

# **SIMULACIÓN DINÁMICA EN TRNSYS DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS EVACUADOS PARA DETERMINAR LA INCLINACIÓN ÓPTIMA DE MAYOR RENTABILIDAD PARA LA CIUDAD DE DURANGO**

**Hernández-Flores, Laelia Majalis.<sup>1</sup>; Ríos-Orozco, Carlos Omar.<sup>1</sup>; Escobedo-Bretado Jorge Alberto<sup>2</sup>; Martín-Domínguez Ignacio Ramiro<sup>2</sup>; Cervantes-Mata Miguel Ángel<sup>1</sup>; Carrillo-Rivas, Jessica Yareli<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Metal – Mecánica, Instituto Tecnológico de Durango  
Felipe Pescador 1803 Ote, Nueva Vizcaya, 34080, Durango, Dgo., México.

Teléfono +52 (618) 829 0900

[maya.liz.ro@gmail.com](mailto:maya.liz.ro@gmail.com), [c.omar.rios@gmail.com](mailto:c.omar.rios@gmail.com), [macervantes\\_52@hotmail.com](mailto:macervantes_52@hotmail.com),  
[ing.jessica.carrillo@gmail.com](mailto:ing.jessica.carrillo@gmail.com)

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Unidad Durango  
Victoria 147 Norte Zona Centro, 34000, Durango, Dgo., México.

Teléfono +52 (618) 811 3572 y +52 (618) 811 0774

[jorge.escobedo@cimav.edu.mx](mailto:jorge.escobedo@cimav.edu.mx), [ignacio.martin@cimav.edu.mx](mailto:ignacio.martin@cimav.edu.mx)

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta la mayor rentabilidad anual y mensual de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados, en función de la inclinación óptima para la Ciudad de Durango Dgo.

Con el propósito de aprovechar de manera eficiente la incidencia de la energía solar captada en los colectores solares, este trabajo aportara un estudio que compruebe la inclinación óptima a la que deben ser instalados los colectores solares en la ciudad de Durango Dgo.

Se presentan resultado de la simulación de dos casos de estudio, un sistema solar con un colector de placa plana y un colector solar de tubos evacuados, simulado en la plataforma computacional TRNSYS (Transient System Simulation Program). En la simulación se utilizan condiciones climáticas de la ciudad de Durango, el análisis paramétrico abarca de 0 a 90 grados con un intervalo de 1, para determinar en qué ángulo el colector de mayor captación energía en periodos diarios, mensuales, estacionales y anuales.

El presente trabajo puede contribuir a combatir el calentamiento global y reducir la contaminación que provoca producir energía térmica para aplicaciones industriales con gas natural, gas LP, carbón, etc.; además de influir notablemente en el ahorro económico que implica contar con este tipo de colector solar.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad, cada día más apremiante, de aprovechar las fuentes renovables de energía en sustitución de combustibles fósiles, impulsa a revisar y optimizar el diseño de los sistemas actualmente utilizados para la captación de la energía solar; la energía solar es la energía obtenida directamente del sol. Aparte de su uso como fuente de iluminación, la radiación solar que incide en la Tierra puede aprovecharse de dos maneras: Transformación de la radiación solar en calor: se denomina *energía solar térmica*. Transformación de la radiación solar en electricidad: se denomina *energía solar fotovoltaica*. La principal tecnología para el aprovechamiento térmico de la radiación solar son los colectores solares. Los calentadores solares se dividen principalmente en dos tipos: colectores solares planos y tubos evacuados [1].

El flujo de la energía radiante que toma el colector proviene del rango visible del espectro solar de las longitudes de onda, este por su naturaleza varía con el tiempo. Las condiciones climatológicas son tomadas en cuenta ya que ningún clima es igual en cualquier parte del mundo. Pero para encontrar las condiciones óptimas para adquirir el máximo rendimiento de un colector, se es necesario hacer una investigación para obtener dicha eficiencia a través de software e información de los colectores [2].

Por lo tanto, en la ciudad de Durango ha sido necesario realizar investigaciones enfocadas al análisis del comportamiento de la captación de la energía en colectores solares en base al ángulo de inclinación del mismo.

## OBJETIVO

Determinar la rentabilidad (mensual y anual) de colectores solares de placa plana y tubos evacuados en base a su ángulo de inclinación determinando la energía útil que los colectores pueden ser capaces de captar a lo largo de un año y en periodos parciales en la ciudad de Durango, Dgo. México.

## METODOLOGÍA

En esta sección se describirán cada uno de los componentes que se utilizaron al momento de realizar el sistema para su simulación en el Software TRNSYS. Para encontrar el grado óptimo de inclinación en un colector de tubos evacuados a lo largo de un año en la ciudad de Durango.

Para la simulación del sistema de calentamiento solar se seleccionaron modelos matemáticos genéricos, disponibles en la librería de TRNSYS, adecuándolos a las características exactas de los equipos utilizados mediante la asignación de valores a los parámetros de diseño. Los dispositivos simulados fueron:

### *Colector solar plano.*

El colector solar plano que se utilizó (figura 1) corresponde a un modelo disponible comercialmente en México, pero con fabricación y prueba en Estados Unidos. Alcanzan temperaturas desde los 30°C hasta 90° C dependiendo de las necesidades del consumidor y la zona del país en donde se instalen. Cuenta con las siguientes características: Absorbedor de cobre con superficie selectiva BLACK, BLUE o de aluminio con superficie selectiva color negro, vidrio templado solar prismático y aislamiento de poliuretano y lana mineral. Certificados europeos UNE-12975. Solar Keymark y SRCC (EUA).



