

Estudio Numérico del Desempeño Térmico de Tubos de Vacío para Termas Solares Adaptadas al Escenario Costero Peruano

Study of Thermal Performance of Vacuum-Tube for Solar Water Heaters Adapted for Peruvian Coastal Scenario

Yván René Leiva Calvanapón ; Elder Marino Mendoza Orbegoso 

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

* Autor correspondiente: yleiva@unitru.edu.pe (Y. Leiva)

DOI: [10.17268/scien.inge.2025.03.01](https://doi.org/10.17268/scien.inge.2025.03.01)

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar teóricamente los arreglos de los tubos de vacío, considerando el ángulo de inclinación y la separación entre tubos, que colectan la mayor cantidad de energía total anual para cinco ciudades costeras peruanas. Se consideraron como parámetros las dimensiones de los tubos, la orientación acimutal, el ángulo de inclinación y el espaciamiento entre tubos. Para realizar un estudio paramétrico de la energía solar total captada por un tubo de vacío, variando el ángulo de inclinación para cada uno de los 365 días del año, la separación entre tubos y la ubicación geográfica de cinco ciudades costeras del Perú se implementó un modelo matemático en Matlab/Octave. Los resultados muestran que la captación máxima de energía solar se logra con inclinaciones entre 0° y 15° y una separación relativa entre tubos de dos veces el diámetro exterior, así mismo quedo evidenciando que los ángulos óptimos de trabajo de los tubos al vacío dependen de la ciudad en los cuales se van a usar. A diferencia de los sistemas comerciales, los tubos dispuestos a 15° pueden captar mayor energía sin comprometer su conversión térmica mediante el efecto termosifón.

Palabras clave: Energía solar; terma de tubos de vacío; ángulo de inclinación; ubicación geográfica.

ABSTRACT

The present research aimed to theoretically determine the arrangements of evacuated tubes, considering both tilt angle and inter-tube spacing, that maximize the total annual energy collection for five Peruvian coastal cities. The parameters considered included tube dimensions, azimuthal orientation, tilt angle, and inter-tube spacing. To perform a parametric study of the total solar energy captured by a single evacuated tube, varying the tilt angle for each of the 365 days of the year, the spacing between tubes, and the geographic location of five coastal Peruvian cities, a mathematical model was implemented in Matlab/Octave. The results show that maximum solar energy collection is achieved with tilt angles between 0° and 15° and a relative spacing between tubes equal to twice the outer diameter. Furthermore, it was demonstrated that the optimal operating tilt angles of evacuated tubes depend on the specific city in which they are installed. Unlike commercial systems, tubes arranged at a 15° tilt can capture greater amounts of energy without compromising their thermal conversion through the thermosiphon effect.

Keywords: Solar Energy; Vacuum-Tube Solar Water Heater; Tilt Angle; Geographical Location.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la región costera norte del Perú ha experimentado fluctuaciones térmicas significativas, según Klunk et al. (2020), esto es debido al cambio climático antropogénico provocado por el uso de combustibles fósiles, deforestación y prácticas industriales que alteran la atmósfera y, en consecuencia, resultan estaciones pronunciadas de calor y frío extremos (Bergmann et al., 2021). A pesar de estos cambios, la adopción de tecnologías limpias como los sistemas solares térmicos ha sido limitada en esta región. El equipamiento actual suele no ajustarse a las realidades geográficas y climáticas del Perú. Según, Hassan et al. (2023) la optimización de la distancia entre tubos al vacío en una terma solar es crucial para maximizar la eficiencia térmica y reducir costos, ya que una separación adecuada permite mejorar aprovechamiento del calor y, en consecuencia, acortar el período de recuperación de la inversión económica.



Por lo tanto, es esencial desarrollar sistemas térmicos que estén adecuadamente adaptados a las condiciones ambientales locales para garantizar un rendimiento óptimo. Estudiar el comportamiento de estos sistemas bajo las condiciones geográficas y climáticas del Perú es crucial (Venturini et al. 2018).

La captación de energía solar térmica mediante colectores de tubos de vacío se ha consolidado como una tecnología prometedora para la producción de agua caliente sanitaria y otras aplicaciones de baja temperatura. La alta eficiencia de estos sistemas, resultado de la minimización de las pérdidas térmicas por convección y conducción gracias al vacío interno del tubo, los ha posicionado como una alternativa atractiva a los colectores solares planos tradicionales (Budihardjo, 2005). Esto representa una alternativa viable para estudio e implementación a lo largo de la costa peruana debido a su rentabilidad y desempeño superior frente a otras configuraciones, ofreciendo una solución práctica para aprovechar la energía solar de manera eficiente (Huang & Wu, 2023)

Las simulaciones numéricas son herramientas esenciales para evaluar el rendimiento de los sistemas colectores solares. Zang et al. (2016) emplearon modelos numéricos para determinar el ángulo de inclinación óptimo de colectores en distintos climas de China, mientras que Tang et al. (2009) desarrollaron un método matemático para estimar la captación diaria de radiación en colectores de un solo tubo de vidrio tipo T y H en varias provincias de China, utilizando geometría solar y principios de transferencia de radiación solar. Los resultados obtenidos por ambos autores revelaron que la captación anual está influenciada por factores como el tipo de colector, el espaciamiento y el tamaño de los tubos de vacío, así como los ángulos de inclinación y acimut. Específicamente, Tang et al. (2009) concluyeron que los colectores tipo T (con tubos inclinados) captan ligeramente más radiación que los tipos H (con tubos horizontales). El uso de un reflector difuso plano (DFR) puede potenciar significativamente la captación solar el estudio también aborda cómo diversos parámetros afectan la captación anual de radiación, indicando que los colectores de tubos de vacío deben instalarse con un ángulo de inclinación inferior a la latitud del lugar donde se instale la terma.

Handoyo et al. (2013) demostraron la importancia de determinar el ángulo de inclinación óptimo de un colector solar para maximizar la captación energética. Aunque su estudio se enfocó en condiciones climáticas específicas, sus hallazgos son relevantes para la optimización de sistemas de captación en regiones con marcadas variaciones estacionales, como las zonas costeras y andinas del Perú. Sin embargo, el trabajo de Handoyo et al. (2013) no explora cómo los parámetros geométricos y el arreglo de los colectores de tubos de vacío influyen en su desempeño en la captación de energía solar.

