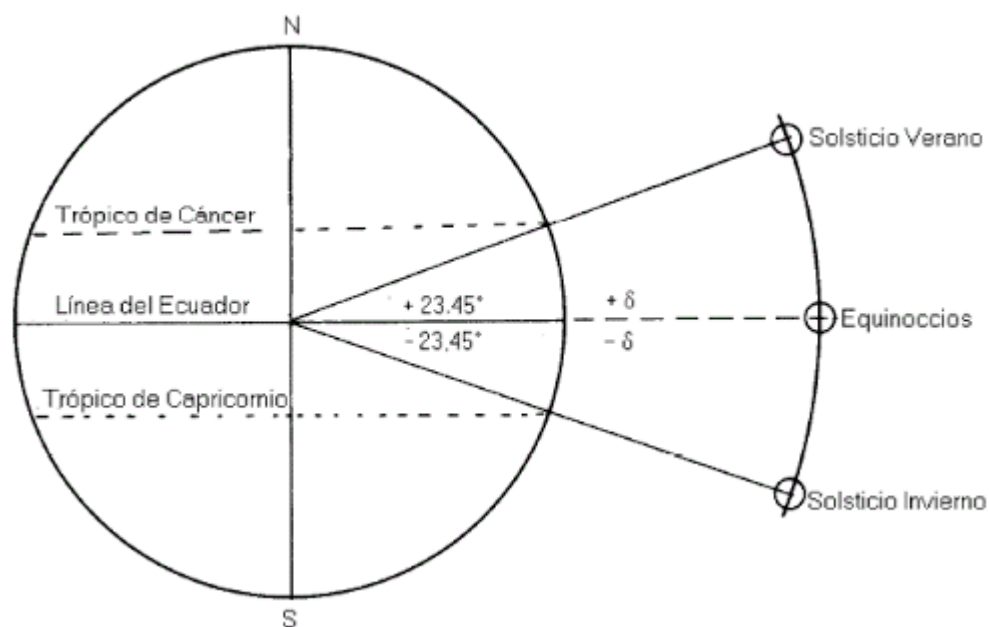


Figura 17. Representación de la declinación solar de la Tierra. Fuente: Radiación solar.

(Remer, s.f.)

### **Atenuación en la atmósfera de la radiación solar**

La radiación solar, involucrada en cada fenómeno mencionado, sufre además atenuaciones cuando su luz en forma de rayos solares atraviesa la atmósfera. Esta atenuación se manifiesta debido a varios constituyentes atmosféricos como moléculas de aire, gases, gotas nubosas, entre otros. Estos componentes de la capa atmosférica se comportan como una especie de filtros para ciertas frecuencias, por ejemplo, la cantidad de radiación que se disperse o absorba dependerá de la humedad presente o de las partículas y su composición.

*Dispersión:* La irradiancia solar atraviesa en línea recta, sin embargo, existen partículas en la atmósfera que afectan la intensidad de la radiación, a esto se le conoce como dispersión.

*Absorción mediante moléculas de gases:* Ocurren cuando existe reiteración de la radiación electromagnética; cuando un gas absorbe energía, esta se modifica en un cambio molecular que realiza un incremento de temperatura. (Radiación Solar, Marzo 2004)

La Figura 18 ejemplifica el modelo espectral de irradiación de rayos solares de forma directa y difusa para unas altitudes solares de  $60^\circ$  con cielos despejados, considerando un volumen de ozono de 0.3 cm, precipitación de agua de 2.0 cm y una espesura óptica cercana a 0.15.

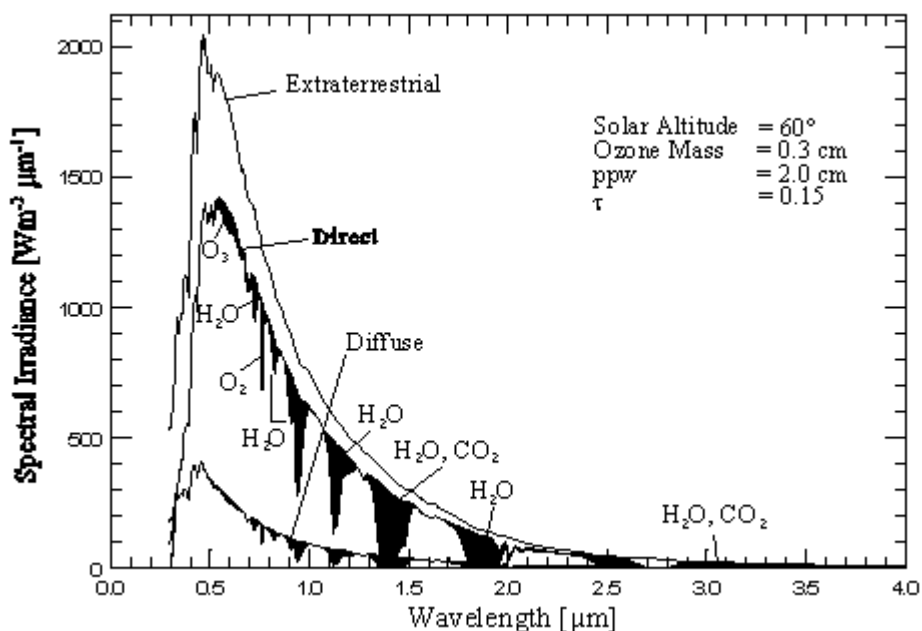


Figura 18. Grafica de modelo espectral de irradiación directa y difusa para una altitud de  $60^\circ$ .

Fuente: (rammb.cira, s.f.)

La curva superior muestra el espectro de la radiación que llega a lo alto de la atmósfera. Le sigue la irradiancia espectral directa donde supone no existir atenuación mediante moléculas o

gases. Los picos hacia abajo en el espectro de radiación directa refieren ser causados debido a la absorción de vapor de agua y de dióxido de carbono. (rammb.cira, s.f.)

Este fenómeno de atenuación redonda y afirma que la radiación global que incide sobre nuestro planeta será sometida a variaciones previstas y no previstas, entre las cuales a éstas últimas pertenecen las meteorológicas (como vapores de agua condensada en presencia de nubes) y asimismo a emisiones de ozono, dióxido de carbono, y el oxígeno como los gases que absorben los espectros de radiaciones solares.

### **Coordenadas geográficas: latitudes y longitudes**

Los sistemas de coordenadas geográficas se emplean para localizar unívocamente cualquier punto de interés en la superficie terrestre. Para ello, este sistema utiliza dos valores denominados latitud y longitud.

Las *latitudes* son los ángulos formados por la vertical a la Tierra en cierto punto y el plano del Ecuador, mientras que las *longitudes* son aquellos ángulos formados por el meridiano que pasa por dicho punto con el meridiano de Greenwich.

Las *longitudes* geográficas son fundamentales puesto determinan localizaciones de diferentes puntos en nuestro planeta. El ángulo de la longitud se forma mediante el meridiano que pasa por el punto a considerar y con el meridiano fundamental de Greenwich elegido. La Figura 19 ejemplifica ambos conceptos. Una medición que va de los 0 grados a 180 grados al Este o al Oeste con respecto a Greenwich. (Radiación Solar, Marzo 2004)

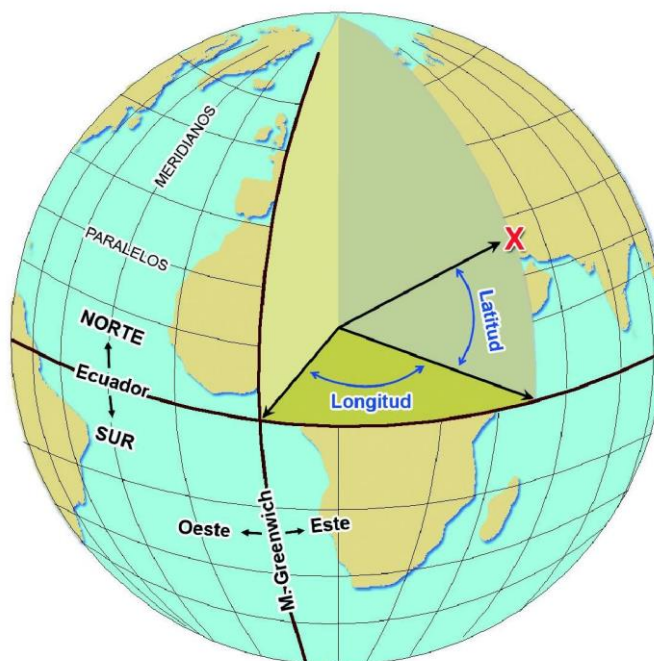


Figura 19. Representación gráfica sobre las coordenadas geométricas latitud y longitud en la Tierra. Fuente: (maralboran, 2017)

### **Posicionamiento del Sol: relaciones geométricas entre radiaciones solares y la superficie terrestre**

Desde la perspectiva terrenal, el Sol dibuja un arco desde su salida hasta su atardecer y durante esta trayectoria se puede observar una longitud, elevación y duración en el tiempo distintas durante cada día y en cada latitud geográfica.

La posición solar puede referirse mediante dos sistemas de coordenadas diferentes: coordenadas horarias y coordenadas horizontales. Las mismas, mostradas en la Figura 20, describen los diferentes vectores solares. (Radiación Solar, Marzo 2004)

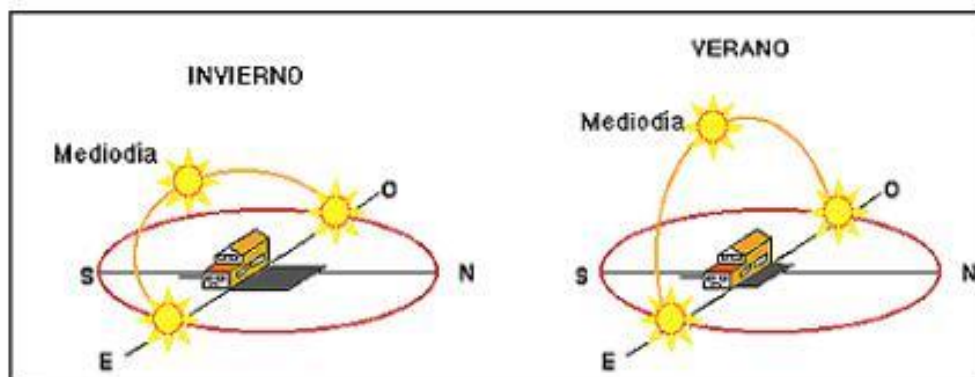


Figura 20. Representación del desplazamiento del Sol según la hora del día y la estación del año. Fuente: (ideam, s.f.)