Figura 1.- Colector solar de placa plana MS 2.4 [3]

El colector está dotado de un área total de 2.506 m<sup>2</sup>. La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.0215 kg / (s m<sup>2</sup>) [4]. La curva de eficiencia térmica provista por el fabricante se desarrolla a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.697 - 3.14480 \frac{P}{G} - 0.01650 \frac{P^2}{G} \quad (1)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia térmica del colector,  $P = (T_i - T_a)$   $T_i$  es la temperatura de agua de entrada al colector,  $T_a$  es la temperatura ambiente y  $G$  es la radiación solar incidente sobre el

colector solar. Los datos se tomaron de la ficha técnica expedida por la Solar Rating & Certification Corporation (SRCC, 2015).

### *Colectores Solares de Tubos Evacuados*

En el caso del sistema de colectores de tubos evacuados se utilizó el modelo Apricus AP 30 (figura 2) en el cual se utilizó el área del colector de 4.158 m<sup>2</sup>, con una eficiencia de la pendiente de 1.35090 KJ/hr.m<sup>2</sup>K con un flujo de calor específico de 4.190 KJ/kgK.

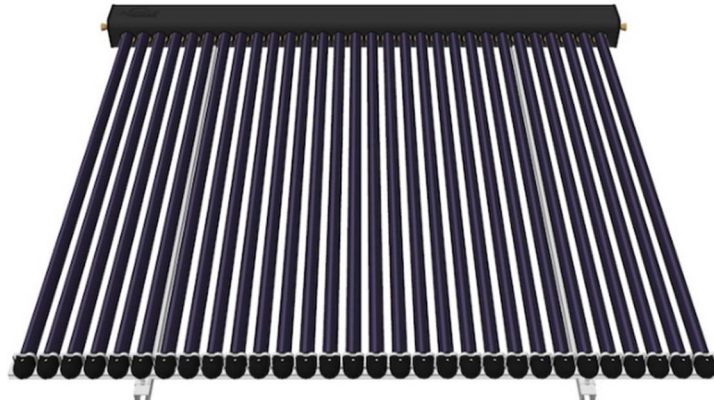


Figura 2.- Colector solar de tubos evacuados modelo Apricus AP 30

La curva de eficiencia térmica provista por el fabricante se desarrolla a partir de la siguiente ecuación:









$$\eta = 0.456 - 1.35090 \frac{P}{1} - 0.00380 \frac{P^2}{1} \quad (2)$$

El modelo del sistema para el calentamiento del agua en un colector solar (Colector solar plano y colector solar de tubos evacuados [5]) utilizando el paquete de simulación de sistemas térmicos TRNSYS 16. Los componentes principales del sistema son (Tabla 1):

- Colector solar de tubos evacuados Apricus AP-30C
- Colector solar de placa plana MS 2.4
- Bomba de agua
- TMY
- Calculadora
- Integrador
- Graficador
- Impresora

Se realizó el sistema simulado que constaba de un colector solar, en el cual se hizo un análisis paramétrico de 0 a 90 grados con un intervalo de 1, para determinar en qué ángulo el colector captaba mayor energía. La simulación se desarrolló para periodos de un año, mensuales y cada tres meses. Los datos se integraron en el tiempo, para obtener valores diarios y anuales.

**Tabla 1** Descripción y simbología de componentes principales del sistema [6].

<p><b>Colector solar de tubos evacuados Apricus AP-30C</b></p>	
<p><b>Colector solar de placa plana MS 2.4</b></p>	
<p><b>Bomba de Agua.</b> La bomba tiene un flujo másico de 0.0215 kg/s y se considera que el calor específico del fluido es de 4.190 kJ / kg K, correspondiente al calor específico del agua.</p>	 <p>Bomba de Agua</p>
<p><b>Generador de Clima (TMY).</b> Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Durango son generados por el modelo de Generador de Clima de TRNSYS. Este modelo tiene la capacidad de leer datos en intervalos regulares de tiempo a partir de un archivo de datos climáticos externo (TMY, año típico meteorológico). Este modelo interpola los datos (incluyendo la radiación solar para superficies inclinadas) y los pone a disposición para otros componentes de TRNSYS con un paso de simulación menor a una hora si así se desea.</p>	 <p>TMY2 Durango</p>
<p><b>Calculadora.</b> Este componente cumple con la función de hacer los cálculos necesarios en los sistemas utilizados dentro de TRNSYS. Insertando la ecuación o cálculos que el usuario necesite cumpliendo la demanda de una calculadora ordinaria.</p>	 <p>Calculadora</p>
<p><b>Integrador.</b> Este componente integra una serie de cantidades durante un período de tiempo. Cada integrador tiene una cantidad de entradas y puede tener hasta no más de 500 entradas. Type24 (Integrador) es capaz de restablecer periodos largos periódicamente a lo largo de la simulación, ya sea después de un cierto número determinado de horas o después de cada mes o del año.</p>	 <p>Integradora</p>
<p><b>Graficador.</b> El componente de gráficos en línea se utiliza para mostrar las variables de sistema seleccionadas al tiempo que la simulación está progresando. Este componente es altamente recomendado y ampliamente utilizado, ya que proporciona valiosa información variable y permite a los usuarios ver de inmediato si el sistema no funciona como se desea. Las variables seleccionadas se mostrarán en una ventana parcela independiente en la pantalla.</p>	 <p>Graficador</p>
<p><b>Impresora.</b> El componente de impresora se utiliza para salida (o de impresión) seleccionado variables del sistema determinados (incluso) intervalos de tiempo. De este modo, la unidad de descriptores (kJ / hr, degC, W, etc.) están impresas en el fichero de salida con cada encabezado de columna. Los resultados de salida pueden ser impresos, incluso en intervalos de tiempo de partida en relación con la hora de inicio de la simulación o se pueden imprimir en tiempo absoluto. Type25 también es capaz de imprimir la información de la simulación como un encabezado al archivo de salida (nombre del archivo de entrada, y el tiempo de ejecución de la simulación). Además, es capaz de añadir nuevos datos a un archivo existente o se puede configurar para sobrescribir el archivo existente.</p>	 <p>Impresora</p>

## Simulación del sistema.

Se simuló la operación del sistema durante periodos de un año, realizando cálculos cada hora (paso). Las condiciones climáticas son idénticas para cada corrida y corresponden a un año típico en la ciudad Durango, Dgo.