El trabajo experimental y numérico de Bracamonte et al. (2015) examina cómo los ángulos de inclinación afectan el comportamiento térmico de termas solares de tubos al vacío que operan en regiones subtropicales, los autores utilizaron un sistema comercial de 40 L de capacidad y 8 tubos de vacío, realizando experimentos y simulaciones CFD durante cuatro semanas con ángulos de inclinación de 10°, 27° y 45°. El estudio reveló que el ángulo de inclinación influye significativamente en la ganancia diaria de energía, los patrones de flujo y la estratificación en el tanque. Un ángulo de 10° alcanzó mayores temperaturas y mejor estratificación térmica, creando una zona inactiva en la parte inferior del tanque. En contraste, un ángulo de 45° resultó en un contenido totalmente mezclado al final del proceso de calentamiento. Este trabajo también aporta perspectivas sobre la aplicación de estos calentadores en regiones subtropicales, pero no aborda los procesos de carga o descarga.

Sadeghi et al. (2020) desarrollaron un modelo matemático para predecir la irradiancia solar en varias regiones de Irán, variando longitud y latitud. Investigaron numéricamente cómo la latitud afecta la radiación solar sobre un colector de tubos de vacío inclinado 30° entre latitudes 25° y 40°. El estudio reveló que, para un ángulo de 30°, la radiación solar diaria aumenta con la latitud; el norte de Irán (40°) recibe aproximadamente un 14 % más de radiación que el sur (25°) a la misma longitud, lo que equivale a unos 100 W más en verano (junio). Los autores también demostraron que un ángulo 15° menor que la latitud es óptimo, con la mayor radiación en una latitud de 45° para una inclinación de 30°. Asimismo, evidenciaron que, con 45° de inclinación, la radiación solar en verano (junio) es alrededor de 70 W/m² inferior a la de invierno (enero), debido a que ese ángulo se adapta mejor a la temporada invernal. Sin embargo, los días más largos del verano compensan esto, produciendo una mayor radiación solar total.

La transferencia de calor en sistemas cilíndricos es un problema clásico de ingeniería. Marinca & Herisanu (2020) proporcionan una solución analítica que puede adaptarse para modelar la transferencia de calor en colectores de tubos de vacío. Según Da Silva et al. (2017) y Ruoso et al. (2019) comprender los mecanismos de transferencia en ambos sistemas es fundamental para optimizar el diseño y el rendimiento de los arreglos de colectores de tubos de vacío. Asimismo, Togun et al. (2023) emplearon simulaciones numéricas para analizar el efecto de aletas híbridas novedosas en la mejora de la transferencia de calor en un conducto convergente. Este enfoque numérico, similar al utilizado en nuestro estudio, permite evaluar con precisión el impacto de diferentes geometrías y arreglos en el desempeño térmico de los sistemas. Aunque nuestro trabajo se centra en

colectores de tubos de vacío, la importancia de la geometría para optimizar la transferencia de calor es un aspecto compartido en estos estudios.

Como demuestran los autores mencionados, el ángulo de inclinación de los tubos de vacío, así como la separación entre tubos son cruciales para maximizar la captación solar, ya que están influenciados por las trayectorias diaria, mensual y anual del sol, las cuales varían según la ubicación geográfica. Para lograr una producción óptima de energía, el ángulo de inclinación debe determinarse con precisión para cada sitio específico. Este ángulo es esencial no solo para maximizar la radiación solar diaria y estacional, sino también para prevenir el flujo inverso en los colectores de tubos de vacío. Un ángulo incorrecto puede reducir el desempeño y generar pérdidas significativas de energía.

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el arreglo óptimo de tubos de vacío montados en una terma solar adaptada a las condiciones latitudinales de varias ciudades costeras peruanas. Para lograrlo, se implementó un modelo matemático en Matlab/Octave para analizar teóricamente cómo la inclinación, la separación entre tubos de vacío y la ubicación geográfica influyen en la captación diaria y anual de energía solar de un dispositivo de conversión energética.

2. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de Investigación.

Esta investigación empleó un diseño experimental simulado para determinar los ángulos de inclinación y distancias entre centros óptimos para la máxima colecta de energía solar durante un año completo, considerando las características climáticas específicas de varias ciudades. Se manipuló sistemáticamente el ángulo de inclinación y la distancia entre centros, mientras se cuantificaba la energía solar colectada.

2.2 Objeto de Estudio

Para el análisis, se consideró como objeto de estudio el comportamiento térmico de tubos al vacío en función de del ángulo de inclinación y la distancia entre tubos, bajo condiciones climáticas de cinco ciudades de la costa de Perú. Los tubos de vacío que fueron estudiados son aquellos de 1,80 metros de longitud, 48 mm de diámetro interior y 58 mm de diámetro exterior, dispuestos como se muestran en la Figura 1. Estas dimensiones específicas fueron elegidas debido a su amplio uso comercial en el mercado peruano para la fabricación de termas solares de tubo de vacío.



Figura 1. Arreglo de tubos al vacío en una terma solar

El ángulo de acimut del calentador de agua solar se estableció en 180° (orientado hacia el norte), siguiendo la nomenclatura de Duffie & Beckman, 2020 y en base a estudios previos sobre sistemas solares térmicos y fotovoltaicos. Estos estudios indican que un ángulo de acimut de 180° capta la máxima energía solar cuando el sistema térmico se fija en una posición de acimut específica durante todo el año. En la Tabla 1 se indican las coordenadas geométricas que se utilizaron en el análisis realizado en el presente estudio.

Tabla1. Coordenadas geográficas de las ciudades del Perú

Ciudades de Perú	Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [m]
Piura	-5,197087	-80,627027	55
Trujillo	-8,11167	-79,0286	33
Lima	-12,063015	-77,029618	101
Nazca	-14,83098	-74,93895	520
Tacna	-18,014162	-70,252042	568

2.3 Variables de Estudio

2.3.1. Variables Independientes

En el presente estudio las variables independientes son el Ángulo de inclinación del colector (β) el cual se varió en un rango de 0° a 45 con incrementos de 5° y la otra variable independiente fue la distancia entre centros de colectores (B), se consideraron distancias entre centros de tubos al vacío de 58 mm, 97 mm y 116 mm, esta variable es relevante por el efecto que el sombreado genera.