Las relaciones geométricas mediante la radiación de los rayos solares, que varían según el desplazamiento del sol, y la superficie de la tierra, se completan a través de los siguientes ángulos que se muestran:

*De incidencia ( $\gamma$ ):* Ángulo que se forma de los rayos solares y la normal a la superficie de adquisición.

*Acimutal del sol ( $as$ ):* Éste es un resultado de la proyección de los rayos solares en el plano horizontal en conjunto con la dirección sur-norte (en puntos a considerar en el hemisferio norte) o norte-sur (en puntos a considerar en el hemisferio sur).

*Altura solar ( $\alpha$ ):* Se comprende entre los rayos solares y sus proyecciones sobre un plano horizontal.

*Inclinación ( $\beta$ ):* Este se forma entre el plano de la superficie a considerar y la horizontal. Por ejemplo, un tejado horizontal tendrá  $\beta = 0^\circ$ , mientras que para un muro vertical  $\beta = 90^\circ$ .

*Ángulo horario del sol u hora angular (W)*: Es un desplazamiento angular este-oeste del sol originado por el desplazamiento de rotación de la tierra. Entonces, cada hora coincide con un desplazamiento de 15°. (Radiación Solar, Marzo 2004)

## **5.4 Redes neuronales artificiales: predicción de sistemas solares.**

### **5.4.1 Generalidades sobre redes neuronales artificiales.**

Las redes neuronales artificiales surgen de la imitación de las neuronas biológicas del cerebro de los animales. Por tal motivo, las redes neuronales tienen un apego distinto a aquellos orientados clásicos de inteligencia artificial, los cuales buscan modelar la inteligencia humana tratando de emular las técnicas de razonamiento que suceden en nuestro cerebro. En los últimos tiempos, las redes neuronales tienen un lugar predominante en el entorno del modelado de sistemas dinámicos.

Las neuronas son células vivas que tienen cuerpos celulares más o menos esféricos de tamaño muy pequeñas, del que sale la conexión principal llamada axón, además de otras conexiones pequeñas llamadas dendritas. Por su parte, el axón se conecta continuamente a unidades próximas o contiguas como se aprecia en la Figura 21.

De forma general, la dendrita y los cuerpos celulares perciben señales de entrada, los cuerpos celulares generan información para el axón y este a su vez lleva esa información hacia el exterior, donde asumen la tarea de entregar los datos a un nuevo grupo de neuronas. De forma común, las neuronas reciben datos de  $n$  números de otras neuronas y, así mismo, envía datos a nuevos grupos de neuronas.

Para emular las tareas de un conjunto de células biológica y una red artificial, pueden examinarse los siguientes puntos a considerar:

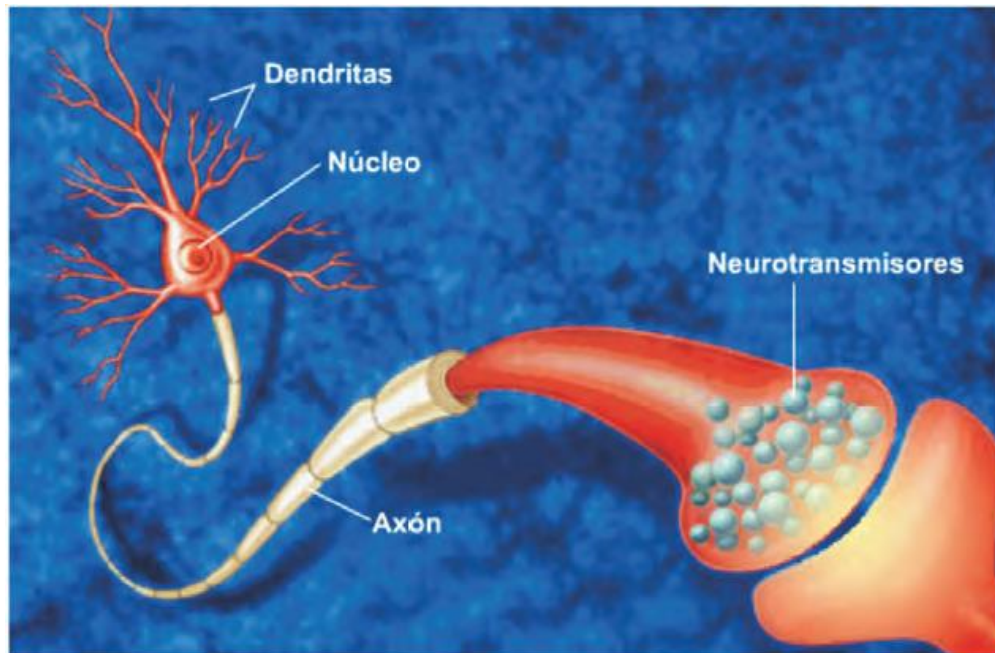


Figura 21. La neurona biológica. Fuente: (Caicedo Bravo & López Soterlo, Julio 2017)

**Los componentes del proceso obtienen datos de entrada.**

La principal particularidad de las unidades biológicas, y que se le asocia su aptitud de procesamiento y ejecución de acciones con complejidades altas, es que se encuentran elevadamente interconectadas con otras unidades de las que toman un impulso eléctrico de algún hecho en proceso. Estos datos al aparecer en la neurona, perjudica su proceder y a su vez puede modificar el comportamiento de otra unidad biológica o alguna reacción del individuo.

**La información transmitida es alterada por la sinapsis.**

La transmisión de datos que fluyen entre las unidades biológicas no se realiza directamente. Es decir, se logra mediante algo conocido como sinapsis. La cual es realizada por unos componentes llamados neurotransmisores. Estos son encargados de obstruir o dejar transitar las señales provenientes de otras unidades biológicas.



### La reacción de las unidades biológicas se transmite a otras.

Al estimularse, la unidad biológica genera información que debe comunicar a través de una micro señal eléctrica a otras unidades biológicas con las que tenga conexión. Esta información, eventualmente, tendrá impacto en otras unidades biológicas o reacción del individuo a través de sus músculos.

### Red neuronal artificial.

Después de conocer la operación de las unidades biológicas, se puede presentar un modelo para emular una red de neuronas artificiales, ver Figura 22.

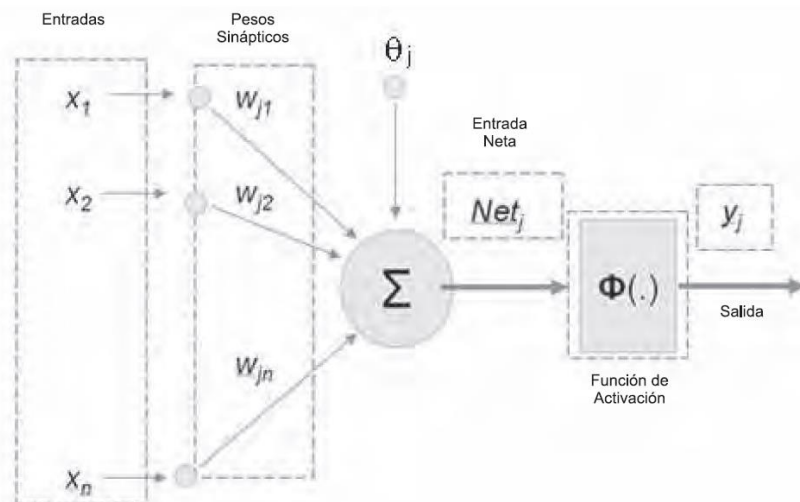


Figura 22. Modelo de neurona artificial. Fuente: (Caicedo Bravo & López Soterlo, Julio 2017)

Similar al caso de unidades biológicas, una neurona artificial acepta información que pueden proceder de sensores externos o de otras neuronas a las cuales se encuentra conectadas. Los datos recibidos por parte de la neurona, se define con el vector de entradas  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ .

Los datos obtenidos por la neurona son cambiados por un vector  $w$  de pesos donde su función es emular la sinapsis que existe en las unidades biológicas. Estos pesos permiten la atenuación o

amplificación de la información a niveles adecuados para otra neurona. El parámetro  $\theta_j$  es una desviación o umbral de una neurona. Los distintos datos tomados por la neurona, cambiados por los pesos sinápticos, son sumados para obtener lo que se denomina como la entrada neta.

Si bien no existe una pauta biológica que marque la asistencia de alguna unidad biológica animal, el empleo de la función de activación una técnica que permite la implementación de las redes neuronales artificiales hacia una amplia variedad de problemas reales.

### **5.5 Técnicas de modelado y simulación para colectores termo solares.**

Debido a los impredecibles e innegociables cambios de condiciones climáticas, cualquier diseño apropiado de algún sistema térmico debe considerarse complejo y sofisticado. Una herramienta apropiada para ello, se basa en el modelado y simulación para predecir resultados en diferentes escenarios meteorológicos, siempre tomando en cuenta la geografía y latitud del lugar. Las ventajas principales de esta técnica de predicción son: (Kalagirou & Papamarcou, 2000)

- Prescindir de la construcción de prototipos e instalación del sistema mismo.
- Optimizar a los componentes del sistema. Es decir, organizando un formato simple y comprensible mediante estas técnicas.
- Estimar diferentes parámetros y su análisis de sensibilidad.

Inicialmente, como primer paso en el modelado de cualquier sistema es formar una estructura avocada a utilizarse para caracterizar dicho sistema. La correcta propuesta de estructura y modelo, son vitales para la descripción del comportamiento y sus resultados en el colector termo solar a intervenir. En el diseño de la simulación, pueden presentarse inconvenientes como la deficiencia de control sobre la suposición y una limitada flexibilidad dentro de un análisis simplificado a experimentar. Por lo que, si la configuración del sistema investigado no es

estándar en especificaciones técnicas, la simulación informática deberá ser lo más completa posible.

Estas técnicas de predicción mediante su respectivo programa software, fueron desarrolladas por diferentes corporativos buscando profundizar y minimizar errores entre la simulación y la realidad. Para este estudio se ha preponderado utilizar la herramienta de Redes Neuronales Artificiales (RNA), pero existen también programas de simulación como: TRNSYS, T-SOL, WATSUN, Polysun y F-Chart cada uno con diferentes metodologías, así como ventajas y desventajas según la perspectiva que ofrezca el sistema a desarrollar. A continuación, se da una breve descripción de cada técnica mencionada, incluyendo las redes neuronales artificiales. (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019)

### **Programa de simulación TRNSYS**

El programa de simulación de sistemas transitorios, con su acrónimo en inglés TRNSYS, fue establecido por el laboratorio de energía solar de la Universidad de Wisconsin, Estados Unidos (TRNSYS). De forma general, el programa formula una estructura matemática general de cada componente del sistema mediante la resolución de una ecuación diferencial respectivamente, facilitando la salida de información para determinada entrada de datos.