En la figura 3 se muestra el sistema propuesto; **Caso 1** sistema con colector solar de placa plana; **Caso 2** sistema con colector solar de tubos evacuados, dichas figuras ilustran la posición de los equipos y su interconexión implementados en TRNSYS.

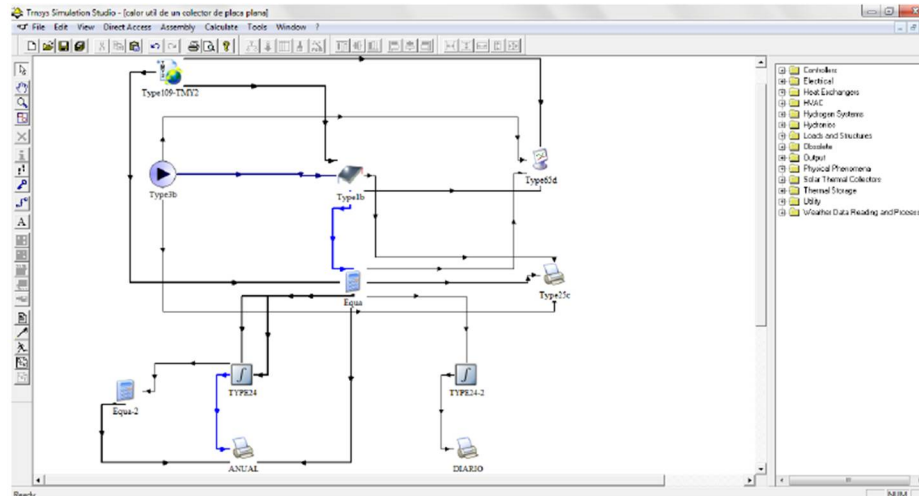


Figura 3.- Simulación en TRNSYS

**Nota:** El circuito mostrado en la figura 3 es aplicable para los dos casos de estudio, solo varía el tipo de colector a analizar.

Teniendo el circuito funcional se desarrolló un análisis paramétrico, con el objetivo de simplificar el proceso a la hora de mostrar los datos en una sola corrida de programa, en vez de hacer corridas individuales para cada ángulo de inclinación del colector. En las figuras 4, 5 y 6 se muestra el análisis paramétrico del sistema.

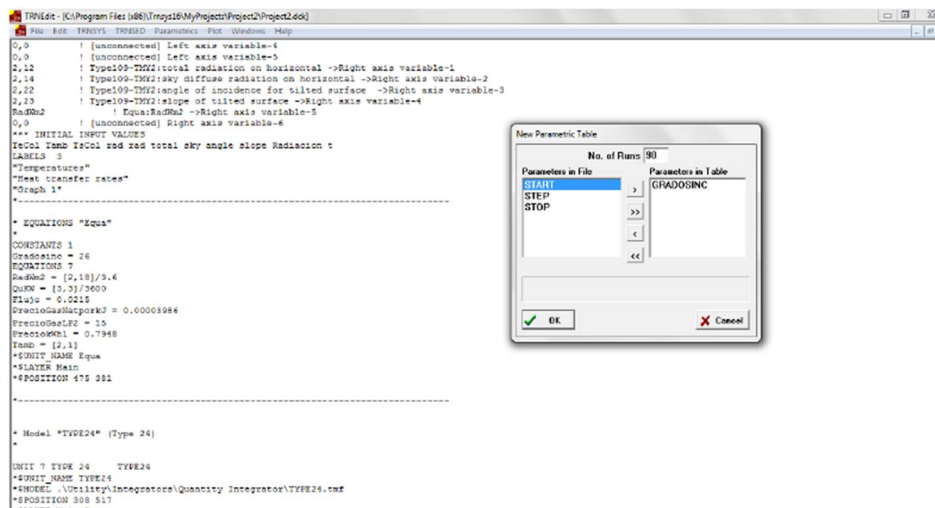


Figura 4.- Configuración del Análisis Paramétrico en TRNSYS.