2.3.2. Variable Dependiente

Energía colectada total anual: Calculada en kilovatios-hora (kWh), representando la suma de la energía colectada por el sistema simulado a lo largo de todo el año.

2.4 Herramientas de simulación

El estudio se llevó a cabo utilizando MATLAB/OCTAVE. Para el cálculo de la radiación solar, la eficiencia de los colectores solares y para el cálculo de la energía mediante integración numérica.

Los datos de entrada fueron, las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), la dimensión del tubo de evacuación (diámetros internos y externos, así como longitud del tubo de vacío) y la disposición de los tubos de vacío (ángulo de inclinación y distancia entre los centros de los tubos de vacío adyacentes).

2.5 Procedimiento de Simulación

El objetivo de la simulación es analizar la influencia del ángulo de inclinación y la distancia de separación en la captación máxima de energía solar mediante tubos al vacío instalados en un colector solar. En el Anexo 1 se presentan detalladamente las ecuaciones empleadas para calcular la energía captada, las cuales fueron implementadas en el software MATLAB.

Para todas ciudades evaluadas, se llevó a cabo una serie de simulaciones interactivas siguiendo los pasos descritos que se muestran a continuación:

Exploración de Ángulos y Distancias: Se implementó un bucle doble que recorrió todas las combinaciones posibles entre varios ángulos de inclinación del colector y tres valores definidos de separación entre centros de los tubos al vacío.

Simulación Diaria de Energía: Para cada combinación de ángulo y distancia, se calculó la energía solar captada diariamente durante los 365 días del año, utilizando datos meteorológicos locales correspondientes a cada ciudad.

Cálculo Anual de Energía Colectada: Los valores diarios se integraron numéricamente para obtener la energía total acumulada en un año por cada configuración geométrica.

Almacenamiento de Resultados: Todos los resultados anuales fueron organizados en matrices o tablas multidimensionales, facilitando su posterior análisis comparativo y la identificación de configuraciones óptimas.

2.6 Procesamiento y Análisis de Datos

Finalizada la etapa de simulación, se procedió con el análisis de los datos siguiendo el flujo descrito a continuación:

Estructuración de Resultados: Los datos de energía anual colectada se organizó en matrices, donde cada fila representaba una distancia fija entre tubos y cada columna un ángulo de inclinación y luego la información fue graficada, para cada ciudad.

Visualización de Resultados: Con el fin de facilitar la interpretación, se seleccionó una distancia la distancia de 116 mm y se generaron gráficos de energía anual colectada en función del ángulo de inclinación para cada ciudad.

Determinación de Configuración Óptima por Ciudad: A partir de los gráficos generados, se identificó el ángulo que maximiza la energía captada para la distancia seleccionada, estableciendo así la configuración óptima de instalación para cada ciudad.

Análisis Comparativo entre Ciudades: Se compararon las configuraciones óptimas identificadas en cada ciudad, analizando cómo las diferencias en latitud y condiciones climáticas locales influyen en el rendimiento del sistema. Este análisis permitió generar recomendaciones específicas para el diseño de colectores solares en diferentes zonas de la costa peruana.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados numéricos obtenidos a partir de la simulación del modelo matemático, el cual fue implementado para estimar la energía solar incidente en un conjunto de un colector de tubo de vacío, como parte de una terma solar. Para determinar el ángulo de inclinación y la separación óptima entre tubos, se hizo considerando la máxima cosecha de energía solar anual (Urbano, 2020). Los resultados obtenidos fueron considerando dos escenarios: (i) el tubo de vacío (unidad colectora) instalado en una terma solar en la ciudad de Trujillo, y (ii) el colector de tubos de vacío instalado en cuatro ciudades costeras del Perú. Es importante mencionar que el modelo matemático desarrollado se encuentra en los anexos del presente trabajo.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la energía solar anual captada por un tubo de vacío colocado en diferentes ángulos de inclinación: β de 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° y 45° para la ciudad de Trujillo, Perú. Así mismo, la figura muestra los resultados para una distancia entre centros de tubos de 58 mm (izquierda) y 116 mm (derecha), lo que corresponde a $B/D_2 = 1$ y 2, respectivamente. Ambos gráficos ilustran que la energía solar disponible varía con el ángulo de inclinación del tubo de vacío y el día del año. Para ángulos de inclinación de 0° a 10° , la cantidad diaria de energía recolectada es mayor desde el equinoccio de septiembre ($n = 266$) hasta el equinoccio de marzo ($n = 79$), cubriendo las estaciones de primavera y verano. A medida que aumenta el ángulo de inclinación, la energía diaria recolectada en primavera y verano disminuye, mientras que la energía recolectada en otoño e invierno aumenta.