Para cualquier simulación en el entorno de TRNSYS, es preciso elaborar un diagrama y esquema de flujo de datos para el sistema, facilitando el flujo de información entre los componentes del mismo. Algunos resultados de simulaciones de TRNSYS han establecido un error medio inferior al 10% entre las mismas y pruebas en físico.

Estos componentes del sistema o bien subsistema dentro de TRNSYS comprenden colectores solares, calentadores auxiliares, controladores diferenciales, cargas de refrigeración y calefacción, bombas de calor, tanques de almacenamiento y muchos otros componentes adyacentes al sistema.

### **Programa de simulación T\*SOL ®**

Este programa fue desarrollado en y gracias a Valentin software GmbH, Alemania. Su acrónimo, T\*SOL ®, significa programa de simulación térmica y posibilita al usuario para diseñar y optimizar sistemas de energía solar térmica mediante el cálculo dinámico de su rendimiento a lo largo de un ciclo anual. Para lograr optimizar estos sistemas, el programa considera las dimensiones de los colectores solares, depósitos de almacenamiento y permite calcular una eficiencia económica de lo planteado.

La plataforma T\*SOL ®, incluye sistemas como soportes de calefacción, colectores de calefacción de procesos y suministros de agua caliente, entre otros. El software presenta resultados del proceso como: balance de energía, emisiones contaminantes al medio ambiente y cálculos económicos analizados en tablas o gráficas (T\*SOL®, s.f.).

### **Programa de simulación WATSUN**

Fue desarrollado por el laboratorio de simulación en Watsun, Canadá. El software presenta la simulación de sistemas solares activos, con un programa preestablecido que permite al usuario familiarizarse con una exploración eficiente calculando los resultados del sistema durante cada hora. Estos resultados incluyen la energía recolectada, la energía solar incidente, la carga y la energía auxiliar, así como un análisis económico permitiendo a consultadores evaluar costos y beneficios.

Además, el programa cuenta con la variante de poseer un generador meteorológico sintético denominado dentro del mismo programa como WATGEN, donde también permite al usuario obtener datos sintéticos cada hora. WATSUN acapara opciones para el modelado de sistemas como calefacción de procesos industriales, suministro de agua caliente comercial y doméstica, calefacción de espacios, entre otros. (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019)

### **Programa de simulación Polysun**

El software de simulación Polysun desarrollado en Suiza por Vela Solaris AG (manualzilla©, 2020), permite simular y optimizar sistemas térmicos solares que proporcionan simulaciones térmicas anuales. Estas simulaciones se consideran más precisas y estables debido a que funcionan con etapas de tiempo dinámicas de segundo-hora.

Al utilizar este programa, las emisiones como gases de efecto invernadero pueden ser comparadas si el sistema opera con combustible convencional y/o el sistema trabajado es termosolar. El programa entrega también análisis económicos. Los resultados de diversas pruebas experimentales ostentan una precisión entre el 5 y el 10%, lo que valida la plataforma de programación referida (Gantner , 2000).

### **Programa de simulación y método f-Chart**

El programa de simulación f-Chart pertenece y es un avance tecnológico de los creadores de TRNSYS (Beckman, Klein, & Duffie, 2017), con un método establecido por Beckman (Ali Baig & Reddy, 2016). El programa viene condicionado pues solo puede predecir resultados para el sistema que se esperan en la estructura de f-Chart. En el desarrollo se asumieron tres configuraciones habituales como sistemas de aire, sistemas de líquido y sistemas de agua caliente

de servicios. También suele proporcionar una estimación en calefacción y refrigeración global que se obtendrá del sistema termo solar.

De manera general en la técnica f-Chart, se consideran dos variables para su diseño: el área del colector y variables secundarias como el tipo del colector, caudales de los fluidos, capacidades de almacenamiento de energía térmica y el tamaño de los intercambiadores de calor. Las correlaciones, que vienen como resultados de miles de simulaciones realizadas en TRNSYS, vienen en función de los resultados arrojados en parámetros en relación a las pérdidas de los colectores termo solares y las pérdidas de calefacción del sistema con la relación entre la energía solar absorbida y las cargas de calefacción. (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019).

### **Redes neuronales artificiales en el modelado y predicción de sistemas de energía solar**

Las redes neuronales artificiales (RNA) son beneficiosas para afrontar sistemas que modelan problemas complejos y mal especificados. Esta técnica ha sido utilizada en muchos estudios en el rubro de la energía renovable. Típicamente, son incorporadas capas ocultas de arquitectura en el diseño de estos sistemas de energía. (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019).

Asimismo, debe considerarse el análisis retrospectivo de red neuronal para conocer la relación y dependencia de resultados, mediante los parámetros de entrada. Tomando en cuenta diversas investigaciones, se han validado resultados al estar dentro de los límites presupuestados. (Kalogirou, Solar thermal collectors and applications. Prog. Energy Combust. Sci., 2004)

## 6 Metodología

### 6.1 Análisis térmico de los colectores termo solares.

La eficiencia térmica de los colectores termo solares es un parámetro necesario dentro del análisis térmico a considerar según los requerimientos previos del sistema. Esta eficiencia, se define entre la energía útil obtenida y la energía incidente de apertura del colector. El análisis difiere según la clasificación de los colectores: sin concentración solar o con concentración solar de la siguiente manera.

#### Colectores termo solares sin concentración solar.

En estado estacionario, la energía térmica útil ( $Q_u$ ) es obtenida mediante el colector termo solar. Es decir, es la variación entre la energía absorbida o ganada por el fluido de trabajo a través de la transferencia de calor y de las pérdidas directas o indirectas de calor. Por lo que, la energía térmica útil ( $Q_u$ ) es el producto de ec. (1) (Kalogirou, Solar thermal collectors and applications. Prog. Energy Combust. Sci., 2004) (Hossain, y otros, 2011):

$$Q_u = A_c [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_p - T_a)] = mC_p(T_o - T_i) \quad (1)$$

Si además es contemplado un factor de corrección adecuado al que llamaremos  $F_R$  se debe sustituir la  $T_i$  por la temperatura media de la placa  $T_p$ , entonces la ec. (1) puede reescribirse como:

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (2)$$

A su vez,  $F_R$  también es considerado como factor de eliminación de calor. Este puede obtenerse por la ec. (3) mediante:

$$F_R = \frac{mC_p}{A_c U_L} \left( 1 - \frac{U_L A_c F}{mC_p} \right) \quad (3)$$

Por otro lado,  $F$  será denominada como el factor de eficiencia del colector. Es necesario mencionar que el factor de eliminación o corrección de calor pueden variar si las características de colector solar, su tasa de flujo y el tipo de fluido. La  $F$  puede ser calculada por la ec. (4) (Kalogirou, Solar thermal collectors and applications. Prog. Energy Combust. Sci., 2004) como:

$$F = \frac{U_O}{U_L} \quad (4)$$

Por lo tanto, la eficiencia del colector se obtiene dividiendo  $Q_U$  por  $G_t A_c$  como:

$$\eta = \left[ \tau\alpha - \frac{U_L(T_i - T_a)}{G_t} \right] \quad (5)$$

El producto  $\tau\alpha$  se considera esencialmente constante. Las ecuaciones (2) y (5) son de orden lineal respecto al parámetro  $\frac{(T_i - T_a)}{G_t}$  mientras el  $U_L$  permanezca constante (Kalogirou, Solar thermal collectors and applications. Prog. Energy Combust. Sci., 2004).

### **Colectores termo solares con concentración de calor.**

Para un colector con concentración de calor, inicialmente, se puntualiza según sea el sistema de rastreo (seguimiento) de uno y/o dos ejes, su relación de concentración. Esta se define como la relación entre el área de apertura y el área de captación (recepción) como se muestra en la ec. (6) (Kalogirou, Solar thermal collectors and applications. Prog. Energy Combust. Sci., 2004):

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (6)$$

Considerando el colector como plano, el valor de  $C$  es igual a 1, esto debido a la no disposición de reflectores. Para casos de colectores de concentración continua se considera un



valor mayor a la unidad. Además, para los colectores termo solares de rastreo con uno y dos ejes, el valor máximo de concentración  $C_{max}$  puede calcularse mediante las ecuaciones (7) y (8) respectivamente:

$$C_{max} = \frac{1}{\sin(\theta_m)} \quad (7)$$

$$C_{max} = \frac{1}{\sin^2(\theta_m)} \quad (8)$$

Mientras que  $\theta_m$  se considera como la mitad del ángulo de aceptación.

Para el análisis térmico de colectores con concentración de calor, la energía calorífica útil  $Q_U$  obtenida por el colector termo solar se especifica en la ec. (9) como:

$$Q_u = G_b A_a \eta_o - A_r U_L (T_r - T_a) \quad (9)$$

Donde  $U_L$  es el coeficiente de pérdida y la relación estándar de transferencia de calor, que puede ser usada para tubos vidriados.

La eficiencia óptica  $\eta$  se calcula mediante la ec. (10) como:

$$\eta_o = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)] \quad (10)$$

$$A_f = \text{Factor geométrico} = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[ 1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \quad (11)$$

De forma similar, se puede utilizar el factor de corrección de calor ( $F_R$ ) y la ecuación (9) puede ser dada a su vez como:

$$Q_u = F_R [G_b A_a \eta_o - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (12)$$

Por lo tanto en colectores con concentración de calor, su eficiencia puede obtenerse dividiendo  $Q_U$  por  $G_b A_a$

$$\eta = F_R \left[ \eta_o - \frac{U_L(T_i - T_a)}{G_b c} \right] \quad (13)$$

Para el factor de corrección ( $F_R$ ), de ecuación (3) será reemplazando  $A_c$  por  $A_r$ . (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019)

## 6.2 Curva característica de los colectores termo solares.

Las curvas características de diferentes colectores termo solares se utilizan para comparar eficiencias de estos colectores en función al rendimiento del mismo. Por ejemplo, la Figura 23 muestra las curvas de eficiencia publicadas típicamente de diferentes colectores termo solares a  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ . Estas curvas se dan para diferentes irradiaciones  $E$  y una variedad de temperatura media ( $T_M$ ). La temperatura media es la diferencia entre la temperatura de salida del colector y la temperatura del aire ambiente. (Kumar, Hasanuzzamana, & Rahim, 2019). El aumento de la temperatura causa un aumento de las pérdidas térmicas. Como se muestra en la Figura 23, la máxima eficiencia óptica se obtiene con los colectores de placa plana (FPC con sus siglas en inglés); la pérdida de calor puede minimizarse con el doble acristalamiento del FPC.