Inclinación y Energía util de un Colector de Placa Plana MS2.5							Tarifa de negocio Region NorOeste		Tarifa doméstica >150kWh	
Año	Energía kWh	Energía KJ	Ángulo	\$ Gas LP	KgGasLP@85%	Costo	\$ KWH	Costo	\$KWh	costo
8,760	2,636.1128	9,490,006.1584	0	15.00	237.55	3,563.21	0.79	2,095.18	2.86	7536.64656
8,760	2,660.6620	9,578,383.2996	1	15.00	239.76	3,596.39	0.79	2,114.69	2.86	7606.83274
8,760	2,684.2267	9,663,216.0756	2	15.00	241.88	3,628.24	0.79	2,133.42	2.86	7674.2041
8,760	2,706.9219	9,744,918.6681	3	15.00	243.93	3,658.92	0.79	2,151.46	2.86	7739.08958
8,760	2,728.7441	9,823,478.7894	4	15.00	245.89	3,688.42	0.79	2,168.81	2.86	7801.47941
8,760	2,749.6722	9,898,820.0868	5	15.00	247.78	3,716.70	0.79	2,185.44	2.86	7861.31295
8,760	2,769.6963	9,970,906.6586	6	15.00	249.58	3,743.77	0.79	2,201.35	2.86	7918.5617
8,760	2,788.8174	10,039,742.5219	7	15.00	251.31	3,769.62	0.79	2,216.55	2.86	7973.22885
8,760	2,807.0262	10,105,294.4153	8	15.00	252.95	3,794.23	0.79	2,231.02	2.86	8025.28798
8,760	2,824.3052	10,167,498.6675	9	15.00	254.51	3,817.58	0.79	2,244.76	2.86	8074.68853
8,760	2,840.3125	10,225,124.8681	10	15.00	255.95	3,839.22	0.79	2,257.48	2.86	8120.45333
8,760	2,855.1840	10,278,662.3651	11	15.00	257.29	3,859.32	0.79	2,269.30	2.86	8162.97103
8,760	2,869.0965	10,328,747.3923	12	15.00	258.54	3,878.13	0.79	2,280.36	2.86	8202.74689
8,760	2,881.6186	10,373,827.0755	13	15.00	259.67	3,895.05	0.79	2,290.31	2.86	8238.54767
8,760	2,893.5635	10,416,828.7575	14	15.00	260.75	3,911.20	0.79	2,299.80	2.86	8272.69817
8,760	2,905.1611	10,458,579.9213	15	15.00	261.79	3,926.88	0.79	2,309.02	2.86	8305.85555
8,760	2,915.7896	10,496,842.6166	16	15.00	262.75	3,941.24	0.79	2,317.47	2.86	8336.24251
8,760	2,925.4212	10,531,516.4801	17	15.00	263.62	3,954.26	0.79	2,325.12	2.86	8363.77934
8,760	2,934.0359	10,562,529.4126	18	15.00	264.39	3,965.91	0.79	2,331.97	2.86	8388.40878
8,760	2,941.6229	10,589,842.3154	19	15.00	265.08	3,976.16	0.79	2,338.00	2.86	8410.09977
8,760	2,948.2456	10,613,684.2798	20	15.00	265.67	3,985.11	0.79	2,343.27	2.86	8429.03427
8,760	2,953.8542	10,633,875.1799	21	15.00	266.18	3,992.69	0.79	2,347.72	2.86	8445.06921
8,760	2,958.4831	10,650,539.2436	22	15.00	266.60	3,998.95	0.79	2,351.40	2.86	8458.30325
8,760	2,962.1796	10,663,846.7107	23	15.00	266.93	4,003.95	0.79	2,354.34	2.86	8468.8716
8,760	2,964.9443	10,673,799.4204	24	15.00	267.18	4,007.68	0.79	2,356.54	2.86	8476.77571
8,760	2,966.7823	10,680,416.1790	25	15.00	267.34	4,010.17	0.79	2,358.00	2.86	8482.03052
8,760	2,967.6948	10,683,701.1357	26	15.00	267.43	4,011.40	0.79	2,358.72	2.86	8484.63932
8,760	2,967.6832	10,683,659.3688	27	15.00	267.43	4,011.39	0.79	2,358.71	2.86	8484.60615
8,760	2,966.7534	10,680,312.1252	28	15.00	267.34	4,010.13	0.79	2,357.98	2.86	8481.94788
8,760	2,964.9070	10,673,665.3236	29	15.00	267.18	4,007.63	0.79	2,356.51	2.86	8476.66921
8,760	2,962.1479	10,663,732.3307	30	15.00	266.93	4,003.90	0.79	2,354.32	2.86	8468.78076

Figura 5.- Análisis Paramétrico Caso 1.