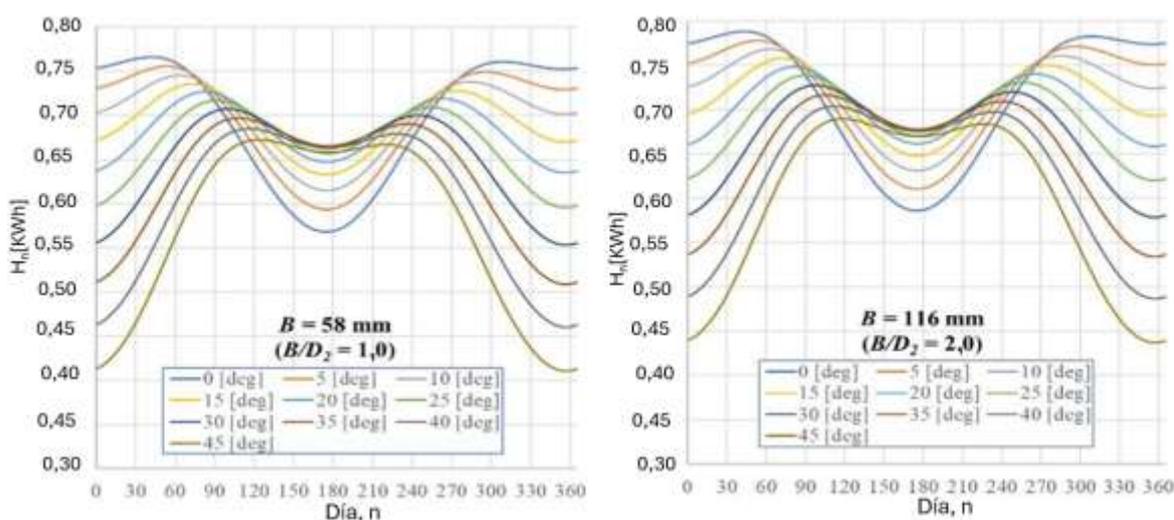


Figura 2. Evolución diaria de la energía solar incidente en un tubo de vacío

Para ángulos de inclinación entre 10° y 25° se observa un comportamiento sinusoidal de baja amplitud, con picos en los equinoccios de marzo y septiembre y valles en los solsticios de junio ($n = 173$) y diciembre (n

= 355). Para ángulos de inclinación superiores a 20° , la energía recogida por el tubo de vacío es mayor desde el equinoccio de marzo ($n = 79$) hasta el equinoccio de septiembre ($n = 266$), correspondientes a las estaciones de otoño e invierno.

Al comparar los gráficos de la izquierda y la derecha de la Figura 2 se observa que existe influencia de la separación entre los tubos. Un estudio analítico indica que hay aumentos mínimos en la energía solar recolectada, que van del 19% al 23%, cuando la separación del tubo de vacío, B/D_2 , cambia de uno a dos. Este aumento mínimo en la energía recolectada generalmente ocurre alrededor del solsticio de junio ($n = 173$). Por el contrario, los aumentos máximos, observados alrededor del solsticio de diciembre, oscilan entre el 24% ($\beta = 0$) y el 41% ($\beta = 45$). Estos aumentos, aunque mínimos, son significativos, ya que representan un porcentaje sustancial de la energía solar total capturada, lo que lleva a una utilización más eficiente de la energía solar. Sin embargo, es importante considerar que esto implica el uso de una mayor superficie para el mismo número de tubos de vacío, lo que puede requerir equipos más grandes y resultar en mayores costos.

Un análisis exhaustivo del recurso solar disponible en Trujillo, Perú, para un tubo de vacío durante todo el año, se muestra en la Figura 3. Esta figura muestra la energía solar disponible para un tubo de vacío en función del ángulo de inclinación para tres separaciones entre tubos de vacío: 58 mm, 97 mm y 116 mm. Se demuestra que, para las tres separaciones, un ángulo de inclinación entre 5° y 10° garantiza la mayor disponibilidad de energía solar. Además, para ángulos de inclinación β entre 5° y 15° , el aumento de la separación de 58 mm ($B/D_2 = 1$) a 96 mm ($B/D_2 = 1,5$) da como resultado un aumento del 20% en la recolección anual de energía. La ampliación de la separación a 116 mm ($B/D_2 = 2,0$) aumenta la captación de energía en un 23,5%. Estas ganancias se deben a la reducción del sombreado de los tubos adyacentes, particularmente durante los ángulos de baja elevación solar temprano en la mañana y al final de la tarde.

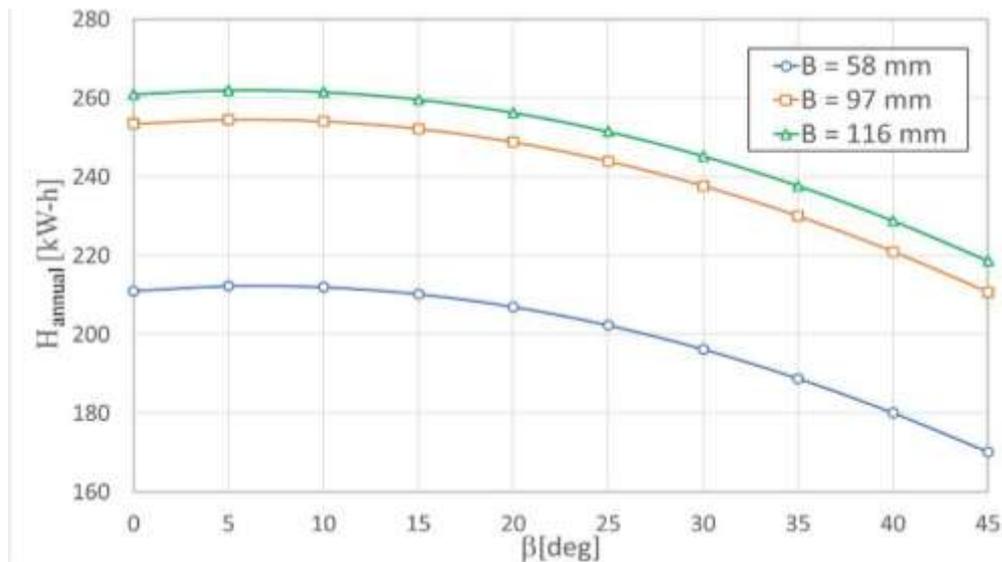


Figura 3. Influencia de la energía anual disponible para un tubo de vacío de 58, 97 y 116 mm.

Estos resultados concuerdan con las medidas experimentales realizadas por Schumann et al. (2021) quienes analizaron el impacto de la distancia entre los tubos (con el mismo número de tubos) en la eficiencia de recolección de energía solar, verificando que la eficiencia de recolección es proporcional al área específica de apertura. Los cálculos son para un tubo instalado en Trujillo en función de su ángulo de inclinación y para separaciones entre tubos de vacío adyacentes.

La Figura 4 presenta la energía anual recolectada por un tubo de vacío con una separación de tubo de vacío de 116 de cinco ciudades costeras peruanas: Piura, Trujillo, Lima, Nazca y Tacna. Esta figura demuestra que la energía solar máxima recogida por un tubo de vacío depende de la ubicación geográfica, en particular de la latitud y la altitud. Se evaluó la energía acumulada anual para las ciudades de Piura, Trujillo, Lima, Nazca y Tacna.