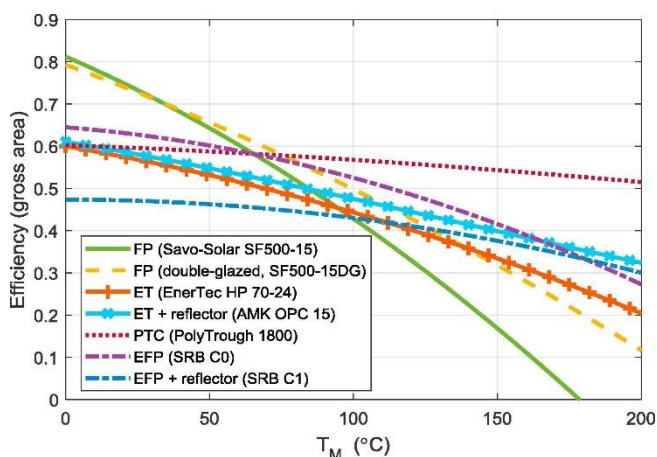


Figura 23. Curvas de eficiencia a  $G=1000 \text{ W/m}^2$  para una variedad de colectores solares.

Fuente: (Moss, y otros, 2018)

Los colectores de tubo evacuado (ETC) suelen tener coeficientes de pérdida de calor más bajos que el FPC. Sin embargo, la eficiencia térmica de un sistema puede ser incrementada usando colectores solares de concentración. Por ejemplo, los colectores cilindro-parabólicos (CPC) alcanzan coeficientes de pérdida de calor muy bajos a costa de la eficiencia óptica. (Panagopoulos, Chalkiadakis, & Jennings, 2015) (Moss, y otros, 2018)

De forma general, podemos concluir que, a mayor intensidad de radiación incidente, mejor rendimiento para la misma temperatura de trabajo y este rendimiento estará en función de:

- Características térmicas: Es decir, la rapidez en aumentar las pérdidas térmicas a medida que la temperatura de trabajo aumenta.
- Características ópticas: Es decir, cuanta de la radiación solar incidente es capaz de absorber. Producto absorción-transmisión.
- Producto absorción-transmisión-reflexión: Al tratarse de un sistema con espejos.

### 6.3 Red neuronal Bayesian-Gaussian.

Siendo  $(X_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$ , el conjunto de datos de entrenamiento, donde  $N$  se denomina el orden neto,  $X_i$  es la entrada de la muestra y está representada por un vector  $m \times 1$ ,  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im})^T$ ,  $y_i$  es la salida de la muestra y es una cantidad. Ahora estamos tratando de generar y en la nueva entrada  $X$  usando la medida de la vista de creencia de la probabilidad (Cheeseman, 1986) (Galambos, 1984) (Jaynes, 1988) (Mackay, 1992).

#### 6.3.1 ¿Cuál es la distribución de probabilidad de $Y(X)$ cuando se conoce una única fuente de información $(X_i, y_i)$ ?

Bajo la hipótesis Gaussiana,  $Y \sim N(y_0, \sigma_0^2)$  con la función de densidad de probabilidad (fdp)  $p(Y)$ , y, condicionalmente, dado que  $Y, Y_i \sim N(Y, \sigma_i^2)$  con fdp  $p(y_i|Y = y)$  (Galambos, 1984):

$$p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(Y-y_0)^2}{\sigma_0^2}} \quad (14)$$

$$p(y_i|Y = y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(y_i-y)^2}{\sigma_1^2}} \quad (15)$$

Del teorema de Bayes se deduce que

$$p(Y|y_i) = \frac{p(Y) \cdot p(y_i|Y)}{p(y_i)} \quad (16)$$

Sustituyendo las ecuaciones (14) y (15) en (16)

$$\begin{aligned} p(Y|y_i) &= \frac{1}{2\pi\sigma_0\sigma_1 p(y_i)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(Y-y_0)^2}{\sigma_0^2} + \frac{(y_i-Y)^2}{\sigma_1^2} \right]} \\ &= c_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{0,i}}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(Y-y_{0,i})^2}{\sigma_{0,i}^2}} \end{aligned} \quad (17)$$

Donde  $c_1$  es una constante normalizadora, y

$$\sigma_{0,i}^{-2} = \sigma_0^{-2} + \sigma_1^{-2} \quad (18)$$

$$y_{0,i} = \sigma_{0,i}^2 (\sigma_0^{-2} y_0 + \sigma_1^{-2} y_i) \quad (19)$$

Las ecuaciones 17, 18 y 19 expresan la distribución de propensión a posteriori de  $Y$  cuando se conoce una única fuente de información  $(X_i, y_i)$ .

6.3.2 *¿Cuál es la distribución de probabilidad de  $Y(X)$  cuando se conoce la fuente de información combinada  $(X_i, y_i), i = 1, \dots, N$ ?*

El fdp de  $Y$  se ha dado cuando se conocen dos fuentes de información condicionalmente independientes (Cheeseman, 1986). Para la generalidad, damos un teorema de fusión de información.

**Teorema**

Suponga que la contribución de  $Y_i$  a  $Y$  es  $p(Y|Y_i)(i = 1, \dots, N), Y_i$  y  $Y_j(i, j = 1, \dots, N, i \neq j)$  son condicionalmente independientes dado que  $Y$ . Luego la contribución de las fuentes de información combinadas  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$  a  $Y$  es:

$$p(Y|Y_1, Y_2, \dots, Y_N) = k \frac{\prod_{i=1}^N p(Y|Y_i)}{p^{N-1}(Y)} \quad (20)$$

donde  $k$  es una constante normalizadora independiente de  $Y$ .

6.3.3 *El modelo de razonamiento Bayesiano-Gaussiano*

Sustituyendo las ecuaciones (17) por (20), tenemos

$$p(Y|Y_1, Y_2, \dots, Y_N) = C_2 \frac{\prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{0,i}}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(Y-y_{0,i})^2}{\sigma_{0,i}^2}}}{\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}}\right)^{N-1} e^{-\frac{N-1}{2} \frac{(Y-y_0)^2}{\sigma_0^2}}} \quad (21)$$

Donde  $C_2$  es una constante normalizadora independiente de  $Y$ . Dado que la distribución anterior es aproximadamente constante ( $Y$  por lo tanto  $\sigma_0^2$  es razonablemente grande) en el rango de  $Y$  en el que el numerador es significativo, con una precisión razonable el denominador puede

ser absorbido en la constante de normalización. Además, (18) y (19) pueden ser aproximados por  $\sigma_{0,i}^{-2} \approx \sigma_i^{-2}, y_{0,i} \approx y_i$ . Bajo la hipótesis Gaussiana, (21) es aproximadamente

$$\begin{aligned} p(Y|Y_1, Y_2, \dots, Y_N) &= C_3 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \prod_{i=1}^N \frac{1}{s_i} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(Y-y_i)^2}{s_i^2}} \\ &= C_3 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{Y^2 - 2Y_i Y + Y_i^2}{\sigma_i^2}} \\ &= C_4 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(N)}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(Y-y'(N))^2}{\sigma(N)^2}} \end{aligned}$$

Donde  $C_4$  es una constante normalizadora independiente de  $Y$ , y  $y'$  :

$$y'(N) = \sigma(N)^2 \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} y_i \quad (22)$$

$$\sigma(N)^{-2} = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} \quad (23)$$

Asumamos que:

$$\sigma_i^2 = \sigma_0^2 e^{(x-x_i)^T D (x-x_i)} \quad (24)$$

donde  $D$  es la matriz de umbral de entrada

$$D = \begin{bmatrix} d_{11}^{-2} & & \\ & d_{jj}^{-2} & \\ & & d_{mm}^{-2} \end{bmatrix} \quad (24 \text{ a})$$

Y  $d_{11}, d_{22}, \dots, d_{mm}$  se denominan los factores de entrada, que se evaluarán a través de la capacitación de la red en el capítulo 6.3.4.

Las ecuaciones (22), (23) y (24) constituyen el modelo de razonamiento Bayesiano-Gaussiano.

Supongamos que se dispone de muestras de entrenamiento  $N (X_i, y_i) i = 1, \dots, N$ , y tenemos la

matriz de umbral de entrada adecuada  $D$  en la nueva entrada  $X$ , la generación de razonamiento tiene una media  $y'(N)$ , cuya medida de evaluación o varianza es  $\sigma(N)^2$ .

Cuando las muestras de entrenamiento crecen en cantidad, y queremos hacer la generación en  $X$ , se puede emplear el modelo recursivo (25) -(27), que es muy útil en el proceso de autoajuste a tratar. Supongamos que se dispone de muestras de entrenamiento de  $N - 1$  y que la generación en  $X$  se ha hecho con una media de  $y'(N - 1)$  y la medida de evaluación  $\sigma(N - 1)^2$ . Ahora la muestra  $N$ -ésima se incluye de nuevo. Basándose en las ecuaciones (22), (23) y (24), los resultados de la generación  $y'(N)$  y  $\sigma(N)^2$  pueden ser calculados de manera recursiva

$$\sigma_N^2 = \sigma_0^2 e^{(X-X_N)^T (X-X_N)} \quad (25)$$

$$\sigma(N)^{-2} = \sigma(N - 1)^{-2} + \sigma_N^{-2} \quad (26)$$

$$y'(N) = \sigma(N)^2 (\sigma(N - 1)^{-2} y'(N - 1) + \sigma_N^{-2} y_N) \quad (27)$$