Horas del año	Energía obtenida en QuKw	Energía obtenida en QuKJ	Grado de inclinación	Precio del Gas LP	KG Gas LP 85%	Costo del Gas LP	Precio del KWh Domestico	Costo del KWh Domestico	Precio del KWh Negocio	Costo del KWh Negocio
8,760	3,730.1385	13,428,498.6700	1	\$ 15.00	336.13	\$ 5,041.99	\$ 2.859	\$ 10,664.47	\$ 0.7948	\$ 2,964.71
8,760	3,756.3474	13,522,850.6110	2	\$ 15.00	338.49	\$ 5,077.42	\$ 2.859	\$ 10,739.40	\$ 0.7948	\$ 2,985.54
8,760	3,781.3332	13,612,799.4707	3	\$ 15.00	340.75	\$ 5,111.19	\$ 2.859	\$ 10,810.83	\$ 0.7948	\$ 3,005.40
8,760	3,805.0924	13,698,332.5758	4	\$ 15.00	342.89	\$ 5,143.30	\$ 2.859	\$ 10,878.76	\$ 0.7948	\$ 3,024.29
8,760	3,827.6056	13,779,380.2144	5	\$ 15.00	344.92	\$ 5,173.73	\$ 2.859	\$ 10,943.12	\$ 0.7948	\$ 3,042.18
8,760	3,848.9561	13,856,242.0020	6	\$ 15.00	346.84	\$ 5,202.59	\$ 2.859	\$ 11,004.17	\$ 0.7948	\$ 3,059.15
8,760	3,869.0144	13,928,451.8589	7	\$ 15.00	348.65	\$ 5,229.71	\$ 2.859	\$ 11,061.51	\$ 0.7948	\$ 3,075.09
8,760	3,887.9750	13,996,710.0435	8	\$ 15.00	350.36	\$ 5,255.34	\$ 2.859	\$ 11,115.72	\$ 0.7948	\$ 3,090.16
8,760	3,905.8164	14,060,939.1903	9	\$ 15.00	351.96	\$ 5,279.45	\$ 2.859	\$ 11,166.73	\$ 0.7948	\$ 3,104.34
8,760	3,922.5886	14,121,319.0415	10	\$ 15.00	353.47	\$ 5,302.12	\$ 2.859	\$ 11,214.68	\$ 0.7948	\$ 3,117.67
8,760	3,938.1243	14,177,247.3322	11	\$ 15.00	354.87	\$ 5,323.12	\$ 2.859	\$ 11,259.10	\$ 0.7948	\$ 3,130.02
8,760	3,952.3513	14,228,464.6207	12	\$ 15.00	356.16	\$ 5,342.35	\$ 2.859	\$ 11,299.77	\$ 0.7948	\$ 3,141.33
8,760	3,965.4156	14,275,496.1035	13	\$ 15.00	357.33	\$ 5,360.01	\$ 2.859	\$ 11,337.12	\$ 0.7948	\$ 3,151.71
8,760	3,977.3230	14,318,362.6455	14	\$ 15.00	358.41	\$ 5,376.11	\$ 2.859	\$ 11,371.17	\$ 0.7948	\$ 3,161.18
8,760	3,987.9197	14,356,510.9344	15	\$ 15.00	359.36	\$ 5,390.43	\$ 2.859	\$ 11,401.46	\$ 0.7948	\$ 3,169.60
8,760	3,997.3356	14,390,408.1729	16	\$ 15.00	360.21	\$ 5,403.16	\$ 2.859	\$ 11,428.38	\$ 0.7948	\$ 3,177.08
8,760	4,005.6541	14,420,354.9010	17	\$ 15.00	360.96	\$ 5,414.40	\$ 2.859	\$ 11,452.17	\$ 0.7948	\$ 3,183.69
8,760	4,012.9298	14,446,547.3091	18	\$ 15.00	361.62	\$ 5,424.24	\$ 2.859	\$ 11,472.97	\$ 0.7948	\$ 3,189.48
8,760	4,019.1808	14,469,050.8992	19	\$ 15.00	362.18	\$ 5,432.68	\$ 2.859	\$ 11,490.84	\$ 0.7948	\$ 3,194.44
8,760	4,024.4088	14,487,871.7113	20	\$ 15.00	362.65	\$ 5,439.75	\$ 2.859	\$ 11,505.78	\$ 0.7948	\$ 3,198.60
8,760	4,028.5778	14,502,880.2323	21	\$ 15.00	363.03	\$ 5,445.39	\$ 2.859	\$ 11,517.70	\$ 0.7948	\$ 3,201.91
8,760	4,031.6908	14,514,087.0361	22	\$ 15.00	363.31	\$ 5,449.59	\$ 2.859	\$ 11,526.60	\$ 0.7948	\$ 3,204.39
8,760	4,033.7561	14,521,521.9098	23	\$ 15.00	363.49	\$ 5,452.39	\$ 2.859	\$ 11,532.51	\$ 0.7948	\$ 3,206.03
8,760	4,034.7851	14,525,226.2278	24	\$ 15.00	363.59	\$ 5,453.78	\$ 2.859	\$ 11,535.45	\$ 0.7948	\$ 3,206.85
8,760	4,034.7603	14,525,137.0352	25	\$ 15.00	363.58	\$ 5,453.74	\$ 2.859	\$ 11,535.38	\$ 0.7948	\$ 3,206.83
8,760	4,033.5671	14,520,841.4515	26	\$ 15.00	363.48	\$ 5,452.13	\$ 2.859	\$ 11,531.97	\$ 0.7948	\$ 3,205.88
8,760	4,031.2983	14,512,673.8927	27	\$ 15.00	363.27	\$ 5,449.06	\$ 2.859	\$ 11,525.48	\$ 0.7948	\$ 3,204.08
8,760	4,027.9580	14,500,648.6654	28	\$ 15.00	362.97	\$ 5,444.55	\$ 2.859	\$ 11,515.93	\$ 0.7948	\$ 3,201.42
8,760	4,023.5577	14,484,807.6220	29	\$ 15.00	362.57	\$ 5,438.60	\$ 2.859	\$ 11,503.35	\$ 0.7948	\$ 3,197.92
8,760	4,018.1017	14,465,165.9620	30	\$ 15.00	362.08	\$ 5,431.23	\$ 2.859	\$ 11,487.75	\$ 0.7948	\$ 3,193.59

Figura 6.- Análisis Paramétrico Caso 2.

## RESULTADOS

En esta sección se presenta el análisis de la información obtenida mediante el software de simulación TRNSYS. Los datos obtenidos tales como: ángulos de inclinación, energía captada por el colector y el costo de esa energía, se analizaron con ayuda de una hoja de cálculo. Mediante estas herramientas computacionales se obtuvieron los valores numéricos de las variables involucradas que posteriormente se graficaron tomando en cuenta dos casos de estudio (**Caso 1** “Colector Solar de Placa Plana” y **Caso 2** “Colector Solar de Tubos Evacuados”).

### *Ángulo de inclinación ideal anual.*

Con fin del cumplir con el objetivo que se estableció al principio del desarrollo del proyecto, se determinó el ángulo óptimo de inclinación al que deben estar los colectores de placa plana en la ciudad de Durango, y en base a las simulaciones del sistema en TRNSYS se obtuvo, como se puede apreciar en la figura 7. Cada punto azul de la gráfica indica un ángulo (de 0 a 90°) al cual corresponde un valor de energía. El ángulo en cual el colector capta mayor energía en un año típico es **26° con 2,967.6948 kWh por año para el Caso 1** y **24° con 4,034.7851 kWh por año para el Caso 2**.