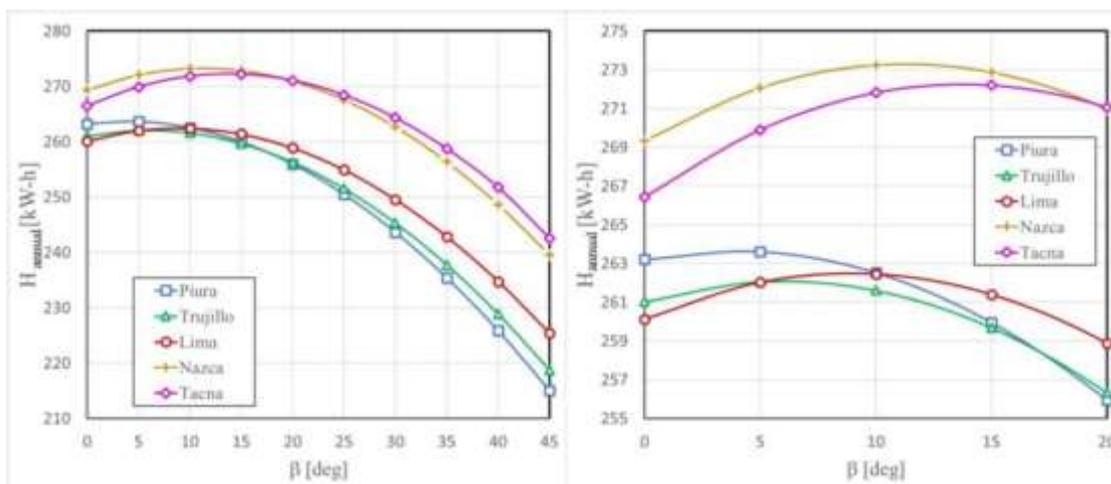


Figura 4. Energía anual recolectada en cinco ciudades costeras peruanas en función del ángulo de inclinación de tubo al vacío

Por ejemplo, en la ciudad de Piura, la segunda ciudad costera más septentrional del Perú (latitud igual a $-5,197087^\circ$), la energía radiante máxima recolectada se logra en ángulos de inclinación de tubos de vacío que van de 0° a 5° . Para ciudades como Trujillo (latitud igual a $-8,111670^\circ$) y Lima (latitud igual a $-12,063015^\circ$), la máxima energía solar recolectada por un tubo de vacío se produce en ángulos de inclinación entre 5° y 10° . Finalmente, en ciudades como Nazca (latitud igual a $-14,830980^\circ$) y Tacna, la ciudad más austral del Perú (latitud igual a $-18,014162^\circ$), la máxima energía solar anual recolectada por un tubo de vacío se produce en un ángulo de inclinación que oscila entre 10° y 15° .

Otra observación significativa se refiere a las ciudades del sur del Perú, como Nazca y Tacna, donde la energía máxima anual recolectada por un tubo de vacío es aproximadamente un 4% más alta que en las otras ciudades. Este ligero aumento se atribuye principalmente a las mayores altitudes de estas ciudades, lo que resulta en una menor atenuación de la radiación solar incidente en comparación con las ciudades del norte, que se encuentran a pocos metros sobre el nivel del mar.

En general, los resultados representados en la Figura 4 indican que el ángulo de inclinación óptimo para los tubos de vacío en el colector depende de la latitud del lugar de instalación. A partir de esto, se puede inferir que, para lograr la máxima captura de energía radiante solar, la terma solar de tubo de vacío debe diseñarse de acuerdo con su ubicación de operación específica, generalmente en ángulos ligeramente menores que la latitud. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el ángulo de inclinación afecta significativamente el efecto termosifón que se produce en el agua dentro de los tubos de vacío de dichos sistemas térmicos. Por lo tanto, se requiere más investigación para dichos equipos, donde este fenómeno juega un papel en la maximización de la conversión de energía solar en energía térmica.

Sin embargo, para las regiones costeras del Perú, se recomienda que los tubos de vacío se dispongan en ángulos de inclinación de 15° para capturar la mayor cantidad de energía solar y simultáneamente inducir el efecto termosifón como el fenómeno principal involucrado en la conversión eficiente de la energía solar en energía térmica en termas solares de tubo de vacío.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se establecen las siguientes conclusiones:

La captación de energía por un tubo de vacío varía según la estación del año. Para ángulos menores a 10° , se observa mayor captación entre septiembre y marzo (primavera-verano). En cambio, con ángulos mayores a 25° , la captación se incrementa entre marzo y septiembre (otoño-invierno). Los ángulos intermedios, entre 10° y 25° , generan una captación más uniforme, semejante a una onda sinusoidal de baja amplitud, por lo que se recomienda este rango en la práctica.

La separación relativa $B/D_2 = 2$ en el rango de 1,0 a 2,0 aumenta la recolección de energía en aproximadamente 23,5 %. Este efecto se debe a la menor interferencia entre tubos adyacentes, especialmente en las primeras horas de la mañana y en la tarde. Una separación adecuada, por tanto, es clave para maximizar la radiación captada.

El ángulo óptimo de inclinación depende de la latitud de donde se hace la instalación. Para las ciudades costeras del Perú, se recomienda una inclinación cercana a 15° , con una separación relativa entre tubos de vacío de $B/D_2 = 2$. Esta disposición probablemente maximiza la conversión de energía solar en energía térmica. Sin embargo, esta conclusión es preliminar, ya que no se consideró el efecto termosifón ni las pérdidas reales de operación.

Esta investigación se basó en un modelo teórico por lo tanto no se incluyeron efectos de termosifón, pérdidas térmicas por convección y por radiación, ni aspectos como la suciedad o la corrosión propios de ambientes costeros. Estas limitaciones deben ser abordadas en futuras investigaciones para consolidar los resultados.

La aplicación de ángulos y separaciones óptimas de los tubos de vacío en termas solares comerciales enfrenta desafíos como la disponibilidad de espacio, la necesidad de estructuras de soporte ajustables, la inclinación fija de techos existentes y los costos asociados a la adaptación de sistemas. Estos factores condicionan la viabilidad práctica de la configuración propuesta.