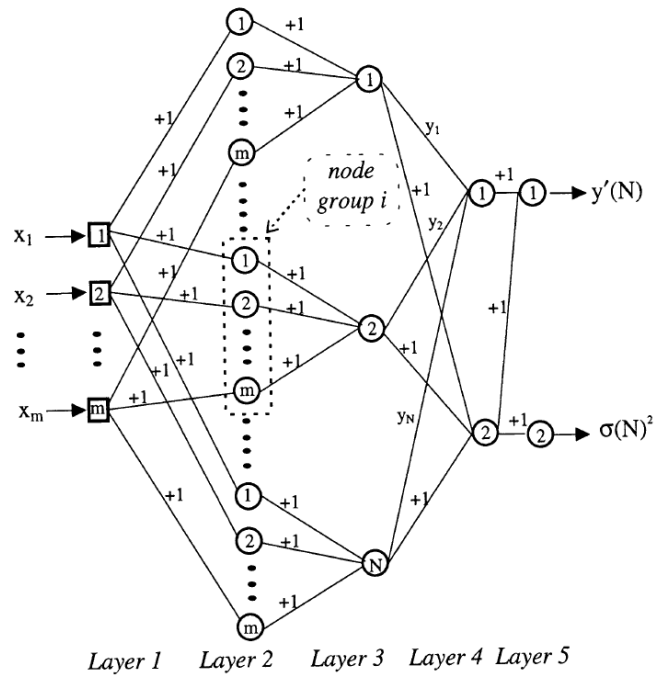
En el proceso de autoajuste, también es necesario que se excluya una muestra de capacitación del conjunto de muestras de capacitación y se eliminen los efectos de esta muestra, que también puede calcularse mediante un modelo recursivo Ecuaciones (28) -(30). Supongamos que se han eliminado los efectos de la muestra de entrenamiento  $k$ th del conjunto de muestras, entonces

$$\sigma_k^2 = \sigma_0^2 e^{(X-X_k)^T D(X-X_k)} \quad (28)$$

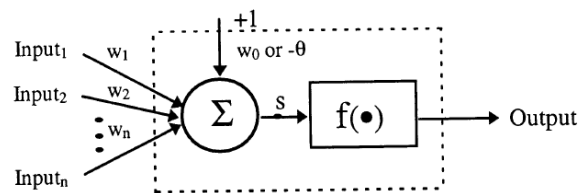
$$\sigma_k - (N - 1)^{-2} = \sigma(N)^{-2} - \sigma_k^{-2} \quad (29)$$

$$y'_k - (N - 1) = \sigma_k - (N - 1)^2 (\sigma(N)^{-2} y'(N) - \sigma_k^{-2} y_k) \quad (30)$$

### 6.3.4 La red neuronal Bayesiano-Gaussiana y su algoritmo de entrenamiento



(a) Topología y pesos de conexión



(b) El nodo neural

Figura 24. Esquema de Red Neuronal Bayesiano-Gaussiana.

La red NB-G, se basa en su modelo relevante, las ecuaciones (22), (23) y (24), como se muestra en la Figura 24. Cada nodo es marcado con un número para una ilustración conveniente. Observe que el nodo de la RNB-G es un ordinario nodo neural en la Figura 24 (b), al igual que en otras redes. La función de activación del nodo varía en diferentes capas o incluso en la misma



capa. La transmisión de la información puede ilustrarse como sigue, capa 1: simplemente almacenar los valores de entrada de  $m$ . Capa 2:  $N$  grupo de  $y$  el grupo  $i$ th corresponde a la muestra  $i$ th en el conjunto de datos de entrenamiento. Cada grupo tiene  $m$  nodos. Para el nodo  $j$ th del grupo  $i$ th

$$s_{2ij} = x_j \qquad f_2(s_{2ij}) = \frac{(s_{2ij} - x_{ij})^2}{d_{jj}^2}$$

El subíndice "2" representa la segunda capa. De manera similar, La "3" a la "5" representan las capas 3 a la 5, respectivamente. Cabe señalar que los factores de entrada  $d_{11}, d_{22}, \dots, d_{mm}$  están incrustados en esta capa).

Capa (Layer) 3: Nodos. El nodo  $i$ -ésimo corresponde a la muestra  $i$ -ésimo del conjunto de datos de formación. Para el nodo  $i$ th

$$s_{3i} = \sum_{j=1}^m \frac{(x_j - x_{ij})^2}{d_{jj}^2} \qquad f_3(s_{3i}) = \sigma_0^{-2} e^{-s_{3i}} = \sigma_i^{-2}$$

Capa 4: Dos nodos. Para el primer y el segundo nodo

$$s_{41} = \sum_{i=1}^N y_i \sigma_i^{-2} \qquad f_{41}(s_{41}) = s_{41}$$

$$s_{42} = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} \qquad f_{42}(s_{42}) = s_{42}$$

Capa 5: Dos nodos. Para el segundo y el primer nodo

$$s_{52} = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} \qquad f_{52}(s_{52}) = \frac{1}{s_{52}} = \sigma(N)^2$$

$$s_{51} = \sum_{i=1}^N y_i \sigma_i^{-2} \qquad f_{51}(s_{51}) = \frac{s_{51}}{s_{52}} = y'(N)$$

Aparentemente, los pesos de conexión y los términos de sesgo pueden establecerse inmediatamente cuando el conjunto de datos de entrenamiento está disponible. La regla de

aprendizaje supervisado para el entrenamiento de la red aquí es la actualización de la matriz de umbral de entrada D en ecuación 24 (a) para que E en (31) se reduzca al mínimo

$$\min E = \min_D \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N (y_n - y'_n)^2 \quad (31)$$

Donde N es el orden neto, mientras que  $y_n$  y  $y'_n$  son la salida deseada y la salida de la red, respectivamente, para la muestra n.

Aunque hay muchos métodos de minimización disponibles y adecuados para la formación del RNB-G, en esta investigación se emplea el método simplex de bajada [25]. Los datos de entrenamiento deben ser normalizados antes de ser alimentados a esta red, con entrada a [-1.0, +1.0] y salida a [0.0, +1.0], mientras que en el procedimiento de generación de la red la producción debe ser procesada de manera adversa antes de ser usado. Además, la variación a priori es de  $\sigma_0^2$  necesita ser evaluados. La simulación indica que el  $\sigma_0^2$  hace poca diferencia en los resultados de generación y puede ser simplemente como una unidad.

Supongamos que tenemos un RNB-G con la topología de cuatro nodos de entrada y un nodo de salida, entonces sólo tienen que lidiar con el problema de minimización de la evaluación cuatro variables independientes (factores de entrada). Como una comparación, supongamos que tenemos una RNR-P (Red neuronal de retro propagación) de tres capas con la topología de 4-5-1 (cuatro nodos de entrada, cinco nodos ocultos y un nodo de salida) como en la simulación estudio que se abordará, entonces tenemos 30 independientes variables a evaluar. Es esta diferencia la que muestra la ventaja de la RNB-G en el entrenamiento sobre la RNR-P o sus variaciones. El estudio de simulación muestra que se puede ahorrar mucho tiempo usando RNB-G en lugar de RNR-P. (Haiwen, Rainer, & Lothar, 1998)

## 7 Resultados

### 7.1 Banco de pruebas para sistemas termo solares y sus componentes

Dentro del análisis de energía solar captada y aprovechada por colectores termo solares, existe la necesidad de obtener datos e información necesaria en aspectos de evaluación como rendimiento, etc., para así tener una seguridad, fiabilidad y certificación de los mismos. Lo anterior tiene alcance gracias a aquellos sistemas conocidos en México como banco de pruebas, también llamados en gran parte de Latinoamérica como plataforma o laboratorio de ensayos; para colectores termo solares y la aplicación en el campo a ser dirigida.

Aquellas plataformas de ensayo que cuenten con la infraestructura, instrumentación, calibración y control de procesos adecuados, poseerán la capacidad de emitir resultados fiables de durabilidad, rendimiento, incidencia, tiempo de proceso, entre otras, de los colectores termo solares para una justa valoración y evaluación correcta entre el responsable técnico de la plataforma con el cliente interesado. La Figura 25 muestra una planta de ensayos ubicada en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) sede Querétaro. El objetivo por tanto es garantizar el cumplimiento de los resultados y, asimismo, de las normas aplicables en el país que se quiera implementar.

Por tal importancia, se menciona a continuación las características y el principio de funcionamiento en estos sistemas, así como sus partes y componentes principales según el tipo de plataforma de ensayos que sea utilizado para la evaluación de diferentes colectores termo solares.



Figura 25. Planta de ensayos para sistemas solares de CIDESI, sede Querétaro. Fuente: (Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, s.f.)

#### *7.1.1 Estación Solarimétrica.*

En una perspectiva de forma general, una estación solarimétrica permite disponer la recopilación de datos sobre radiación solar global, directa y/o difusa, detectar y medir variables de temperatura y humedad relativa del aire. Asimismo, suele asociarse con la medición de variables de presión atmosférica, velocidad y dirección del viento concernientes a la sección meteorológica.

Esta estación se integra y logra percibir estos registros de duración e intensidad de los rayos solares traducida o reflejada en unidades de tiempo mediante instrumentos conocidos como *heliógrafos*. Este instrumento en forma de esfera de cristal, concentra los rayos solares sobre una banda de cartulina de tal forma que, al quemarse, deja una traza carbonizada. La continuidad o intermitencia de la traza dependerá del brillo del Sol durante el transcurso del día.

Para la medición muy precisa de la irradiación solar global, difusa o directa según la necesidad, se disponen de dos instrumentos relacionados entre sí a menudo: *piranómetros* y *pirheliómetros*. Ambos instrumentos son similares en su objetivo de sensar la irradiación solar, pero se diferencian en que el *pirheliómetro* mide la energía directa del sol en lugar de la energía difusa. En cambio, los *piranómetros* (también llamados actinómetros o solarímetros) son instrumentos que generalmente se utilizan para tres tipos de medidas: semiesférico total, difusa y directa (Wikipedia, 2020). Para las mediciones difusa y semiesférica se suprime utilizando un disco o pantalla parasol y sus unidades de medida son expresadas en  $kW/m^2$ . Para *piranómetros* y *pirheliómetros*, el principio físico utilizado es mediante el flujo de calor originado por la radiación. Éste se es transmitido a una termopila, generando así señales eléctricas y permitiendo registrar la cantidad de vatios por metro cuadrado que se reciben.



Figura 26. Ilustración de piranómetro modelo SR20 (a) y pirheliómetro modelo DR03 (b).

Fuente: a) (Wikipedia, 2020), b) (Sensovant, 2016)

Por lo cual, las calibraciones de ambos instrumentos ilustrados en la Figura 26 son de suma importancia para evaluar la eficiencia de los colectores termo solares. Comúnmente se pueden

ver colocados junto a los paneles o colectores termo solares. Las mediciones de temperatura tienen su ubicación a la entrada y a la salida de los colectores. Comúnmente se realiza la medición con *sensores RTD* (del inglés *resistance temperature detector*) sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. A la entrada del colector, es decir, en la medición de temperatura del agua debe haber una curva o codo en la tubería para mezclar el fluido y debe estar montado a menos de 200 mm del colector correctamente aislado. A la salida del colector y para medir la temperatura ambiente del aire, se coloca otro sensor de temperatura RTD, como puede ser PT100, que sea protegido de la radiación solar directa para evitar mediciones erróneas debido al incremento de temperatura que pudiera incidir gracias a los rayos solares (SRC, s.f.). En la Figura 27, se muestra un tipo de sensor con las características recomendadas para la instalación



Figura 27. Sensores RTD PT100: (a) Cabeza marina y (b) Escudo de radiación 41303-5B.