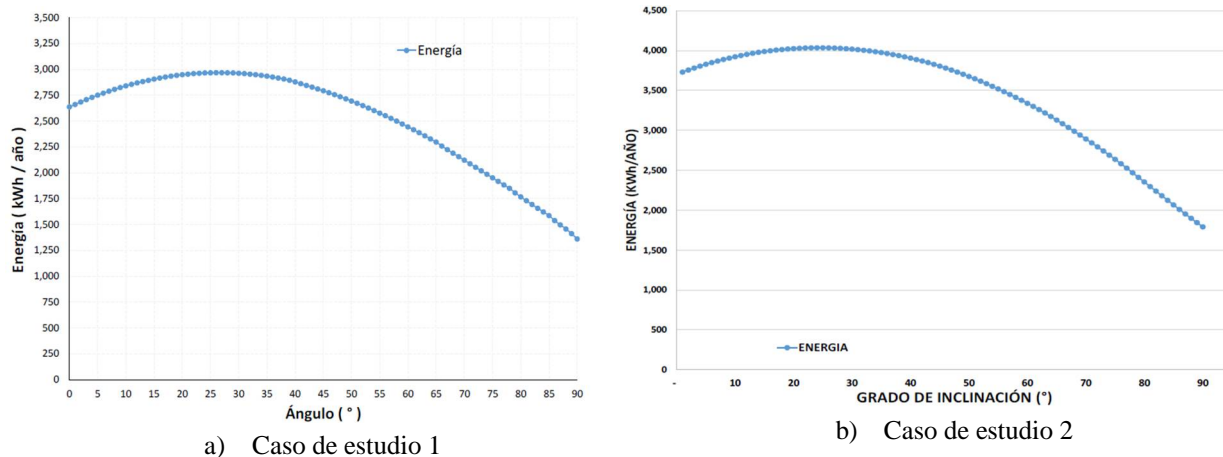


Figura 7.- Grafica de resultados del ángulo óptimo de inclinación de colectores en la ciudad de Durango.

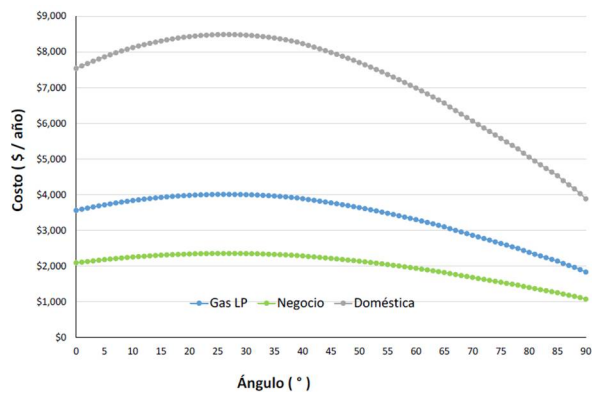
Con la energía que recolecta el colector en un año y con el fin de demostrar la rentabilidad de éstos, se graficaron los costos del gas LP y las tarifas de la energía eléctrica con respecto a la energía que capta el colector con cada ángulo de inclinación; teniendo como resultado la gráfica de la figura 8.

Los precios de Gas LP y la electricidad son:

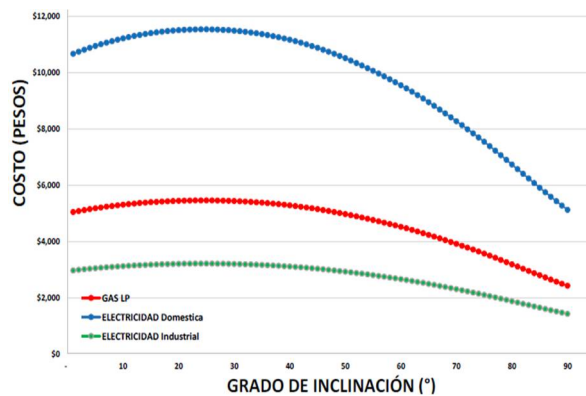
- Gas LP \$15.00 pesos el kg.
- Electricidad en negocios \$0.7948 pesos el KWh
- Electricidad domestica \$ 2.859 pesos el KWh

Estos precios fueron obtenidos por la comisión de luz CFE y el del gas en la página oficial de la empresa [7].





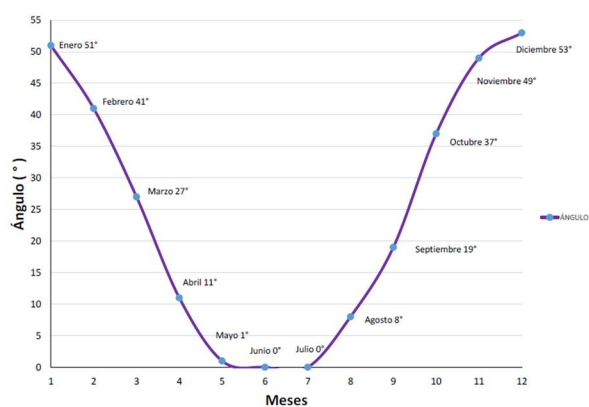
a) Caso de estudio 1



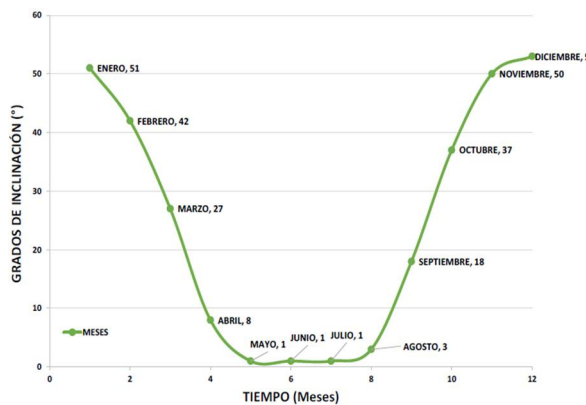
b) Caso de estudio 2

Figura 8.-. Comparación de precios con la energía captada por el colector.

