



**Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

## **Informe técnico De Residencia profesional**

Diseño de un prototipo de sistema híbrido de pequeña potencia involucrando un sistema de concentración solar, para autoconsumo y generación de energía eléctrica.

**Nombre:** Oscar Emmanuel Aguilar Vera

**Nombre del asesor externo:** Dra. Sara Lilia Moya Acosta

**Nombre del asesor interno:** M.C. Julio Cesar Llaven Gordillo

### **Carrera**

Ingeniería Mecánica

**No de control:** 11270623

### **Realizado en:**

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo  
Tecnológico

**Tuxtla Gutiérrez, Chis, diciembre 2015**

## **Contenido**

Lista de figuras .....	4
Lista de graficas.....	5
Lista de tablas.....	5
Introducción .....	8
Justificación .....	9
Objetivos.....	10
1) Selección de tipo de población .....	10
1.1) Selección a nivel nacional.....	10
1.2) Selección a nivel estatal .....	12
1.2.1) Veracruz .....	13
1.2.2) Oaxaca .....	16
1.2.3) Chiapas .....	17
1.2.4) Guerrero .....	19
1.2.5) Chihuahua .....	22
1.3) Selección de la población según sus condiciones climatológicas .....	23
1.4) Planteamiento de un escenario.....	26
2) Condiciones meteorológicas.....	27
3) Propuestas de sistemas.....	28
3.1) Generación de energía a partir de concentradores cilindros parabólicos .....	28
3.1.1) Radiación solar .....	28
3.1.2) El colector cilindro parabólico (CCP).....	29
3.1.3) Características geométricas de los concentradores cilindros parabólicos .....	33
3.1.4) Pérdidas del CCP .....	38
3.1.5) Rendimiento del CCP .....	41
3.1.6) Balance de energía en el CCP en base a las eficiencias .....	44

3.1.7) Caso especial: La célula solar .....	45
3.1.8) Propuestas iniciales .....	47
<i>Propuesta 2: Opción PVT (Photovoltaic thermal)</i> .....	50
3.2) Diseño del sistema híbrido .....	54
(Energía a partir de biogás obtenido de nopal) .....	54
3.2.1) Energía a partir de biomásas .....	54
3.2.2) ¿Qué son las biomásas y bioenergías? .....	55
3.2.3) Trabajos previos .....	56
3.2.4) Proceso de producción de biogás .....	57
3.2.5) Requerimientos agro – climáticos para el cultivo de nopal. ....	59
3.2.6) Requerimiento para el cultivo .....	60
3.2.7) Cantidades necesarias .....	60
4) Diseño del sistema de CCP .....	61
4.1) Modelo a utilizar .....	61
4.2) Condiciones de operación .....	63
4.2.1) Flujo másico .....	63
4.2.2) Temperatura de entrada .....	64
4.2.3) Gradiente de temperatura .....	65
4.3) Angulo de incidencia .....	65
4.4) Eficiencia global .....	67
4.5) Primera aproximación del número de colectores a partir de cálculos analíticos ...	68
4.6) Simulación .....	69
4.7) Simulación para la propuesta 2 .....	73
5) Análisis de costos .....	78
Conclusiones .....	79
Recomendaciones para trabajos futuros .....	80

## Lista de figuras

Figura 1 Mapa de la república mexicana según la falta de luz eléctrica en sus hogares; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010 .....	12
Figura 2 Estado de Veracruz; fuente: INEGI .....	15
Figura 3 Estado de Oaxaca; fuente: INEGI .....	17
Figura 4 Estado de Chiapas; fuente: INEGI .....	19
Figura 5 Estado de Guerrero; fuente: INEGI .....	21
Figura 6 Estado de Chihuahua; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	23
Figura 7 Mapa de radiación solar en México; Fuente Instituto de investigaciones eléctricas .....	24
Figura 8 Tubo absorbedor de vacío de un CCP; fuente Zarsa 2003 .....	30
Figura 9 Sistema de seguimiento solar en un eje.....	32
Figura 10 Las dos principales orientaciones de un CCP .....	32
Figura 11 Angulo de incidencia del CCP.....	34
Figura 12 Razón de concentración geométrica del CCP .....	37
Figura 13 Propiedades ópticas de un CCP .....	39
Figura 14 Pérdidas térmicas de un CCP .....	40
Figura 15 Balance de energía en un CCP.....	45
Figura 16 16 a) Característica i-v de una célula solar. b) Potencia entregada en función de la tensión .....	46
Figura 17 Estructura de una célula solar.....	46
Figura 18 .....	57
Figura 19 .....	61
Figura 20 Esquema de modelo un-solo-paso.....	63
Figura 21 Diagrama T-S a una presión de 16 Bar.....	65
Figura 22 Representación de la unión de las tuberías de un número n de colectores con calor incidiendo sobre estos para simulación en RELAP .....	69
Figura 23 Estructura de 10 volúmenes de control para una tubería en el colector. ....	69

## Lista de graficas

Grafica 1 Consulta de: Población total de los hogares censales Por: Disponibilidad de energía eléctrica; Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. ....	11
Grafica 2 Comportamiento de la declinación a lo largo del año.....	36
Grafica 3 Comportamiento del modificador de ángulo de incidencia .....	44
Grafica 4 Rendimiento térmico del modelo absolicon T-160 .....	49
Grafica 5 Modificador de ángulo de incidencia de absolicon T160.....	50
Grafica 6 Rendimiento térmico del modelo x10 PV/T .....	52
Grafica 7 Modificador de ángulo de incidencia de Absolicon x10 PV/T .....	53
Grafica 8 Curva I-V para la propuesta PVT .....	54
Grafica 9 Perfiles de temperatura para las dos opciones de flujos máxicos .....	71
Grafica 10 Caída de presión en la propuesta 1 .....	72
Grafica 11 Perfil de temperatura para la propuesta 2.....	75
Grafica 12 Caída de presión de la propuesta 2.....	76

## Lista de tablas

Tabla 1 Consulta de: Población total de los hogares censales Por: Disponibilidad de energía eléctrica; Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. ....	11
Tabla 2 Estados con el mayor número de viviendas sin electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	13
Tabla 3 Relación de colores en base al número de viviendas sin electricidad.....	13
Tabla 4 Municipios del estado de Veracruz según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	14
Tabla 5 Municipios de Veracruz con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.....	15
Tabla 6 Municipios del estado de Oaxaca según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	16
Tabla 7 Municipios de Oaxaca con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.....	17
Tabla 8 Municipios del estado de Chiapas según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	18
Tabla 9 Municipios de Chiapas con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.....	19

Tabla 10 Municipios del estado de Guerrero según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	20
Tabla 11 Municipios de Guerrero con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.....	21
Tabla 12 Municipios del estado de Chihuahua según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.....	22
Tabla 13 Municipios con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total. ....	23
Tabla 14 Principales municipios de interés. ....	25
Tabla 15 Consumo eléctrico en una casa tipo D. ....	26
Tabla 16 Consumo eléctrico en una casa tipo E. ....	27
Tabla 17 Declinación en los días primero y quince de cada mes. ....	35
Tabla 18 Características del concentrador de la propuesta 1.....	48
Tabla 19 Características del receptor de la propuesta 1. ....	48
Tabla 20 Factores de rendimiento solar de la propuesta 1.....	48
Tabla 21 Dimensiones del tubo absorbedor de la propuesta 1.....	49
Tabla 22 Características del concentrador de la propuesta 2.....	51
Tabla 23 Características del receptor de la propuesta 2. ....	52
Tabla 24 Factores de rendimiento solar de la propuesta 2.....	52
Tabla 25 Rendimiento fotovoltaico de la propuesta 2.....	53
Tabla 26 Pruebas de potencia a diferentes temperaturas de entradas. ....	64
Tabla 27 Angulo de incidencia para diferentes horas del día en el mes de julio.....	66
Tabla 28 Potencia solar directa, a diferentes horas del día. ....	67
Tabla 29 Eficiencia global del equipo, para diferentes potencias solares directas a lo largo del día.....	67
Tabla 30 Medidas del colector de la propuesta 1 para ingresar a la simulación. ....	70
Tabla 31 Condiciones de operación de la propuesta 1.....	70
Tabla 32 Condiciones de malla de la propuesta 1.....	70
Tabla 33 Resultados y características del campo solar para la propuesta 1. ....	73
Tabla 34 Datos importantes de entrada y salida del campo simulado para la propuesta 1. ....	73
Tabla 35 Medidas del colector de la propuesta 2 para ingresar a la simulación. ....	74
Tabla 36 Condiciones de operación de la propuesta 2.....	74
Tabla 37 Condiciones de malla de la propuesta 2.....	75