Fuente: a) (Sensors, s.f.) [34], b) (Campbell Scientific, s.f.)

### 7.1.2 Estación Meteorológica.

Se empieza a considerar y separar la instrumentación de la sección meteorológica de la sección actinométrica, a partir de la medición de parámetros como la velocidad y dirección del viento, humedad relativa del aire, presión atmosférica en la superficie y cantidad de agua. Los *anemómetros* son instrumentos utilizados para la medición de la velocidad del viento y así ayudar en la predicción del tiempo. Los de tipo ultrasónico miden la componente en vectores de velocidad ortogonales x e y horizontal del viento y la temperatura virtual acústica. En la Figura 28, se muestra un anemómetro con carcasa de aleación de aluminio anodizado duro sin partes móviles.



Figura 28. Sensor anemómetro marca WindSonic M. Fuente: (Ltd, s.f.)

Su principio de operación es sumando los tiempos entre los transductores norte-sur y sur-norte, comparando el tiempo que le tome viajar entre sí, registrando rangos de velocidad del viento de 0-a 60 m/s., la dirección del viento en un ángulo de medida de 0-360° con precisiones de  $\pm 2\%$  a 12 m/s. Esta descripción de características para el caso de estudio aplica correctamente por las condiciones meteorológicas esperadas.

La sección meteorológica se complementa con instrumentos que miden cantidad de lluvia (*pluviómetros*), *higrómetros* encargados de registrar el grado de humedad en el aire o atmosfera y

*barómetros* para medir en la atmosfera unidades de presión. Estos instrumentos completan con sus soportes y fijaciones la sección meteorológica. En la fotografía de la Figura 29, se muestra un ejemplo del arreglo de una estructura de soporte para colectores termo solares y el montaje de los instrumentos de las secciones mencionadas.



Figura 29. Estructura del montaje de pruebas a colector termo solar de CIDESI, sede Querétaro. Fuente: (Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, s.f.)

### *7.1.3 Circuito hidráulico de recirculación.*

El banco de pruebas además de presentar la sección meteorológica, incluyendo los sensores actinométricos, requiere un circuito hidráulico de recirculación que cumplan con las condiciones necesarias para los ensayos previstos del colector a analizar. Este sistema posee una serie de accesorios e instrumentos para controlar, medir y accionar al fluido circundante en el proceso.

*Caudalímetro:* Como todo proceso de prueba y control, la regulación del fluido del banco de pruebas debe ser acondicionado de eficiente manera. Para ello en la instalación del banco, se cuenta con un caudalímetro electromagnético para la medición de la velocidad del líquido en



unidades de volumen o flujo másico por unidad de tiempo. El instrumento se encuentra previo a la entrada del colector para tener registrado valores sugeridos para los ensayos. Para regulación del flujo, en el circuito existen *válvulas de control* para mezclar los flujos de agua provenientes del *intercambiador de calor* y del circuito hidráulico para así enviar la mezcla de ambos al colector termo solar.

Los componentes que completan de forma general el sistema son un *termo tanque aislado de acumulación* del líquido y la *bomba* que hará circular el mismo hacia el colector. Tanto la bomba como el controlador de flujo deben de mantener estable el caudal a la entrada y a través del colector, con la temperatura permitida dentro de los rangos sugeridos para el ensayo. El esquema de la Figura 30, representa de forma general un ejemplo de la sección hidráulica de un banco de pruebas de colectores termo solares.

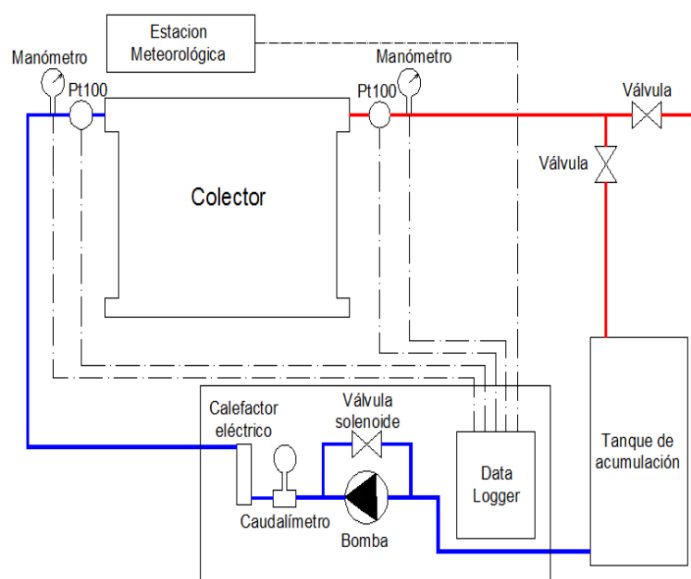


Figura 30. Esquema de banco de pruebas de colectores de plataforma solar del LESES (Laboratorio de estudios sobre energía solar, UTN FR Buenos Aires, Argentina). Fuente: (Haim & Nores Pondal)

#### 7.1.4 Pruebas y resultados.

La meta de este trabajo es construir un modelo capaz de predecir la potencia térmica generada a partir de datos medidos de los parámetros típicos de entrada los cuales influyen sobre la determinación de la potencia térmica generada de un colector solar de canal parabólico.

Las variables típicas de entrada al colector que se pueden medir con facilidad son: el ángulo de incidencia, la radiación global, el flujo másico y el diferencial de temperatura ambiente. La salida del modelo es la potencia térmica generada por el colector solar, en la Figura 31 se muestra un esquema de la estructura del modelo.

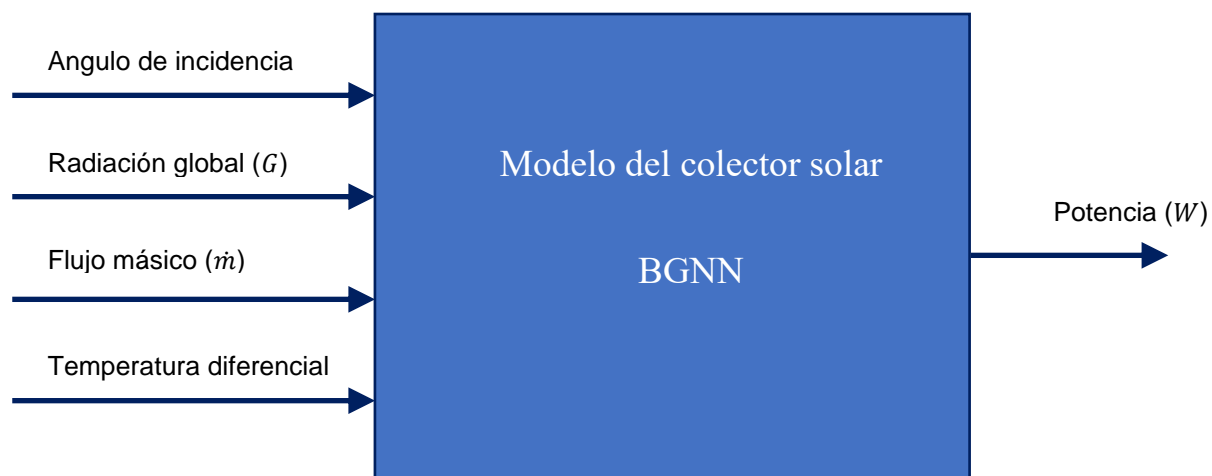


Figura 31. Esquema del modelo de un colector solar basado en una red BGNN.

Se tomaron datos históricos de dos pruebas experimentales las cuales fueron realizadas en el departamento de energía solar en Cidesi. Estas pruebas experimentales fueron realizadas variando solo el flujo (1, 4, 8 litros/min) y temperatura (20, 30, 45, 60, 75 °C) a la entrada del colector. El cambio en el ángulo de incidencia se da de manera natural por al cambio de la posición del sol y solo se consideraron pruebas cuando la radiación solar fue superior a 700 W/m<sup>2</sup>, debido a las condiciones intermitentes de cielo despejado o nublado, finalmente en base a los datos

experimentales obtenidos durante las pruebas se usaron para calcular la potencia de energía térmica (Q).

Por ejemplo, en la Tabla 1 mostrada a continuación; se consideró un flujo y temperatura de entrada al colector de 4 litros por minuto a 20°C, respectivamente. Para ambas pruebas, se tomaron valores registrados a diferentes horas del día, en la columna bajo el nombre AXT211 la modificación del ángulo de incidencia. A medida que el día avanza, la posición y radiación del sol va cambiando desde valores positivos hasta negativos como se aprecia con valores de 40.91 hasta -10.45, respectivamente.

Tabla 1. Valores de primera prueba a colector termo solar.

AXT211	$\Delta T$ (K)	$\bar{Q} = \dot{m} * C_f * \Delta T$	Rad T = At*R	$\eta_{hem} \% = \bar{Q} /$	$\Delta T_a$ (K)
40.91	3.87	1086.5	2543.8	0.43	-2.43
40.79	4.01	1125.8	2537.5	0.44	-2.42
40.71	3.86	1083.7	2529.6	0.43	-2.53
40.64	3.82	1072.5	2546.4	0.42	-2.60
20.99	5.55	1554.3	3392.6	0.46	-3.66
20.67	5.68	1594.7	3412.1	0.47	-3.51
20.03	5.88	1654.9	3459.7	0.48	-3.67
10.95	6.9	1946.8	3614.2	0.54	-4.30
10.74	6.96	1968.6	3589.4	0.55	-4.52
10.47	6.92	1957.3	3567.9	0.55	-4.75
-10.02	7.3	2044.4	3696.2	0.55	-5.51
-10.29	7.19	2013.6	3649.3	0.55	-5.21
-10.45	7.09	1990.6	3602.0	0.55	-5.28

La columna denominada  $\Delta T$  (K) es la diferencia entre la temperatura de salida y entrada del colector. Conforme va creciendo esta diferencia, se va reflejando en la eficiencia  $\eta$ . Se aprecia además en la columna con valores de “ $\bar{Q}$ ” la cantidad de calor transferida en el colector.