Para instaladores y responsables de termas solares en regiones costeras del Perú, se recomienda adoptar una inclinación cercana a 15° y una separación relativa $B/D_2 = 2$, siempre que las condiciones estructurales lo permitan. Además, se sugiere utilizar soportes resistentes a la corrosión y prever planes de mantenimiento tales como limpieza periódica de los tubos con el fin de mantener el rendimiento esperado.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bracamonte, J., Parada, J., Dimas, J., & Baritto, M. (2015). Effect of the collector tilt angle on thermal efficiency and stratification of passive water in glass evacuated tube solar water heater. *Applied Energy*, 155, 648–659. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.010>
- Budihardjo, I. (2005). Evacuated tubular solar water heaters (Tesis doctoral, University of New South Wales, Sidney, Australia).
- Bergmann, J., Vinke, K., Fernández-Palomino, C., Gornott, C., Gleixner, S., Laudien, R., Lobanova, A., Ludescher, J., & Schellnhuber, H. (2021). Assessing the evidence: Climate change and migration in Peru. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) & International Organization for Migration (IOM).
- Da Silva, B., Saccol, F., Caetano, N., Pedrazzi, C., & Caetano, N. (2017). Technical and economic viability for the briquettes manufacture. *Defect and Diffusion Forum*, 380, 218–226. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.380.218>
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Handoyo, E., Ichسانی, D., & Prabowo, A. (2013). The optimal tilt angle of a solar collector. *Energy Procedia*, 32, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.022>
- Hassan, Z., Mahmood, M., Ahmed, N., Saeed, M. H., Khan, R., Abbas, M. M., Abdelsalam, E. (2023). Techno-economic assessment of evacuated flat-plate solar collector system for industrial process heat. *SCI*, 2185-2201. <https://doi.org/10.1002/ese3.1447>
- Huang, Y., & Wu, Y. (2023). Short-term photovoltaic power forecasting based on a novel auto former model. *Symmetry*, 15(2), 238. <https://doi.org/10.3390/sym15020238>
- Klunk, M., Shah, Z., Caetano, N., Conceição, R., Wander, P., Dasgupta, S., & Das, M. (2020). CO₂ sequestration by magnesite mineralisation through interaction of Mg-brine and CO₂: Integrated laboratory experiments and computerised geochemical modelling. *International Journal of Environmental Studies*, 77(4), 492–509. <https://doi.org/10.1080/00207233.2020.1715505>
- Marinca, V., & Herisanu, N. (2020). Construction of analytic solutions to axisymmetric flow and heat transfer on a moving cylinder. *Symmetry*, 12(8), 1335. <https://doi.org/10.3390/sym12081335>
- Rabl, A. (1985). *Active solar collectors and their applications* (1.^a ed.). Oxford University Press.
- Ruoso, A., Bitencourt, L., Sudati, L., Klunk, M., & Caetano, N. (2019). New parameters for the forest biomass waste Eco firewood manufacturing process optimization. *Periodico The Quimica*, 16(32), 560–571.

- Sadeghi, G., Pisello, A., Safarzadeh, H., Poorhossein, M., & Jowzi, M. (2020). On the effect of storage tank type on the performance of evacuated tube solar collectors: Solar radiation prediction analysis and case study. *Energy*, 198, 117331. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117331>
- Schumann, J., Schiebler, B., & Giovannetti, F. (2021). Performance evaluation of an evacuated tube collector with a low-cost diffuse reflector. *Energies*, 14(21), 8209. <https://doi.org/10.3390/en14218209>
- Tang, R., Gao, W., Yu, Y., & Chen, H. (2009). Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors. *Energy*, 34(9), 1387–1395. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.002>
- Togun, H., Hamidatou, S., Mohammed, H., Abed, A., Hasan, H., Homod, R., Al-Fatlawi, A., Al-Thamir, M., & Abdulrazzaq, T. (2023). Numerical simulation on heat transfer augmentation by using innovative hybrid ribs in a forward-facing contracting channel. *Symmetry*, 15(3), 690. <https://doi.org/10.3390/sym15030690>
- Urbano, E. (2020). Análisis, diseño energético y control de una terma solar de tubos al vacío de 150 litros adaptada a condiciones climáticas del norte costero del Perú (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Trujillo, Perú).
- Venturini, M., Bageston, J., Caetano, N., Peres, L., Bencherif, H., & Schuch, N. (2018). Mesopause region temperature variability and its trend in southern Brazil. *Annales Geophysicae*, 36, 301–310. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-301-2018>
- Zang, H., Guo, M., Wei, Z., & Sun, G. (2013). Determination of the optimal tilt angle of solar collectors for different climates of China. *Sustainability*, 8(7), 654. <https://doi.org/10.3390/su8070654>

6. ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de la Energía Anual Colectada por un Tubo al Vacío

A continuación, se detallan los cálculos preliminares y definitivos que se desarrollaron para el cálculo de la energía captada por un tubo de manera diaria y finalmente la colección anual en función del ángulo de inclinación de la distancia entre centro de tubos y de los parámetros geométricos, sobre la cual se hicieron los cálculos de optimización.

1. POSICIÓN DEL SOL EN LAS COORDENADAS X, Y, Z

De acuerdo con (Rabl,1985) el vector posición del sol está dado por la Ecuación 1,

$$\begin{aligned}
 n_s &= (n_x, n_y, n_z), \text{ donde:} \\
 n_x &= \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \\
 n_y &= -\cos \delta \sin \omega \\
 n_z &= -\cos \delta \sin \phi \cos \omega + \sin \delta \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

La posición del sol puede reescribirse también en otro sistema de coordenadas X', Y', Z'

2. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS (X', Y', Z')

Para simplificar los cálculos Tang et al. (2009) llevó a cabo una transformación de coordenadas para la posición del sol como se muestra en la Figura 5, en la que el plano $Y'OZ'$ se encuentra alineado en la superficie de los colectores permitiendo la variación del ángulo de inclinación y la estimación de la potencia radiante directa y difusa en un solo tubo a diferentes ángulos de inclinación. Donde X' transformado representa la dirección normal al plano inclinado, la componente Y' transformado representa la dirección en grados de Y que va del este al sur y la componente Z' representa la dirección del norte al cenit, la Figura muestra las coordenadas X, Y, Z y las nuevas coordenadas X', Y', Z' .