Tabla 38 Resultados y características del campo solar para la propuesta 2. ....	77
Tabla 39 Datos importantes de entrada y salida del campo simulado para la propuesta 2. .....	77
Tabla 40 Retorno de inversión para un sistema de 1000 metros cuadrados proporcionados por la empresa.....	78
Tabla 41 Retorno de inversión para un sistema de 100 metros cuadrados proporcionados por la empresa.....	78
Tabla 42 aproximación del retorno de inversión de nuestro sistema en la propuesta 1 ....	79

## Introducción

Hoy en día el uso cotidiano de la energía eléctrica se ha ampliado más allá de el simple hecho de iluminarnos, ya que utilizamos este recurso para diversos equipos o aparatos que tenemos en nuestro hogar, desafortunadamente este recurso no está al alcance de todos en nuestro país.

Otro problema que hoy en día enfrentamos en relación a la energía eléctrica es el uso de combustibles fósiles, ya que estos son muy contaminantes ya que al ser quemados, liberan gases nocivos para el medio ambiente. La combustión genera ácidos, como el sulfúrico y el carbónico, que se elevan hacia la atmósfera y retornan en forma de lluvia ácida. La lluvia ácida daña la vida vegetal, el suelo y el agua. Gran parte del gas nocivo es monóxido de carbono, que impide la liberación de la radiación infrarroja de la tierra de forma normal, lo que provoca el calentamiento global y el cambio de los climas. Los gases liberados pueden, además, corroer la capa de ozono que protege al planeta de las letales radiaciones que emite el sol. Sumando a esto el hecho de que estos combustibles no se regeneran tan fácilmente.

Para esto se propondrá un sistema híbrido para generación de energía eléctrica, con el fin de proveer de energía eléctrica a zonas urbanas y periurbanas por lo que sería un sistema de pequeña potencia (menos de 100 kW), al hablar de sistema híbrido nos referimos a un sistema que involucra dos alternativas de energía siendo propuestas los concentradores solares que serán el principal caso de estudio en este informe y tendrá acoplada una fuente de biogás de nopal cuyas serán actividad en diferentes tiempos según sea conveniente,

El tipo de concentrador dependerá de las condiciones climatológicas, demandas de energía en la población seleccionada, eficiencia del equipo. Tomando todo esto en cuenta se propondrán 1,2 o 3 diseños que mediante ecuaciones y leyes físicas decidiremos el equipo más adecuado, tomando una decisión y procediendo al diseño de este.

El sistema híbrido tiene como objetivo tener dos fuentes de energía, una como bien ya se dijo es el uso de un colector solar, cuyo diseño dependerá de las condiciones necesarias según varias consideraciones, y como fuente alterna se planea alimentar al bloque de potencia a partir de biogás obtenido de las biomásas que nos proporciona el nopal, este recurso ya se viene utilizando en México desde hace un tiempo principalmente en Zitacuaro Michoacan, este recurso nos resulta muy atractivo ya que es como tal una forma de energía

limpia al igual que el colector solar sumando a esto el hecho de que México es un país donde el cultivo de nopal se puede realizar a la perfección.

Como último pero no menos importante tenemos la generación de empleos, ya que estos sistemas involucran un proceso donde el agua se calentara, esta agua a altas temperaturas puede ser utilizado para distintos procesos industriales como:

- Lácteos
- Textiles
- Producción de sopas
- Producción de goma sintética
- Producción de acetona
- Producción de benceno
- Sistemas de refrigeración
- Procesado de residuos

Dependiendo de la zona seleccionada alguno de estos procesos mencionados o algún otro podría ser una fuente de empleo para dicha región

### **Justificación**

La fundamentación del proyecto se basa en dos principales factores: escasas de energía eléctrica en viviendas en la república Mexicana y el uso de energías limpias para generar electricidad.

Hoy en día en nuestro país existen muchas viviendas que carecen de energía eléctrica que en la actualidad es un recurso prácticamente indispensable. Para ello en este proyecto se buscara diseñar o seleccionar equipo adecuado para zonas urbanas y periurbanas para la generación de energía a partir de concentradores solares y de esta manera ir resolviendo esta problemática.

Esto a su vez promoverá el uso de energías limpias e incluso habría la posibilidad de generar empleos y/o ayudar a la economía de alguna región.

Como el nombre del proyecto lo indica este es un sistema hibrido es decir tendrá una fuente alterna para alimentar al bloque de potencia en este caso biogás de nopal, que es otra forma de energía limpia.

Este proyecto está enfocado a que se implemente en alguna zona urbana o periurbana que cuente con escasez de energía eléctrica, si no es en su totalidad si en su mayoría y sí esto resulta viable pensar en la posibilidad de implementarla en diversas partes que también tengas esta carencia. Por lo general al ser regiones en las que un recurso tan básico en la actualidad como la electricidad falte, existe una alta probabilidad de que sean comunidades que también tengas problemas económicos, por lo que ahora con el apoyo de la electricidad y diversos usos que se le puede dar al “agua caliente” obtenida del sistema para posibles generaciones de empleo.

Bajo estas situaciones se puede suponer a primera instancia que el proyecto tiene muchos puntos a favor, y puede resultar atractivo en varios aspectos que tendrían que ser comprobados bajo argumentos, estudios y pruebas más sólidos que se irán narrando a lo largo del proyecto.

## **Objetivos**

### **Objetivos generales**

- Diseñar un sistema de pequeña potencia a partir de un concentrador solar
- Abastecer de electricidad a una zona que lo necesite
- Que el sistema tenga una fuente alterna de energía, en este caso biogás de nopal

### **Objetivos específicos**

- Seleccionar la población más adecuada para implementar el sistema a partir de datos estadísticos y condiciones meteorológicas.
- La generación de empleos en la zona seleccionada.

## **1) Selección de tipo de población**

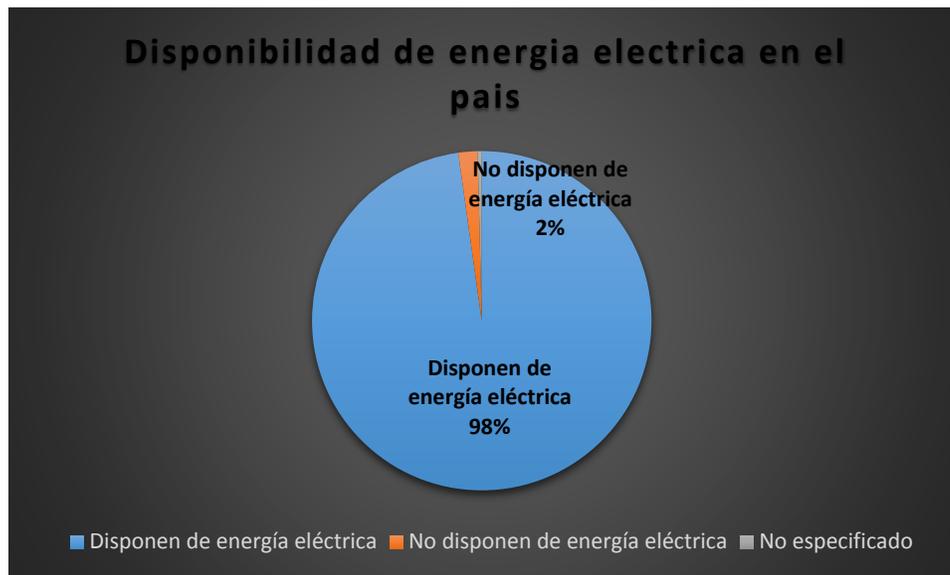
### **1.1) Selección a nivel nacional**

En México existe una gran cantidad de población que no cuenta con energía eléctrica según el último censo en 2010 de la INEGI (instituto nacional de estadística y geografía), 513,482

de las viviendas no cuenta con este recurso este dato significa el 2% de las viviendas en México.