Por otra parte, se consideró para una segunda prueba una entrada de flujo y temperatura diferentes; con 8 litros por minuto a 75° C, respectivamente. Se presentan valores en la Tabla 2 los cuales indican una tendencia diferente en cuanto a eficiencia, así como a calor transferido. Se

puede apreciar que a ángulos de incidencia similares de  $10^\circ$  y al manejar una diferencia de temperaturas  $\Delta T$  (K) menor con respecto a la Tabla 1, la eficiencia del colector se ve disminuida de un valor de 0.54 a 0.45, respectivamente. Esto significa que, a mayor diferencia de temperaturas entre la salida y entrada del colector, se verá reflejada en la eficiencia del mismo. Sin embargo, al comparar ambas tablas en grados de incidencia solar similares de  $40^\circ$ , se tiene una eficiencia similar en ambos casos, a pesar de una diferencia de temperaturas menor una con respecto a otra.

Tabla 2. Valores de segunda prueba a colector termo solar.

AXT211	$\Delta T$ (K)	$\bar{Q} = \dot{m} * C_f *$	Rad T = At*R	$\eta_{hem} \% = \bar{Q} /$	$\Delta T_a$ (K)
40.97	1.84	1035.7	2426.1	0.43	51.81
40.97	1.82	1024.5	2428.8	0.42	51.84
40.95	1.88	1058.3	2430.5	0.44	51.83
40.89	1.83	1030.1	2432.6	0.42	51.815
30.94	2.44	1368.4	3114.8	0.44	50.24
30.89	2.37	1327.5	3120.2	0.43	50.195
30.84	2.36	1321.9	3123.2	0.42	50.15
30.78	2.36	1323.5	3121.2	0.42	50.08
10.98	2.95	1654.4	3649.6	0.45	48.695
10.92	2.95	1656.5	3642.0	0.45	48.755
10.83	2.98	1671.2	3640.4	0.46	48.79
-20.02	2.92	1635.6	3354.4	0.49	44.68
-20.07	2.9	1626.4	3356.8	0.48	44.66
-20.13	2.84	1590.7	3359.5	0.47	44.67

A partir de las pruebas paramétricas al colector solar, se realizó una inspección detallada de los datos mostrados para descartar aquellos que no se ajustaron a la matriz de pruebas y limpiar los datos que presentaron inconsistencias debido a perturbaciones ambientales, p ej. nubes, cambios bruscos de temperatura ambiente, variaciones del flujo másico, etc. En total los datos que fueron usados para el entrenamiento y prueba del modelo del colector fueron 3238 puntos de prueba.

Estos datos de las variables mencionadas, corresponden y son agrupados en la capa 2 de la Figura 24 (a), donde para cada conjunto hay por tal, cuatro entradas (que son variables mostradas en la tabla anterior y minuciosamente seleccionadas) para el entrenamiento. Mientras que en la siguiente capa (3), se calcula la función de probabilidad de los datos, la sumatoria de distancia y analiza la función de distribución normal (gaussiana).

De este número total de datos fueron seleccionados 3100 aleatoriamente permutados para el entrenamiento del modelo y los 138 datos restantes para la prueba del modelo. En la Figura 32 se presentan una gráfica con los datos de prueba, la estimación del modelo y el error obtenido.

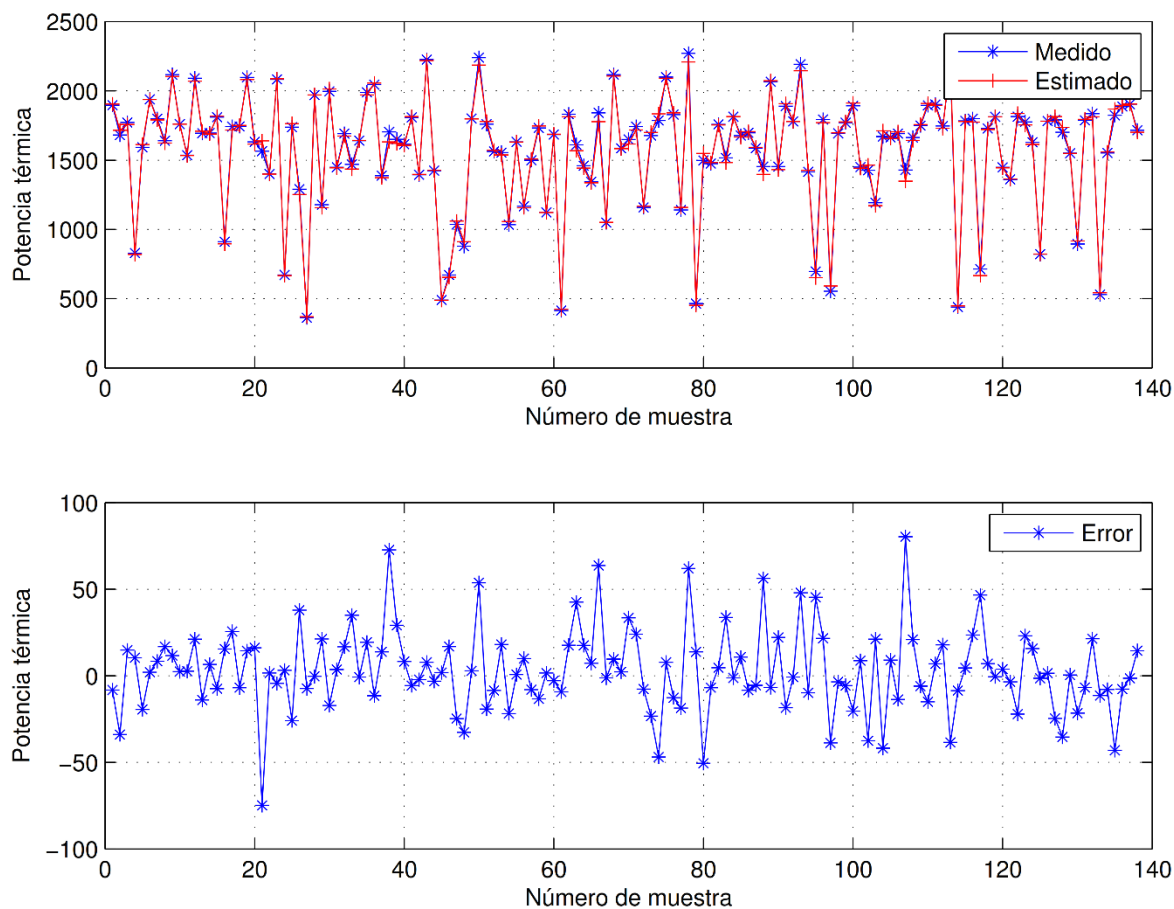


Figura 32. Estimación de la potencia generada por el colector solar del modelo.

El error del modelo tiene una media de 1.4092 con desviación estándar de 31.4829. Estos resultados se pueden mejorar sumando información al conjunto de datos de entrenamiento. En la gráfica se aprecia la cercanía en cada punto del valor estimado con respecto a los datos medidos, ejemplificados en las tablas 1 y 2, respectivamente.

## 8 Conclusiones

Lo expuesto a lo largo de los capítulos anteriores en este trabajo permite arribar de manera puntual a las siguientes conclusiones:

Avocados al cumplimiento de los tres primeros objetivos específicos; relacionados a la selección de datos recabados de pruebas experimentales del colector termo solar, documentar y conocer el sistema de banco de pruebas, así como calcular variables como eficiencia y potencia generada por el colector termo solar se considera de vital importancia una minuciosa revisión de los datos recabados en dichas pruebas experimentales. Todo esto debido a que, para determinar cierta cantidad de números de variables propuestas para el modelado y predicción de redes neuronales, es pertinente considerar condiciones climáticas intempestivas, tener en cuenta variabilidad en el flujo másico y diferentes temperaturas a la entrada del colector, para tener un conjunto de entrenamiento entre las capas de la red neuronal que sea capaz de tener una auto sintonización suficiente y a pesar de que se presenten variaciones en el proceso: posean una predicción con una media de error baja en comportamiento estático y/o dinámico del modelo.

En cuanto a los objetivos específicos finales y al objetivo general de este trabajo: Se desarrolló un modelo basado en datos de un colector solar de canal parabólico tomando como estructura del modelo una Red Neuronal Bayesiana-Gaussiana (BGNN por sus siglas en ingles). La BGNN es

una red neuronal alternativa a las redes neuronales de retro propagación. La BGNN tiene las siguientes características comparada con la red neuronal de retro propagación:

- ✓ Es fácil definir la topología de la red.
- ✓ Consume menos tiempo en el entrenamiento.
- ✓ Capacidad similar de predicción de comportamiento estático y dinámico cuando no ocurren variaciones en el proceso estático o dinámico.
- ✓ Mejor capacidad de predicción de comportamiento estático y dinámico cuando ocurren variaciones en el proceso.

La red BGNN tiene la ventaja de auto sintonización debido a que esto se logra cuando se sustituyen datos viejos que han perdido vigencia por datos nuevos recientes teniendo el efecto de actualización del modelo.

Sin embargo, las BGNN tienen problemas cuando los datos de entrenamiento son muy grandes debido a que la red almacena los datos de entrenamiento como parte de la estructura de la red. Las BGNN al ser modelos probabilísticos se comportan mejor cuando los datos de entrenamiento son grandes, pero no podemos incluir en el modelo datos indefinidos debido a limitaciones de implementación.

Por tanto y en conclusión, a su turno, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 32 donde muestra un error de modelo con media de 1.4092, confirma una predicción de los valores estimados con respecto a los valores medidos mediante la topología de la red BGNN. A su vez, abre puerta a nuevos alcances con diferentes recopilaciones de datos con diferentes condiciones de entrada al colector termo solar; así como proponer diferentes grupos y números de entrenamiento de futuros modelados.