Para tener un mejor aprovechamiento de la energía solar en los colectores se realizó un análisis para determinar qué tan rentable resulta determinar el ángulo de inclinación en cada mes del año, debido a la declinación solar y al movimiento de la tierra respecto al sol (Figura 9).



a) Caso de estudio 1



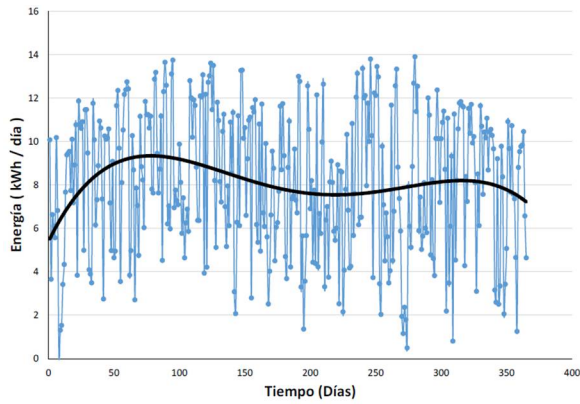
b) Caso de estudio 2

Figura 9.- Ángulo óptimo de inclinación para cada mes.

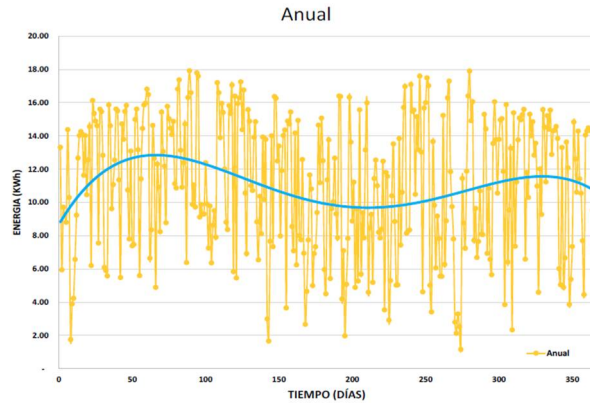
Con el fin de mostrar el comportamiento de la energía captada diariamente por el colector con el ángulo de inclinación anual (26° para el Caso 1 y 24° para el Caso 2) se realiza las gráficas la figura 10.

En donde cada punto mostrado en las gráficas representa la energía captada diariamente, lo que genera 365 resultados que a simple vista no se logra percibir lo que se quiere dar a conocer. Por tal motivo se creó una línea de tendencia polinómica de cuarto orden para apreciar el comportamiento de la energía térmica de una manera clara.

De igual manera, conociendo el ángulo de inclinación ideal de cada mes se hicieron líneas de tendencia para exponer el comportamiento de la energía captada por el colector en el año. Con base a la Figura 11 se observa que cada línea corresponde un mes y la línea de color negro es la correspondiente al grado de inclinación óptimo anual en la cual se aprecia una tendencia más uniforme que las líneas de tendencia mensuales, lo que significa que se aprovecha la energía de una manera más eficiente durante el año.

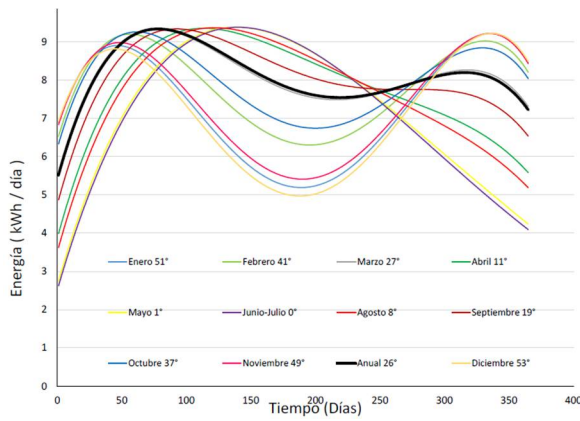


a) Caso de estudio 1

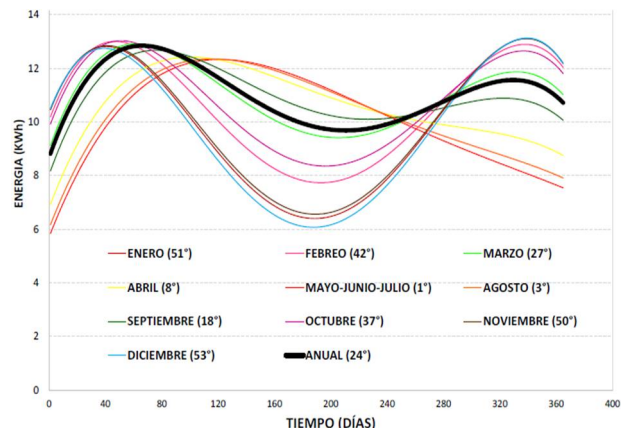


b) Caso de estudio 2

Figura 10.- Registro diario de captación de energía solar.