Tabla 1 Consulta de: Población total de los hogares censales Por: Disponibilidad de energía eléctrica; Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.

	Total
Total	28,138,556
Disponen de energía eléctrica	27,515,030
No disponen de energía eléctrica	513,482
No especificado	110,044



Grafica 1 Consulta de: Población total de los hogares censales Por: Disponibilidad de energía eléctrica; Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.



Figura 1 Mapa de la república mexicana según la falta de luz eléctrica en sus hogares; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010

Utilizando nuevamente los datos de la INEGI podemos reducir nuestras opciones de la población más indicada para implementar nuestro sistema, eligiendo los 5 estados que cuentan con el mayor índice de escases de energía eléctrica en los que lidera Veracruz, seguidos por Oaxaca, Chiapas, Guerrero, Estado de México y Chihuahua.

## 1.2) Selección de la zona a nivel estatal

Considerando algunos de los estados que lideran dicha escases podemos vernos más selectivos y hacer una elección a nivel municipal en cada una de las entidades como se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 2 Estados con el mayor número de viviendas sin electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.

	Total	No disponen de energía eléctrica	Disponen de energía eléctrica	No especificado
<b>Total</b>	28,138,556	513,482	27,515,030	110,044
<b>Veracruz de Ignacio de la Llave</b>	1,982,612	62,388	1,915,967	4,257
<b>Oaxaca</b>	934,055	48,857	881,250	3,948
<b>Chiapas</b>	1,072,239	39,479	1,027,957	4,803
<b>Guerrero</b>	804,801	33,656	767,090	4,055
<b>México</b>	3,687,193	30,053	3,646,743	10,397
<b>Chihuahua</b>	910,198	2,989	87,630	3,998

En la siguiente sección analizaremos uno a uno los posibles estados donde seleccionaremos la zona a estudiar, para eso dividiremos los estados según sus municipios sin electricidad utilizando la relación de colores que se señalara en la tabla:

Tabla 3 Relación de colores en base al número de viviendas sin electricidad.

Color	rango de número de viviendas sin electricidad en cada municipio
	>2000
	1001-2000
	500-1000
	<500

### 1.2.1) Veracruz

Veracruz es un estado que cuenta con 212 municipios. En la tabla 3 podemos observar los municipios que cuentan con un mayor número de escasos en energía eléctrica y tomando en cuenta el último censo del año 2010 contaba con un total de 1, 982,612 viviendas de las cuales 62,388 no cuentan con energía eléctrica (tabla 4), esto representa un 3.25% de sus viviendas totales.

Tabla 4 Municipios del estado de Veracruz según el número de viviendas que cuentan con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.

	Total	No disponen de energía eléctrica	Disponen de energía eléctrica	No especificado
Veracruz de Ignacio de la Llave	1,982,612	62,388	1,915,967	4,257
Tantoyuca	23,641	4,147	19,426	68
Las Choapas	18,299	2,312	15,948	39
Papantla	39,197	1,486	37,596	115
Minatitlán	43,010	1,375	41,591	44
Pánuco	25,714	1,362	24,324	28
San Andrés Tuxtla	37,876	1,361	36,418	97
Zongolica	10,071	954	9,094	23
Tihuatlán	21,967	951	20,961	55
Tezonapa	13,069	939	12,107	23
Acayucan	21,412	912	20,470	30
Álamo Temapache	25,620	845	24,725	50
Tuxpan	37,573	845	36,696	32
Santiago Tuxtla	14,313	827	13,442	44
Ozuluama de Mascareñas	6,261	783	5,467	11
Tempoal	8,794	758	8,017	19
Veracruz	156,375	758	155,303	314
Coatzacoalcos	85,933	751	85,037	145
Huayacotla	5,232	751	4,467	14
Tierra Blanca	26,661	748	25,872	41
Atzacan	11,776	731	10,999	46
Soteapan	7,866	726	7,100	40
Xalapa	122,584	715	121,755	114
Martínez de la Torre	27,529	711	26,731	87
Chicontepec	13,344	606	12,712	26
Zozocolco de Hidalgo	2,919	596	2,311	12
Misantla	16,456	585	15,858	13
Ixhuatlán de Madero	11,753	579	11,134	40
Poza Rica de Hidalgo	50,228	570	49,535	123
Ángel R. Cabada	9,467	561	8,888	18

Zontecomatlán de López y Fuentes	3,156	555	2,580	21
Alvarado	15,031	528	14,464	39
Altotonga	13,912	525	13,357	30
Tampico Alto	3,471	506	2,958	7
Cosoleacaque	31,227	502	30,649	76

En el siguiente mapa (Figura 2) se pueden observar los municipios que tienen la mayor escasez de electricidad en el estado de Veracruz.

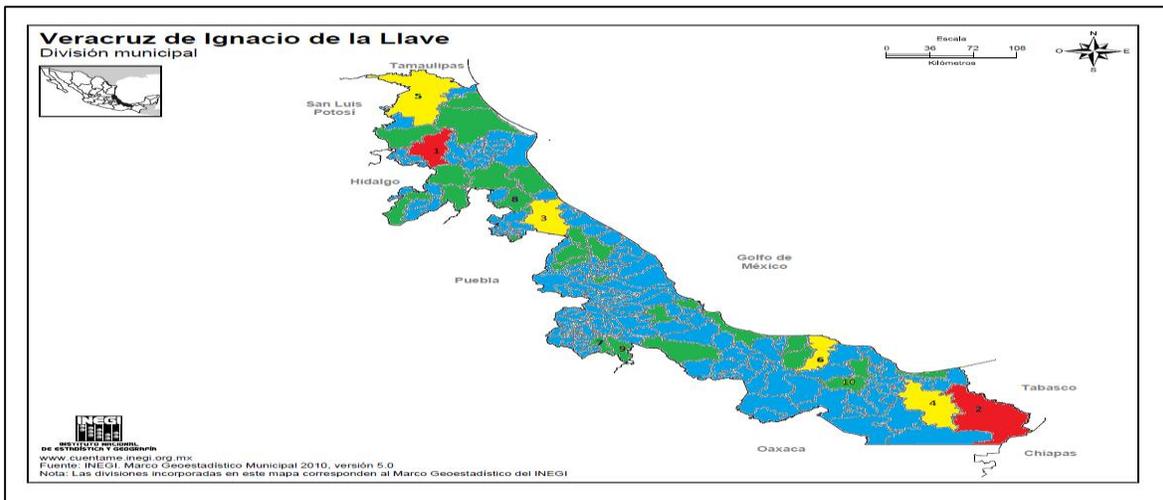


Figura 2 Estado de Veracruz; fuente: INEGI.

Tabla 5 Municipios de Veracruz con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.

Color	Municipio	% de las viviendas sin electricidad
1	Tantoyuca	17.54
2	Las Choapas	12.63
3	Papantla	3.8
4	Minatitlán	3.2
5	Pánuco	5.3
6	San Andrés Tuxtla	3.6
7	Zongolica	9.5
8	Tihuatlán	4.33
9	Tezonapa	7.185
10	Acayucan	4.26

### 1.2.2) Oaxaca

El estado que sigue en dicha escases es Oaxaca. Esta cuenta con 570 municipios, de los cuales tomando los mismos datos que venimos trabajando tendrían un total de 934,055 viviendas de las cuales 48,857 no cuentan con energía eléctrica representando así un 5.23% del total, en la Tabla 6 se pueden observar algunos de los municipios que cuentan con el mayor número de viviendas sin electricidad.

*Tabla 6 Municipios del estado de Oaxaca según el número de viviendas que cuentan con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.*

	Total	No disponen de energía eléctrica	Disponen de energía eléctrica	No especificado
<b>Oaxaca</b>	934,055	48,857	881,250	3,948
<b>San José Tenango</b>	4,434	1,385	3,021	28
<b>San Agustín Loxicha</b>	4,366	1,006	3,295	65
<b>San Juan Bautista Tuxtepec</b>	40,968	856	39,949	163
<b>San Juan Mazatlán</b>	3,841	799	3,016	26
<b>Santa María Chilchotla</b>	4,838	798	4,012	28
<b>San Pedro Pochutla</b>	10,315	723	9,553	39

En el siguiente mapa (Figura 3) se observa los municipios del estado de Oaxaca que tienen la mayor escasez de energía eléctrica, hay que recalcar que estos municipios están algo dispersos los unos de los otros.