En el nuevo sistema de referencia la posición del sol se describe con el vector posición mostrados en la Ecuación 2, la cual es planteada por (Duffie & Beckman, 2020).

$$\begin{aligned}
 n'_s &= (n'_x, n'_y, n'_z), \text{ donde.} \\
 n'_x &= n_x \cos \beta - (n_y \sin \gamma + n_z \cos \gamma) \sin \beta \\
 n'_y &= n_y \cos \gamma - n_z \sin \gamma \\
 n'_z &= n_x \sin \beta + (n_y \sin \gamma + n_z \cos \gamma) \cos \beta
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

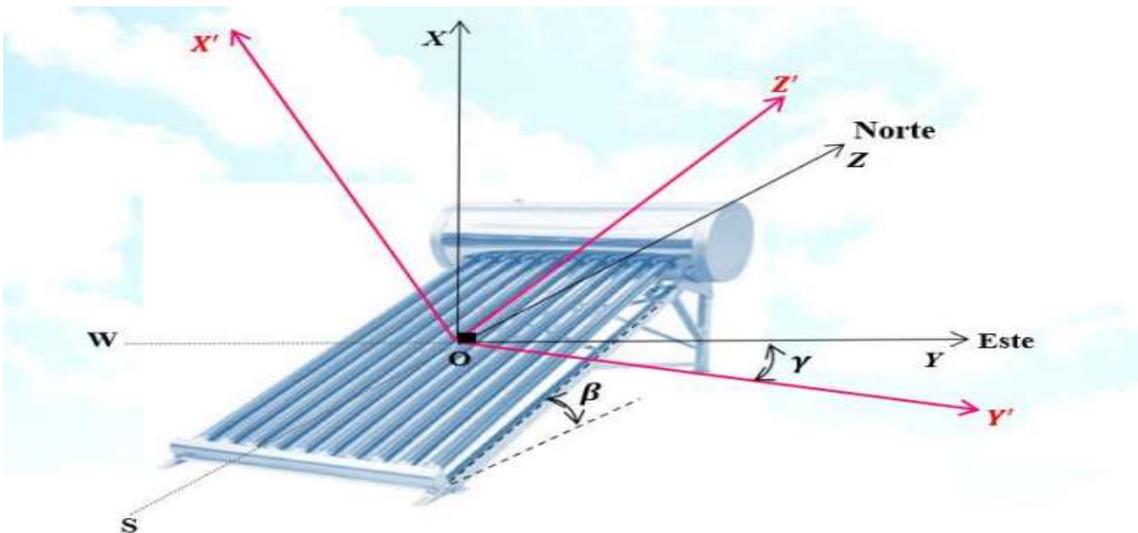


Figura 5. Transformación de coordenadas

Nota. Adaptado de *Solar Engineering of Thermal Processes (13)*, por Duffie, J. A., & Beckman, W. A. 2020, Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

3. POTENCIA DIRECTA POR UNIDAD DE LONGITUD EN UN SOLO TUBO.

La radiación que toma un solo tubo se denomina potencia directa por unidad de longitud de tubo y se determina con la Ecuación 3

$$P_{bt} = D_1 L_{tubo} G_{bn} \cos \theta_t f(\Omega) \quad (3)$$

Donde, D_1 es el diámetro del tubo interior, L_{tubo} es la longitud del tubo, G_{bn} es la radiación es la radiación normal a cielo despejado, θ_t es el ángulo formado por la proyección del rayo sobre la sección transversal y el rayo solar como se muestra en la Figura 5, $\cos \theta_t$ se determina con la Ecuación 4.

$$\cos \theta_t = \sqrt{n'_x n'_x + n'_y n'_y} \quad (4)$$

$f(\Omega)$ es la función de aceptación angular. En la Figura 5 se muestra el ángulo Ω que es necesario para el cálculo de la potencia directa por unidad de longitud. la función $f(\Omega)$ se denomina función de aceptación angular. La función de aceptación angular permitió calcular el sombreado que hay de un tubo a otro adyacente, siendo Ω_0 y Ω_1 sus ángulos críticos, así mismo se contempló la distancia de separación entre centros B para dicho cálculo. Ω se determina con la Ecuación 5.

$$\tan \Omega = \left| \frac{n'_y}{n'_x} \right| \quad (5)$$

La función de aceptación angular puede tomar 3 valores dependiendo de las 3 condiciones que se expresan en la Ecuación 6 y Ecuación 7.

$$f(\Omega) = \left. \begin{array}{l} 1 \\ \frac{B}{D_1} \cos \Omega + 0,5 \left(1 - \frac{D_2}{P_1} \right) \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Omega \leq \Omega_0 \\ \Omega_0 \leq \Omega \leq \Omega_1 \\ \Omega \geq \Omega_1 \end{array} \quad (6)$$

Ω_0, Ω_1 se obtien de las siguientes expresiones

$$\left. \begin{array}{l} \cos \Omega_0 = \frac{D_1 + D_2}{2B} \\ \cos \Omega_1 = \frac{D_1 - D_2}{2B} \end{array} \right\} \quad (7)$$

Donde D_1, D_2 son los diámetros del tubo interior y del tubo exterior respectivamente, como se ve en la Figura 6.

B es la distancia entre tubos, que a buena cuenta es la variable en este cálculo que tiene que calcularse maximizando la energía ganada por los tubos al vacío.