## 9 Bibliografía

- 2020, m. ©. (s.f.). *manualzilla*. Obtenido de <https://manualzilla.com/doc/5674762/polysun-tutorial-pdf?page=2>
- Alam, M., Singh, H., Suresh, S., & Redpath, D. (2017). *Energy and economic analysis of Vacuum Insulation Panels (VIPs) used in non-domestic buildings*. Elsevier.
- Ali Baig, M., & Reddy, A. (Diciembre de 2016). *researchgate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/312107461\\_Utilization\\_of\\_f-Chart\\_Method\\_for\\_Designing\\_Solar\\_Thermal\\_Heating\\_System](https://www.researchgate.net/publication/312107461_Utilization_of_f-Chart_Method_for_Designing_Solar_Thermal_Heating_System)
- Barlev, D., Vidu, R., & Stroeve, P. (2011). *Innovation in concentrated solar power*. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. Elsevier.
- Beckman, W., Klein, S., & Duffie, J. (2017). *worldcat*. Obtenido de <https://www.worldcat.org/title/solar-heating-design-by-the-f-chart-method/oclc/3168307>
- Caicedo Bravo, E. F., & López Soterlo, J. A. (Julio 2017). *Una aproximación práctica a las redes neuronales*. Cali Colombia: Universidad del Valle.
- Campbell Scientific*. (s.f.). Obtenido de <https://www.campbellsci.com/h41005-5>
- Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*. (s.f.). Obtenido de <https://www.cidesi.com/site/desarrollo/energia-2/plataformas-pruebas-colectores-termo-solares/>
- Cheeseman, P. (1986). *Probabilistic versus Fuzzy Reasoning, Uncertainty*. North-Holland: Elsevier.



- Engeland, K., Borga, M., Creutin, J.-D., François, B., Ramos, M.-H., & Vidal, J.-P. (2017). *Space-time variability of climate variables and intermittent renewable electricity production— a review. Renewable Sustainable Energy Rev.* Elsevier.
- Galambos, J. (1984). *Introductory Probability Theory.* New York: Marcel Dekker.
- Gantner, M. (2000). *Dynamische simulation thermistor solar anlagen. Diploma Thesis, Hochschule für Technik Rapperswil.* Switzerland.
- García Saldivar, V., Gonzalez Cabrera, A., & Ramos-Berúmen. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar, en los sectores residencial, servicios e industrial.* Ciudad de México: Juan Tonda Mazón.
- González Cabrera, García Saldivar, V., C. , García Valladares, D., & Pilatowsky Figueroa, D. (2017). *Sistemas termosolares para el sector industrial.* Ciudad de México: Juan Tonda Mazón.
- Google. (s.f.). *Environmental Insights Explorer.* Obtenido de <https://insights.sustainability.google/>
- Guiqiang, L., Gang, P., Yuehong, S., Yunyun, W., & Jie, J. (2014). *Design and investigation of a novel lens-walled compound parabolic concentrator with air gap.* Elsevier.
- Haim, A., & Nores Pondal, F. (s.f.). Energía solar térmica, tecnologías y perspectivas del mercado nacional. *Laboratorio de Estudios sobre Energía Solar*, 24.
- Haiwen, Y., Rainer, N., & Lothar, R. (1998). *A Bayesian–Gaussian neural network and its applications in process engineering.* Zurich: Elsevier.

Hijazi, H., Mokhiamar, O., Elsamni, O., & Alexandria Eng, J. (2016). *Mechanical design of a low cost parabolic solar dish concentrator*. Elsevier.

Hossain, M., Saidur, R., Fayaz, H., Rahim, N., Islam, M., & Ahamed, J. (2011). *Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe*. *Renewable Sustainable Energy Rev*. Elsevier.

Hussain, M., Ménézo, C., & Kim, J.-T. (2018). *Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: a review*. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. Elsevier.

Hussein, A., Li, D., Kolsi, L., Kata, S., & Sahoo, B. (2017). *A review of nano fluid role to improve the performance of the heat pipe solar collectors*. Elsevier.

ideam. (s.f.). Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>

IEA. (2010). *Inteligencia tecnológica*. ciudad: Editorial.

IEA. (2010). *Technology Roadmap Concentrating Solar Power*. Paris: IEA.

IEA. (2011). *Solar Energy Perspectives*. Paris: OECD Publishing.

IEA. (2012). *Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling*. París: IEA.

IEA. (2014). *Technology Roadmap Solar Thermal Electricity*. París: IEA-Corlet.

Industrial, C. d. (s.f.). *Plataforma para Pruebas de Colectores Termosolares*. Obtenido de [www.cidesi.com/site/desarrollo/energia-2/plataformas-pruebas-colectores-termo-solares/](http://www.cidesi.com/site/desarrollo/energia-2/plataformas-pruebas-colectores-termo-solares/)

Islam, M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. (2015). *Modelling and analysis of the effect of different parameters on a parabolic-trough concentrating solar system*. Elsevier.

- Jaynes, E. (1988). *How Does the Brain Do Plausible Reasoning?* Dordrecht: Kluwer Academic.
- Kalogirou, S., & Papamarcou, C. (2000). *Modelling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation. Renewable Energy*. Elsevier.
- Kalogirou, S. (2001). *Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review*. Elsevier.
- Kalogirou, S. (2003). *The potential of solar industrial process heat applications*. Elsevier.
- Kalogirou, S. (2004). *Solar thermal collectors and applications. Prog. Energy Combust. Sci.* Elsevier.
- Kumar, L., Hasanuzzamana, M., & Rahim, N. (2019). *Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial*. Elsevier.
- Ltd, G. I. (s.f.). *Nautic expo*. Obtenido de <https://www.nauticexpo.es/prod/gill-instruments-ltd/product-39900-485171.html>
- Mackay, D. J. (1992). *Bayesian interpolation*. Pasadena: Neural Comput.
- manualzilla©. (2020). Obtenido de <https://manualzilla.com/doc/5674762/polysun-tutorial-pdf?page=2>
- maralboran. (28 de Septiembre de 2017). Obtenido de [http://maralboran.org/wikipedia/index.php/Coordenadas\\_geogr%C3%A1ficas\\_%283%C2%BAESO\\_Acad%C3%A9micas%29](http://maralboran.org/wikipedia/index.php/Coordenadas_geogr%C3%A1ficas_%283%C2%BAESO_Acad%C3%A9micas%29)
- Marengo Moreira, F., Merino Ruano, H., & Orellana Castillo, M. (2017). *Monitoreo de Irradiancia Solar en los diferentes Campus de la Universidad de El Salvador*. San, Salvador.

- McIntir, W. (1980). *Optimization of stationary nonimaging reflectors for tubular evacuated receivers aligned north-south*. Elsevier.
- Mills, D. (2004). *Advances in solar thermal electricity technology*. Sol. Energy. Elsevier.
- Mills, D., & Giutronich, J. (1978). *Asymmetrical non-imaging cylindrical solar concentrators*. Elsevier.
- Moss, R., Henshall, P., Arya, F., Shire, G., Eames, P., & Hyde, T. (2018). *Simulator testing of evacuated flat plate solar collectors for industrial heat and building integration*. Elsevier.
- Moss, R., Shire, S., Henshall, P., Ayra, F., Eames, P., & Hyde, T. (2018). *Performance of evacuated flat plate solar thermal collectors*. Therm. Sci. Eng. Progress. Elsevier.
- O'Gallagher, J., Snail, K., Winston, R., Peek, C., & Garrison, J. (1982). *A new evacuated CPC collector tube*. Sol. Energy. Chicago: Elsevier.
- Ortega, H., & (GIZ). (2018). *Energía solar térmica para procesos industriales en México. Estudio base de mercado*. Ciudad de México: Jorge Andrés Soriano Muñoz (Conuee), Rosa María Valdés Romero (Conuee).
- Panagopoulos, A., Chalkiadakis, G., & Jennings, R. (2015). *Towards Optimal Solar Tracking: A Dynamic Programming Approach*. Elsevier.
- Pandey, K., & Chaurasiya, R. (2017). *A review on analysis and development of solar flat plate collector*. Renewable Sustainable Energy Rev. Elsevier.
- Payback, S. (2017). *Calor solar para la industria: México*. Sudáfrica: Debbie Smit (Quba Design and Motion).

Perez, F. G., & CCEEA. (2017). CCEEA. Obtenido de <https://ccea.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/el-empleo-de-la-energia-solar-termica-en-mexico>

*Personales.unican.* (s.f.). Obtenido de Movimiento aparente del sol:

<https://personales.unican.es/gonzalmi/ssolar/articulos/movapsol.html>

Radiación Solar. (Marzo 2004). En R. Lamaison.

*rammb.cira.* (s.f.). Obtenido de Atenuación de la radiación en la atmósfera:

<http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/VRL/Tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2720/s2720003.htm>

Remer, V. (s.f.). *Protección civil.* Obtenido de

<http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum17/vdm052.htm>

REN21. (2017). *Renewables 2017: Global Status Report.* París: REN21.

Renovables, A. (5 de Septiembre de 2019). *Youtube.* Obtenido de

<https://www.youtube.com/watch?v=s0h7t51LpxI>

Rodrigues Barbalho, A. A. (s.f.). *Evaluación Rápida del Uso de la Energía, Querétaro.* Querétaro.

Rönnelid, M., Perers, B., & Karlsson, B. (1996). *Construction and testing of a large-area CPC collector and comparison with a flat plate collector.* Elsevier.

Sensors, S. (s.f.). *Directindustry.* Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/sterling-sensors/product-118623-1907067.html>

*Sensovant.* (2016). Obtenido de Sensores de radiación solar:

<https://sensoresmeteorologicos.es/radiacion-solar.html>

- Singh, N. (3 de Junio de 2020). *Energía Estratégica*. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/google-presenta-en-latinoamerica-sus-herramientas-de-monitoreo-ambiental-y-calculo-de-potencial-ahorro-energetico-con-paneles/>
- SRC. (s.f.). *SRC*. Obtenido de <https://srcsl.com/que-es-un-sensor-pt100/>
- Suman, S., Khan, M., & Pathak, M. (2017). *Performance enhancement of solar collectors—a review*. *Renewable Sustainable*. India: Elsevier.
- T\*SOL®. (s.f.). *Valentin software*. Obtenido de <https://www.valentin-software.com>.
- tierra, P. (s.f.). *Planetario tierra*. Obtenido de <https://planetariotierra.blogspot.com/2018/06/solsticio-21-de-junio.html>
- TRNSYS. (s.f.). *Updates in Version 17.1*. Obtenido de [https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/t17\\_1\\_updates.pdf](https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/t17_1_updates.pdf)
- Urbano, M., & Ciurana, J. (2012). *Biuarquitectura y paisaje*. Obtenido de <https://biuarquitectura.com/2012/05/18/las-protecciones-solares/>
- Wikipedia. (5 de Febrero de 2020). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Piranómetro>
- Wikipedia. (13 de Noviembre de 2020). Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Estaciones\\_del\\_a%C3%B1o](https://es.wikipedia.org/wiki/Estaciones_del_a%C3%B1o)
- Yeh, H.-M., & Lin, T.-T. (1995). *The effect of collector aspect ratio on the collector efficiency of flat-plate solar air heaters*. China: Elsevier.