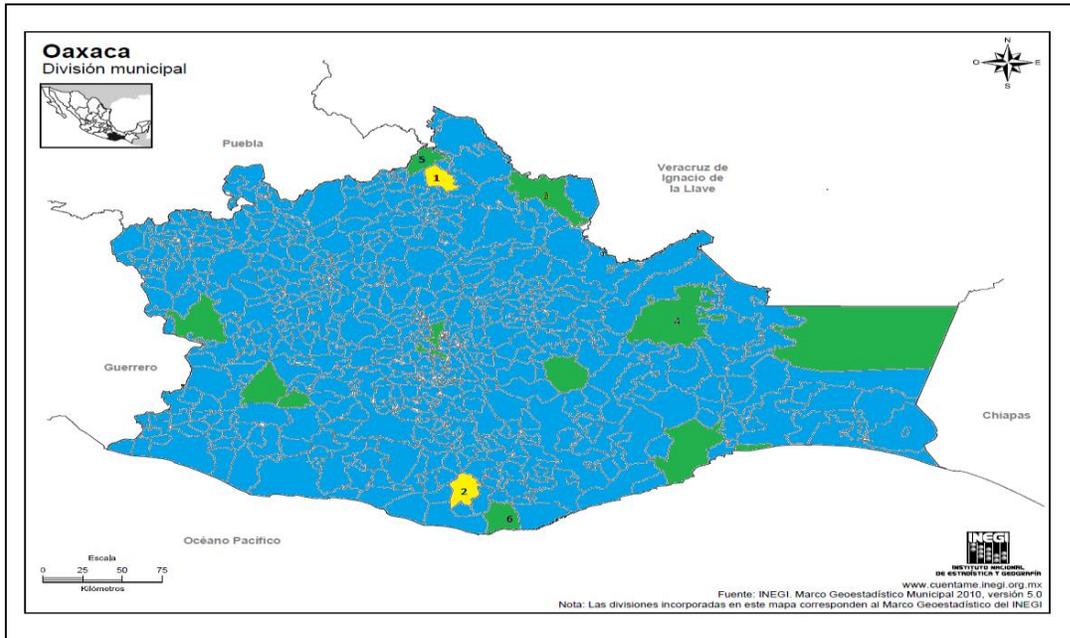


Figura 3 Estado de Oaxaca; fuente: INEGI

Tabla 7 Municipios de Oaxaca con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.

Color	Municipio	% de las viviendas sin electricidad
1	San José Tenango	31.24
2	San Agustín Loxicha	23.04
3	San Juan Bautista Tuxtepec	2.09
4	San Juan Mazatlán	20.80
5	Santa María Chilchotla	16.50
6	San Pedro Pochutla	7.01

### 1.2.3) Chiapas

Chiapas es el tercer estado que cuenta con dicha escasas. Este estado cuenta con 122 municipios. En la Tabla 5 observamos algunos de los municipios que lideran la escasas de

energía eléctrica en sus viviendas y en según el censo del año 2010 cuenta con 1, 072,239 de las cuales 39,479 no cuentan con energía eléctrica lo que representa un 3.68 % del total.

*Tabla 8 Municipios del estado de Chiapas según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.*

	<b>Total</b>	<b>No disponen de energía eléctrica</b>	<b>Disponen de energía eléctrica</b>	<b>No especificado</b>
<b>Chiapas</b>	1,072,239	39,479	1,027,957	4,803
<b>Ocosingo</b>	33,360	3,328	29,858	174
<b>Chilón</b>	19,187	2,871	16,047	269
<b>Las Margaritas</b>	20,285	1,996	18,190	99
<b>Tapachula</b>	81,717	1,350	80,124	243
<b>Oxchuc</b>	8,240	1,268	6,889	83
<b>Tila</b>	13,770	1,197	12,501	72
<b>Palenque</b>	25,254	1,152	24,003	99
<b>Berriozábal</b>	9,241	920	8,279	42
<b>Ocozocoautla de Espinosa</b>	18,155	866	17,233	56
<b>Villa Corzo</b>	18,025	863	17,110	52
<b>Chamula</b>	16,083	751	15,203	129
<b>Salto de Agua</b>	11,302	713	10,518	71
<b>Tecpatán</b>	9,570	670	8,857	43
<b>Yajalón</b>	7,054	644	6,375	35
<b>Chalchihuitán</b>	2,898	585	2,259	54
<b>Tumbalá</b>	5,988	585	5,335	68
<b>Cintalapa</b>	17,692	573	17,081	38
<b>Amatán</b>	4,294	572	3,703	19
<b>Tuxtla Gutiérrez</b>	141,840	532	140,984	324
<b>La Concordia</b>	9,888	529	9,329	30

En el siguiente mapa (Figura 4) podemos ver los municipios que cuentan con la mayor escasez en este estado.

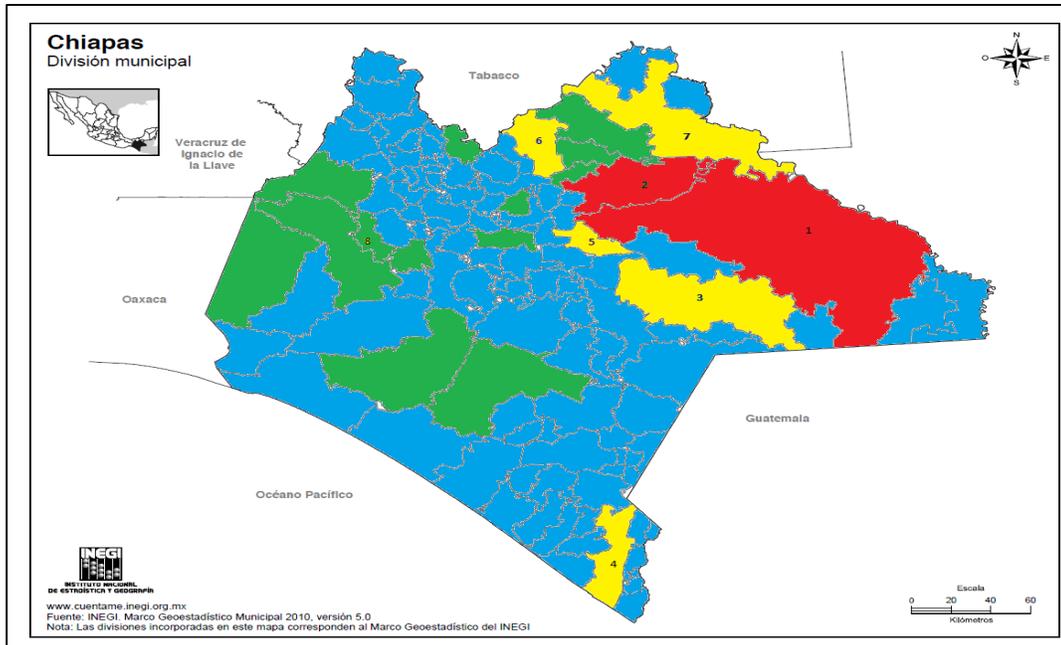


Figura 4 Estado de Chiapas; fuente: INEGI

Tabla 9 Municipios de Chiapas con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total

Color	Municipio	% de las viviendas sin electricidad
1	Ocosingo	9.97
2	Chilón	14.96
3	Las Margaritas	9.84
4	Tapachula	1.65
5	Oxchuc	15.39
6	Tila	8.70
7	Palenque	4.56
8	Berriozábal	9.96

#### 1.2.4) Guerrero

Guerrero ocupa el cuarto lugar, este estado cuenta con 81 municipios, en 2010 33,656 de las 804,801 viviendas no contaban con energía eléctrica lo que representa un 4.1819% de sus viviendas totales, en la Tabla 10 se muestran los municipios que lideran dicha escases en sus viviendas.

Tabla 10 Municipios del estado de Guerrero según el número de viviendas que cuentan con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.