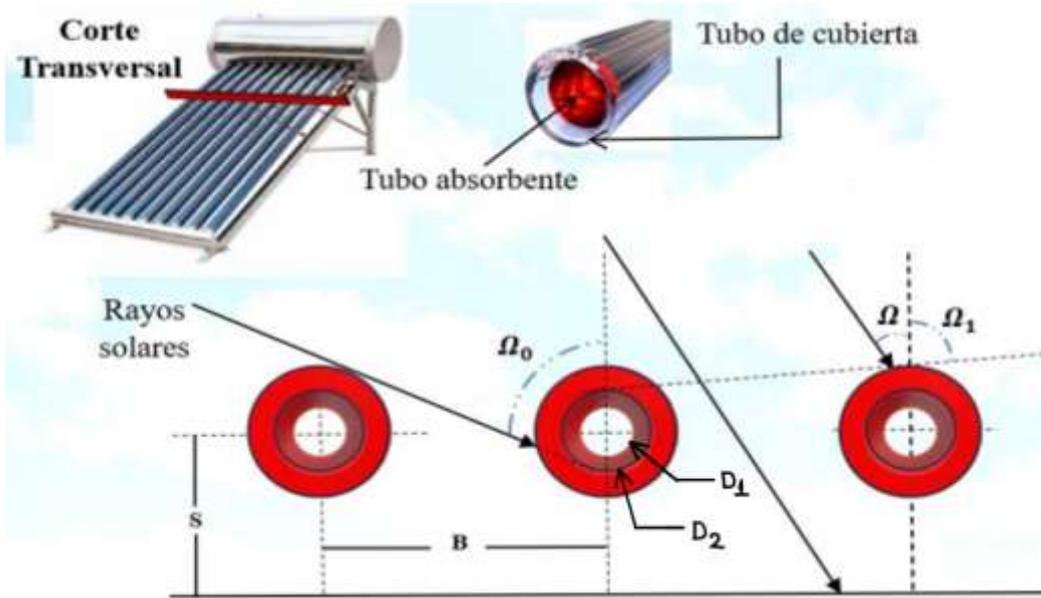


Figura 6. Ángulos críticos de la función angular

Nota. Tomado de “Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors” (p.1389), Por Tang et al. (2009), Energy, 34.

4. POTENCIA DIFUSA POR UNIDAD DE LONGITUD EN UN SOLO TUBO.

La potencia difusa por unidad de longitud de un solo tubo se determina con la Ecuación 8.

$$P_d = D_1 \int i f(\Omega) d\Omega = D_1 L_{tubo} \pi G_{d\beta} F \quad (8)$$

Donde, D_1 es el diámetro del tubo interior (recordar que son dos tubos separados por un vacío), π es una constante, $G_{d\beta}$ es la radiación difusa y se determina con la ecuación 9.

$$G_{d\beta} = 0,5(1 + \cos \beta) G_d \quad (9)$$

F es el factor de forma que viene hacer la configuración geométrica de los tubos se determina con la Ecuación 10

$$F = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\Omega) d\Omega \quad (10)$$

Al resolver la ecuación anterior se obtiene la Ecuación 11.

$$F = \left[\Omega_0 + 0,5 \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right) (\Omega_1 - \Omega_0) + \left(\frac{B}{D_1} \right) (\sin \Omega_1 - \sin \Omega_0) \right] / \pi \quad (11)$$

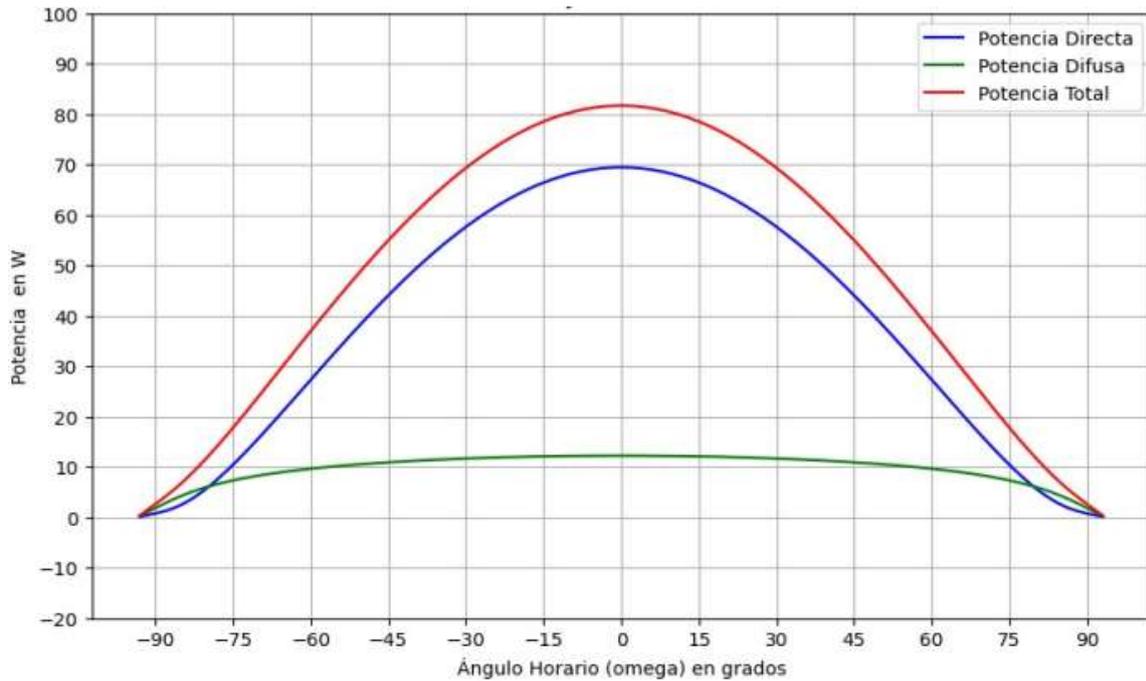


Figura 7. Radiación para un tubo al vacío desde que sale hasta que se opone el sol

5. CAPTACIÓN DIARIA DE ENERGÍA PARA UN SOLO TUBO AL VACÍO EN POSICIÓN HORIZONTAL

Para el cálculo de la Energía Total diaria acumulada por unidad de longitud en un solo tubo, Ecuación 13, se integró la función de Potencia Total, Ecuación 12, cuyos límites de integración fueron el ángulo horario del amanecer del sol y el ángulo horario del atardecer.

$$P_{tot} = P_{bt} + P_{dt} = D_1 L_{tube} \left[G_{bn} \cos \theta_t f(\Omega) + \pi G_{d\beta} F_{T-s} \right] \quad (12)$$

$$H_n = D_1 L_{tube} \int_{-t_s}^{t_s} \left[G_{bn} \cos \theta_t f(\Omega) + \pi G_{d\beta} F_{T-s} \right] dt \quad (13)$$

Donde: $-t_s$ es la hora del amanecer y t_s es la hora del atardecer. Finalmente, se aplicó el mismo procedimiento matemático para los 364 días restantes, obteniendo una cantidad específica de energía solar en Joules (J) dado por la Ecuación 14.

$$H_{annual} = \sum_{n=1}^{365} H_n \quad (14)$$