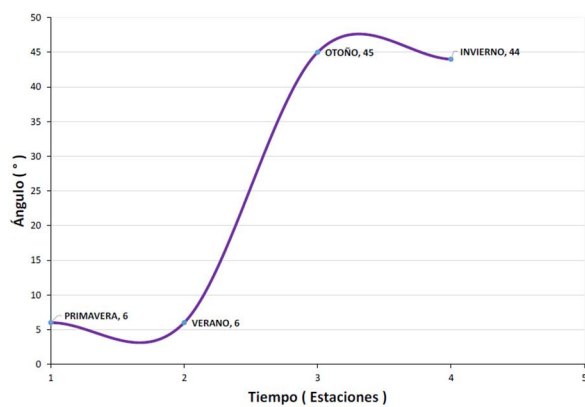
a) Caso de estudio 1



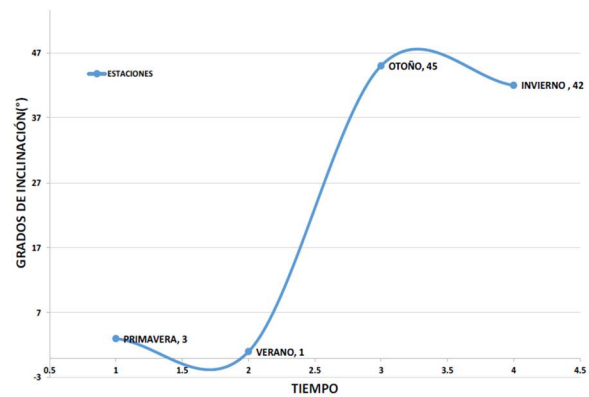
b) Caso de estudio 2

Figura 11.- Líneas de tendencias de cuarto orden mensual

Se determinó el ángulo ideal para cada estación como se muestra en la figura 12. Primavera y verano comparten el mismo ángulo y en otoño e invierno varía por un grado aproximadamente;



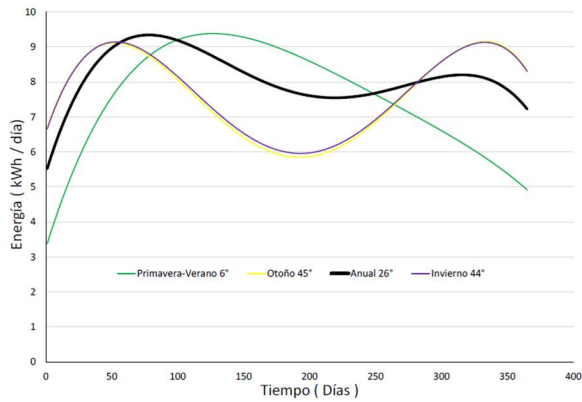
a) Caso de estudio 1



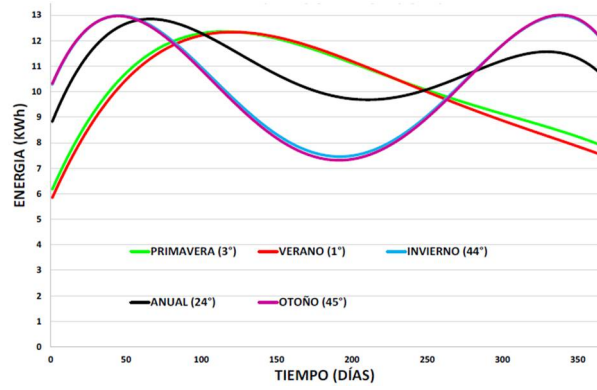
b) Caso de estudio 2

Figura 12.- Ángulo óptimo de inclinación para cada estación del año.

Fontamentalmente en la figura 13 se aprecia el comportamiento de la energía térmica con el grado de inclinación óptimo para cada estación, comparada con la línea de tendencia del ángulo de inclinación óptimo de un año.



a) Caso de estudio 1



b) Caso de estudio 2

Figura 13.- Líneas de tendencia de cuarto orden estacional

## CONCLUSIONES

Se determinó la rentabilidad (mensual y anual) de colectores solares de placa plana y tubos evacuados en base a su ángulo de inclinación determinando la energía útil que los colectores pueden ser capaces de captar a lo largo de un año y en periodos parciales en la ciudad de Durango, Dgo. México.

El ángulo de inclinación que deben tener los colectores de placa plana en la ciudad de Durango es  $26^\circ$ .

Se encontró el ángulo óptimo para la captación de energía solar para cada mes y estación para el colector probado.

La diferencia de utilizar el ángulo óptimo anual de captación de energía comparado con utilizar 12 ángulos óptimos mensuales representa el 4.9 % para el colector de placa plana.

El ángulo de inclinación que deben tener los colectores de tubos evacuados en la ciudad de Durango es  $24^\circ$ .

Con la información obtenida, se puede diseñar un campo de colectores solares para un sistema industrial con la inclinación óptima para el perfil de carga necesario.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del:

**Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol)**, A través del Proyecto:

**P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”**

Pertenciente a la Convocatoria 2013-02, del:

**Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.**

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

Jorge Alberto Escobedo Bretado

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carrillo-Rivas J. Y. (2016). Determinación de la Rentabilidad Anual de Colectores Solares de Tubos Evacuados en la Ciudad de Durango. Tesis del Instituto tecnológico de Durango.
- [2] Hernández-Flores, L. M. (2016). Simulación dinámica en TRNSYS de colectores solares de Placa Plana para determinar la inclinación óptima de mayor rentabilidad para la Ciudad de Durango. Tesis del Instituto tecnológico de Durango.
- [3] Modulo solar mr. (2016). <http://www.modulosolar.com.mx/MAXOL/InformacionTecnica.php>
- [4] Solar Rating and Certification Corporation. (2016). <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsSummaryPage.aspx?type=1>
- [5] Solar Rating and Certification Corporation. (2016). <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsReport.aspx?device=1230&units=METRICS>
- [6] Transient System Simulation Program (TRNSYS). (2005). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison. 1500 Engineering Drive, 1303 Engineering Research Building. Madison, WI 53706 – U.S.A.
- [7] Comisión federal de electricidad. (2016). <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>