	Total	No disponen de energía eléctrica	Disponen de energía eléctrica	No especificado
<b>Guerrero</b>	804,801	33,656	767,090	4,055
<b>Acatepec</b>	6,541	2,527	3,927	87
<b>General Heliodoro Castillo</b>	7,102	1,776	5,237	89
<b>San Luis Acatlán</b>	8,421	1,508	6,846	67
<b>San Miguel Totolapan</b>	5,667	1,504	4,094	69
<b>Ayutla de los Libres</b>	12,500	1,368	11,057	75
<b>Chilapa de Álvarez</b>	25,814	1,292	24,396	126
<b>Coyuca de Catalán</b>	10,256	1,289	8,884	83
<b>Acapulco de Juárez</b>	203,155	1,111	201,426	618
<b>Ometepec</b>	13,319	930	12,308	81
<b>Malinaltepec</b>	5,717	878	4,772	67
<b>Cochoapa el Grande</b>	3,350	830	2,489	31
<b>Chilpancingo de los Bravo</b>	56,494	787	55,537	170
<b>Xochistlahuaca</b>	6,019	761	5,166	92
<b>Tlapa de Comonfort</b>	16,035	652	15,286	97
<b>Ajuchitlán del Progreso</b>	8,270	613	7,599	58
<b>Tlacoapa</b>	2,064	601	1,438	25
<b>Atlixac</b>	5,652	592	5,003	57
<b>Iliatenco</b>	2,061	586	1,442	33
<b>Tlacoachistlahuaca</b>	3,874	579	3,240	55
<b>Atoyac de Álvarez</b>	15,685	539	15,096	50
<b>Técpan de Galeana</b>	16,714	538	16,110	66
<b>Tecoanapa</b>	9,437	528	8,862	47
<b>Coahuayutla de José María Izazaga</b>	3,109	524	2,574	11
<b>Iguala de la Independencia</b>	34,958	506	34,363	89

En el siguiente mapa (Figura 5) observamos los 7 municipios que lideran la escasez en guerrero, en este podemos ver que estos 7 están algo dispersos entre sí, aunque algunos de ellos colindan.

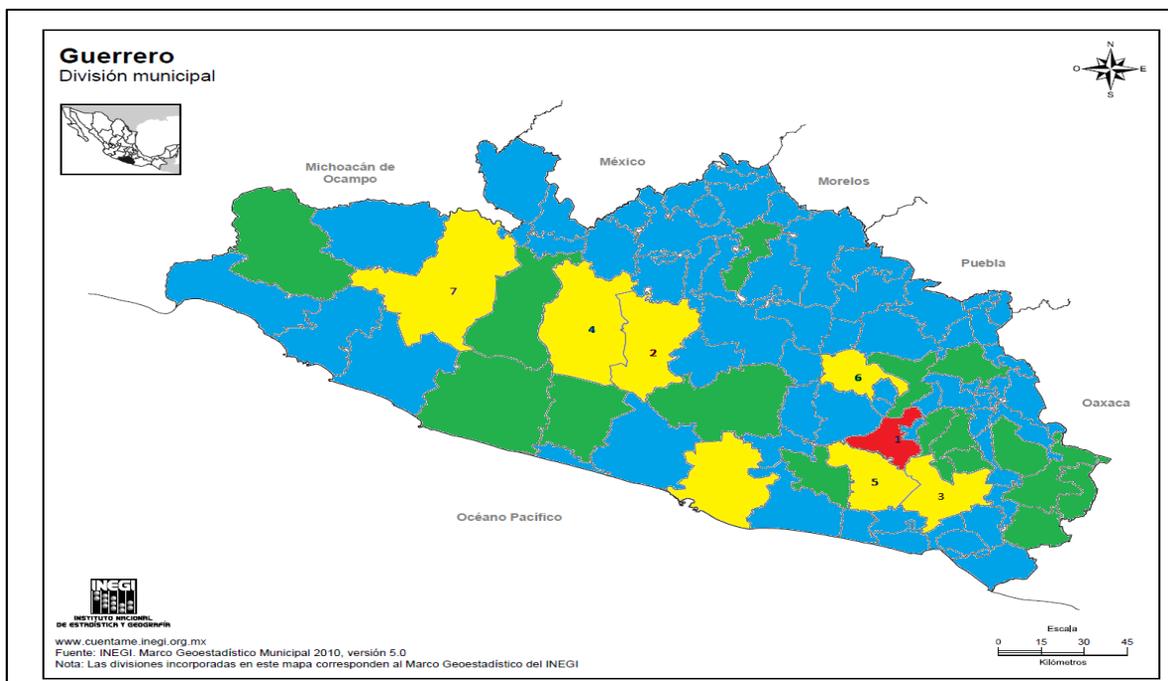


Figura 5 Estado de Guerrero; fuente: INEGI

Tabla 11 Municipios de Guerrero con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.

Color	Municipio	% de las viviendas sin electricidad
1	Acatepec	38.63
2	General Heliodoro Castillo	25.01
3	San Luis Acatlán	17.91
4	San Miguel Totolapan	26.54
5	Ayutla de los Libres	10.94
6	Chilapa de Álvarez	5.01
7	Coyuca de Catalán	12.57

### 1.2.5) Chihuahua

Chihuahua es el sexto lugar. Cuenta con 67 municipios. En 2010, 29,989 de las 910,198 viviendas no contaban con energía eléctrica, lo que representa un 3.3% del total, cabe recalcar que este estado tiene municipios con un alto porcentaje de escasos incluso rondando el 50% o más. En la tabla 7 se muestran los municipios que tienen mayor escasez de energía eléctrica en sus viviendas.

*Tabla 12 Municipios del estado de Chihuahua según el número de viviendas que cuenten con electricidad; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.*

	Total	No disponen de energía eléctrica	Disponen de energía eléctrica	No especificado
<b>Chihuahua</b>	910,198	29,898	876,302	3,998
<b>Guachochi</b>	11,379	5,621	5,672	86
<b>Guadalupe y Calvo</b>	11,470	5,559	5,811	100
<b>Bocoyna</b>	7,848	1,955	5,858	35
<b>Urique</b>	4,800	1,948	2,832	20
<b>Batopilas</b>	2,997	1,917	1,041	39
<b>Balleza</b>	4,151	1,250	2,857	44
<b>Morelos</b>	1,841	1,194	635	12
<b>Chínipas</b>	1,932	1,183	730	19
<b>Uruachi</b>	2,086	998	1,081	7
<b>Juárez</b>	342,814	939	339,031	2,844
<b>Guerrero</b>	11,660	807	10,841	12
<b>Guazapares</b>	2,103	781	1,304	18
<b>Carichí</b>	2,069	738	1,327	4
<b>Chihuahua</b>	228,580	682	227,587	311

En el siguiente mapa (figura 6) se muestran los municipios que tienen el mayor número de escasez de energía eléctrica, se puede notar que están muy cercanos los unos de los otros, lo cual sería conveniente para implementar el sistema híbrido en estas regiones.

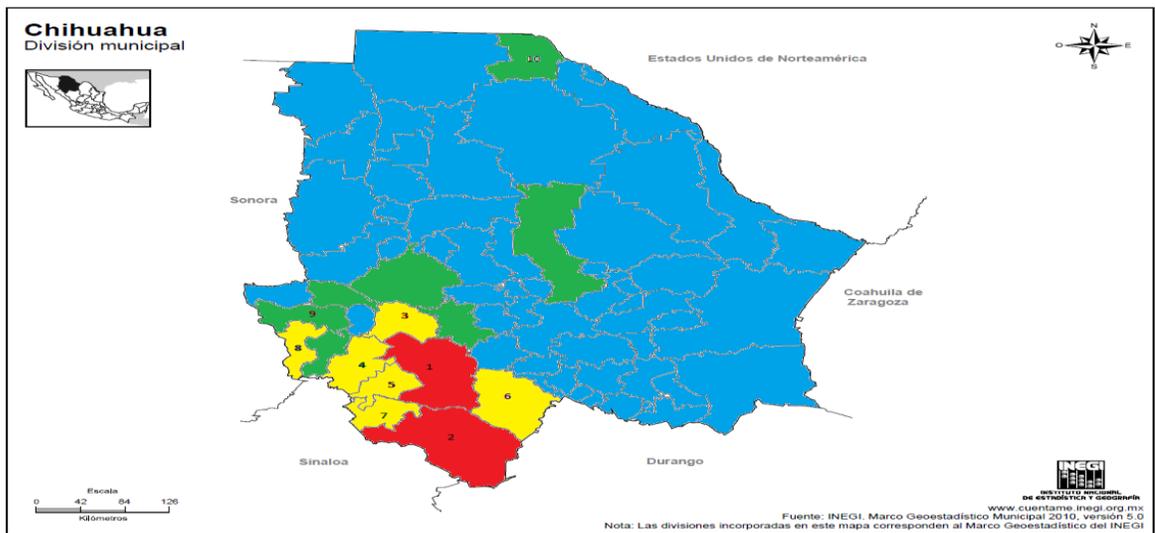


Figura 6 Estado de Chihuahua; fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010

Tabla 13 Municipios con el mayor número de viviendas sin electricidad y el porcentaje respecto a un total.

Color	Municipio	% de viviendas sin electricidad
1	Guachochi	49.40
2	Guadalupe y Calvo	48.46
3	Bocoyna	25.00
4	Urique	40.58
5	Batopilas	63.96
6	Balleza	30.11
7	Morelos	64.86
8	Chínipas	61.00
9	Uruachi	47.84
10	Juárez	0.27

### 1.3) Selección de la población según sus condiciones climatológicas

En el siguiente mapa (Figura) se observa la distribución de la radiación solar por kWh/m<sup>2</sup>-día que hay en nuestra república, cabe recalcar que esto se verá más a fondo en la siguiente sección donde estudiaremos las condiciones meteorológicas de la zona seleccionada, pero

para esta selección por el momento es muy importante tomar en cuenta la radiación solar que incide sobre ella.

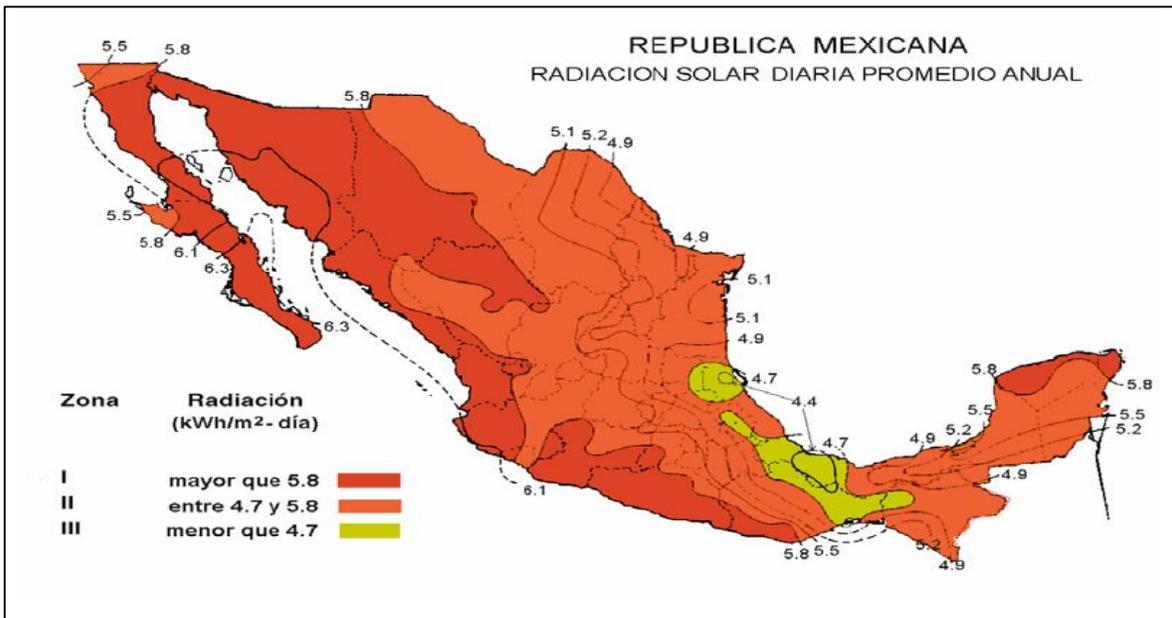


Figura 7 Mapa de radiación solar en México; Fuente Instituto de investigaciones eléctricas

En el mapa podemos darnos cuenta del cómo todo Guerrero es la zona más expuesta a la radiación solar ya que recibe arriba de 5.8 kWh/m<sup>2</sup>-día, mientras Chihuahua está dividida entre una sección que ronda los 4.7 y 5.8 kWh/m<sup>2</sup>-día y otra sección que la supera, Veracruz, Oaxaca y Chiapas rondan los 4.7 y 5.8 kWh/m<sup>2</sup>-día pero también tienen zonas con menos de 4.7 especialmente Veracruz.

En base a esto podemos hacer una reducción en lo que podríamos decir los principales candidatos, siendo Chihuahua, Oaxaca y Chiapas los seleccionados por aspectos como lo son la escases de electricidad y abundante radiación solar. Aunque estos datos son todavía a nivel municipal, una vez seleccionando el municipio según sus condiciones de clima, podremos enfocarnos en una zona urbana en particular.

Las consideraciones preliminares para la selección del municipio fueron los siguientes:

- Mayor número de hogares sin electricidad.
- Porcentaje de las viviendas totales sin electricidad respecto a un total.

Estos dos puntos son muy importantes ya que mientras unos municipios tienen un gran número de viviendas sin electricidad pero el porcentaje respecto a un total es relativamente poco, a comparación de municipios más pequeños donde se observan hasta un rango de 40 y 60 por ciento de poblaciones sin electricidad.

Tomando estas prioridades se puede observar una reducción en la selección como se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 14 Principales municipios de interés.*

	<b>Número de viviendas sin electricidad</b>	<b>Porcentajes de viviendas sin electricidad respecto a su total</b>
<b>Chihuahua</b>		
Guachochi	5,621	49.4
Guadalupe y Calvo	5,559	48.46
Batopilas	1,917	63.964
Morelos	1,194	64.856
Chínipas	1,183	61.232
<b>Chiapas</b>		
Ocosingo	3,328	9.976
Chilón	2,871	14.963
Las Margaritas	1,996	9.84
Oxchuc	1,268	15.39
Tila	1,197	8.7
Berriozábal	920	9.96
<b>Oaxaca</b>		
San José Tenango	1,385	31.236
San Agustín Loxicha	1,006	23.042
San Juan Mazatlán	799	20.802
<b>Guerrero</b>		
Acatepec	2,527	38.63
Tlacoapa	601	29.12
Iliatenco	586	28.43
San Miguel Totolapan	1,504	26.54

General Heliodoro Castillo	1,776	25
Cochoapa el Grande	830	24.78
San Luis Acatlan	1,508	17.9

#### 1.4) Planteamiento de un escenario

Hasta este punto hemos reducido enormemente lo que sería nuestra población potencial en base a datos estadísticos obtenidos de la INEGI, pero hay que preguntarnos ¿nuestro sistema en verdad satisficará las necesidades de una zona urbana? Por lo tanto sería conveniente hacer un cálculo estimado considerando aspectos como ¿Qué tipo de hogares abasteceremos de energía eléctrica? ¿Cuánta energía consumen estos hogares? ¿Nuestro sistema será suficiente para satisfacer dichas necesidades? Tomando estas preguntas como base podremos plantear un escenario para aplicar nuestro sistema y ver si es conveniente o no seguir con esta idea.

En la tabla 15 se reporta el consumo promedio de una vivienda tipo D. Se considera una vivienda tipo D como una vivienda con características de casas-habitación en poblaciones rurales. Con base en el consumo reportado se determinan los requerimientos de energía que pudieran satisfacerse con biogás de nopal y micro-turbinas de gas y/o nuestro sistema de colector solar.

*Tabla 15 Consumo eléctrico en una casa tipo D.*

Aparatos o equipos electrónicos que se usan normalmente	Potencia eléctrica (Kw)	Cantidad	Horas de consumo diario	Días de consumo en un mes	Consumo mensual en kW h	Consumo Diario en kW h
Fluorecente de 40 Kw	0.05	2	2	30	6	0.2
Foco de 50 W	0.05	1	5	30	7.5	0.25
Foco de 70 W	0.075	1	3	30	6.75	0.225
Foco de 100 W	0.1	1	5	30	15	0.5
Plancha electrica	1	1	1	4	4	1
TV de 20"	0.1	1	5	30	15	0.5
Refrigerador	0.25	1	8	30	60	2
Radiograbadora	0.03	1	7	30	6.3	0.21

<b>Total de consumo en kWh=</b>	120.55	4.885
---------------------------------	--------	-------

También es conveniente analizar el consumo en una vivienda de nivel socioeconómico tipo E que son casas con dos habitaciones y “más humildes” que las de tipo D, en la siguiente tabla se muestra su consumo eléctrico.

*Tabla 16 Consumo eléctrico en una casa tipo E.*

<b>Aparatos o equipos electrónicos que se usan normalmente</b>	<b>Potencia eléctrica (Kw)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Horas de consumo diario</b>	<b>Días de consumo en un mes</b>	<b>Consumo mensual en kW h</b>	<b>Consumo Diario en kW h</b>
Foco de 50 W	0.05	1	2	30	3	0.1
Foco de 75 W	0.075	1	5	30	11.25	0.375
Foco de 100 W	0.1	1	5	30	15	0.5
TV de 14"	0.08	1	8	30	19.2	0.64
Radiograbadora	0.03	1	5	30	4.5	0.15
<b>Total de consumo en kWh</b>					52.95	1.765

Realizando un cálculo podemos aproximar a cuantas casas podríamos abastecer con los 100 kWh que se tienen estimados hasta el momento.

$$N \text{ de casas} = \frac{\text{Potencia generada}}{\text{Consumo por hogar}} = \frac{100 \text{ kWh}}{4.855 \text{ kWh}} \approx 20 \text{ casas tipo D}$$

## 2) Condiciones meteorológicas

Las condiciones de radiación solar a considerar son las que ya se han mencionada con anterioridad en el mapa de la figura 7 y han sido tomadas en cuenta para la selección de población, por lo tanto para realizar el planteamiento de escenario sse considerar una irradiación solar de 850 W/m<sup>2</sup> que es una media utilizada normalmente y la otra será tomar una temperatura ambiente de 25 grados.

Estos servirán por el momento para cuestiones de cálculos analíticos y simulaciones, en casos más reales o en trabajos posteriores se tendría que hacer el estudio de como varían según distintas estaciones del año.

### 3) Propuestas de sistemas

#### 3.1) Generación de energía a partir de concentradores cilindros parabólicos

##### 3.1.1) Radiación solar

El sol es nuestra principal fuente de energía. A la energía que proviene de él la llamamos energía solar y llega a nosotros en forma de ondas electromagnéticas, para esto tiene que pasar por muchas interacciones con la atmosfera. A todas estas energías que es emitida o reflejada a partir de la interacción con la atmosfera la llamamos radiación atmosférica.

El sol es un cuerpo de forma casi de esfera, gaseoso de materia intensamente caliente, que tiene un diámetro de aproximadamente  $1.39 \times 10^9$  m y una masa de aproximadamente  $1.9891 \times 10^{30}$  kg y se encuentra ubicado a una distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m de la tierra. El sol emite una radiación de manera continua de aproximadamente  $E = 3.8 \times 10^{26}$  W y de esta tan solo  $1.7 \times 10^{17}$  W choca con la tierra y con esto es suficiente para mantener la vida en nuestro planeta.

La energía solar que llega a la atmósfera terrestre se llama *irradiancia solar total*  $G_s$ , cuyo valor es

$$G_s = 1\,373 \text{ W/m}^2$$

La irradiancia solar total (también llamada *constante solar*) representa *la tasa a la cual la energía solar incide sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol en el borde exterior de la atmósfera, cuando la Tierra se encuentra a su distancia media del Sol.*

Mencionar la radiación solar es de suma importancia debido a que es la energía a aprovechar en los concentradores solares que se estudiarán más adelante, incluso en secciones anterior fue uno de los principios factores para seleccionar una población, por otra parte más adelante se mencionara de qué manera se aprovechara esta energía.

### **3.1.2) El colector cilindro parabólico (CCP)**

Un colector solar cilindro parabólico (CCP), esta principalmente compuesta por un espejo cilindro parabólico que es el encargado de reflejar la radiación directa concentrándolo sobre un tubo absorbedor cuyo está colocado sobre la línea focal de la parábola. De esta manera el fluido que atraviesa por él tubo se calienta, y gracias a esto obtenemos energía térmica a partir de la radiación solar.

Los CCP son captadores solares de concentración con foco lineal, que permite alcanzar temperaturas de hasta 675 K con una buena eficiencia (60%-70%). La concentración óptica de la radiación solar hace que la superficie del tubo absorbedor sea mucho menor que la el área de apertura del colector, lo que reduce significativamente las perdidas térmicas del colector, ya que las perdidas térmicas son función no solo de la temperatura media de trabajo, sino también de la superficie del absorbedor, que es el componente “caliente” del colector.

Los componentes principales de un CCP son

- El reflector cilindro parabólico
- El tubo absorbedor o receptor.
- el sistema de seguimiento solar, y
- la estructura metálica

#### **3.1.2.1) Reflector de CCP**

Su misión es la de reflejar y concentrar sobre el Receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie. A grandes rasgos es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, de forma que concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada. Entre los materiales usados para la reflexión, encontramos plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas, o el más usado: vidrios sobre los que se depositan una capa de plata junto con un protector de base de cobre y pintura epoxi.

#### **3.1.2.2) Tubo absorbedor**

El tubo absorbedor es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, ya que de él depende en gran medida el rendimiento global del colector. Este consta en realidad de dos tubos: uno interior metálico (por donde circula el fluido y se calienta) y un tubo exterior de vidrio.

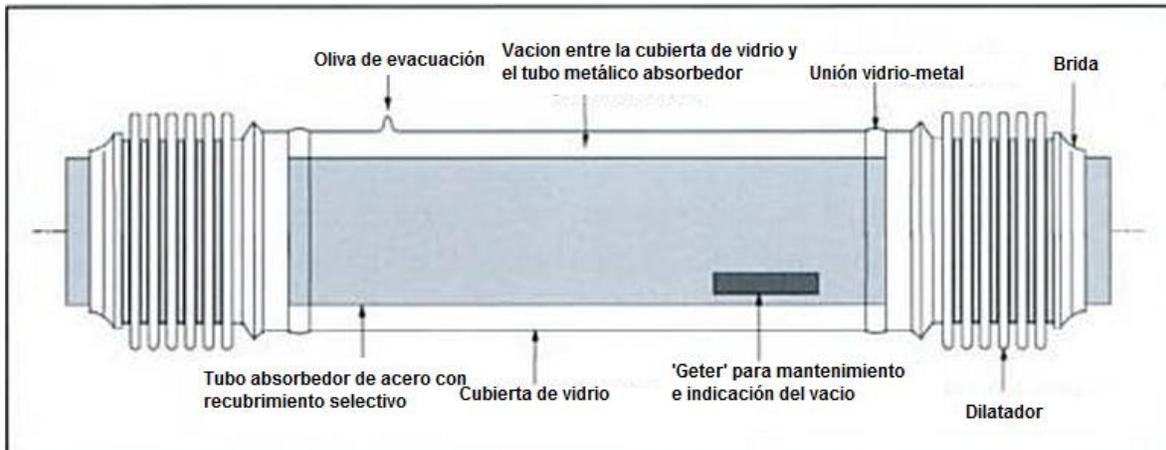


Figura 8 Tubo absorbedor de vacío de un CCP; fuente Zarsa 2003

El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad (>90%) y una baja emisividad en el espectro infrarrojo (<30%), lo que le proporciona un elevado rendimiento térmico. Hay diferentes tipos de recubrimientos selectivos. Los más asequibles están compuestos por una película de cromo, níquel o cobalto negro, que poseen una buena absorptividad y una emisividad moderada. El único inconveniente es que no pueden trabajar a temperaturas superiores a los 575 K, por que se degradan rápidamente y su emisividad aumenta. Para temperaturas superiores (hasta 700 K) hay que recurrir a recubrimientos selectivos obtenidos por sputtering o PVD (Physical Vapour Deposition), que consiguen una absorptividad superior al 95% y una emisividad del 15% e incluso a 675 K. El principal problema de los recubrimientos mediante PVD o sputtering es que la mayoría de ellos se degradan en contacto con el aire cuando están calientes, por lo que requieren que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal.

El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene una doble función: proteger el recubrimiento selectivo de las inclemencias meteorológicas, y reducir las pérdidas por convección en el tubo absorbedor. Cuando entre el tubo metálico y el tubo de vidrio se hace el vacío para que no se degrade la superficie selectiva, los extremos del tubo de vidrio van

unidos, mediante una soldadura vidrio metal, a un fuelle metálico que va soldado por su extremo otro extremo al tubo metálico interior. De esta forma se logra que exista un espacio anular estanco entre el tubo interior metálico y el exterior de vidrio, a la vez que el fuelle metálico sirve para compensar la diferente dilatación térmica de los tubos e vidrio y metal cuando se alcanza la temperatura de trabajo.

El tubo de cristal suele llevar un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad y aumentar el rendimiento óptico del colector.

Cuando entre el tubo de cristal y el tubo interior de acero hay vacío, se colocan adheridas al tubo metálico unas piezas pequeñas, con forma redonda o plana, que tienen por misión la de absorber las escasas moléculas de las diferentes sustancias que, con el paso del tiempo, pueden ir penetrando en el espacio anular que hay entre el tubo metálico y el vidrio es de  $10^{-4}$ Pa (alto vacío). Estas piezas especiales se denominan *getters* y deben ser manejadas con precaución durante el proceso de fabricación del tubo, ya que si se activan en contacto con el aire pueden dar lugar a una pequeña deflagración.

Para hacer el vacío, una vez fabricado el tubo se conecta una bomba de vacío a una pequeña toma que existe en la cubierta de vidrio (*oliva de evacuación*), la cual se sella cuando se ha alcanzado el vacío deseado.

### **3.1.2.3) Sistema de seguimiento solar**

Con el fin de poder concentrar sobre el tubo absorbente la radiación solar, los CCP deben seguir el sol durante el día, por eso van dotados de un mecanismo de seguimiento solar que va cambiando la posición del CCP conforme el sol se va moviendo (Figura).

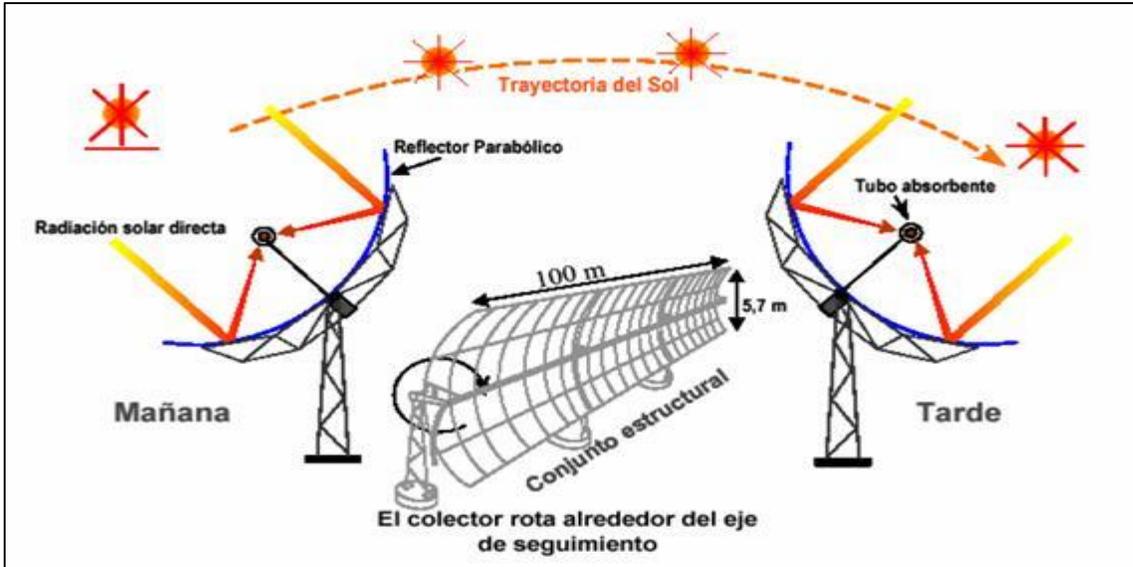


Figura 9 Sistema de seguimiento solar en un eje

El sistema de seguimiento más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro-parabólicos del colector alrededor de un eje. Con este sistema se maximiza el tiempo de exposición a la radiación solar directa de la superficie captadora.

Generalmente los CCP se instalan de forma que su eje de giro queda orientado en la dirección Norte-Sur, o Este-Oeste según la latitud del emplazamiento (Figura). La orientación Norte-Sur es la más aconsejable para plantas ubicadas en España, ya que

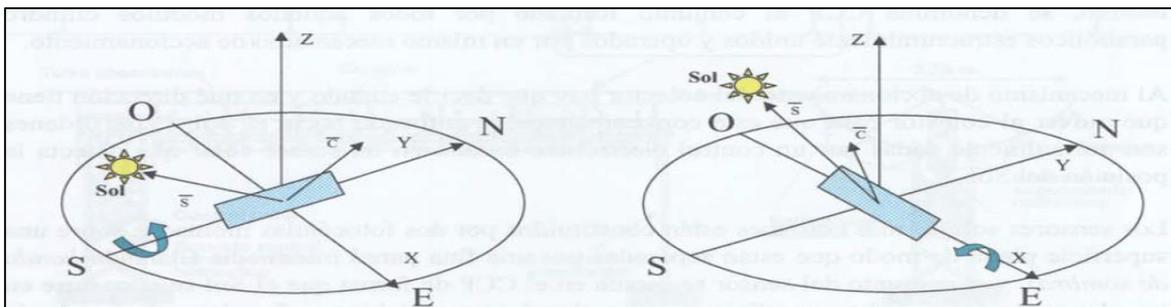


Figura 10 Las dos principales orientaciones de un CCP

aunque existe una diferencia más acusada entre la energía colectada en invierno y en verano, el total de energía en un año es mayor que en el caso de orientación Este-Oeste.

#### **3.1.2.4) Estructura metálica**

La misión de la estructura del colector es la de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen, a la vez que actúa de interface con la cimentación del colector. Todos los colectores CCP actuales usan estructuras metálicas, que en algunos casos son del tipo espacial y en otros casos están fabricados con perfiles llenos.

#### **3.1.3) Características geométricas de los concentradores cilindros parabólicos**

Para entender cómo funcionan estos tipos de concentradores cilindros parabólicos es necesario comprender su geometría.

Primeramente hay que analizar como ocurre la distribución del flujo de radiación través del tubo absorbedor que se encuentra en la lineal focal de la parábola.

##### **3.1.3.1) Angulo de incidencia.**

Hay que tomar en cuenta la importancia del llamado *ángulo de incidencia*  $\varphi$ , que es el ángulo formado por la radiación solar directa que incide sobre el plano de abertura del colector y la normal a dicho plano de abertura. Este ángulo de incidencia depende de la hora y el día del año, ya que es función de las coordenadas cartesianas del sol con respecto a un sistema cartesiano con origen el colector y provoca que los extremos del colector haya una pérdida de superficie reflexiva útil.

La existencia de un ángulo de incidencia no solo reduce el área efectiva de captación que tiene el colector, también afecta a los valores de la reflectividad, absorptividad y transividad ya que estos valores presentan un máximo cuando el ángulo de incidencia es igual a  $0^\circ$ , el efecto de ángulo de incidencia en el rendimiento del colector se cuantifica mediante un parámetro que se denomina modificador de ángulo de incidencia  $k(\varphi)$ , que será explicado mas adelante.

La ecuación que describe la parábola en coordenadas cartesianas estaría dada por:

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (1)$$

Donde llamaremos  $f$  a la distancia focal tomada desde el vértice hasta el punto donde se encuentra el foco de la parábola y denotaremos  $a$  la letra  $a$  para referirnos a una distancia de apertura.

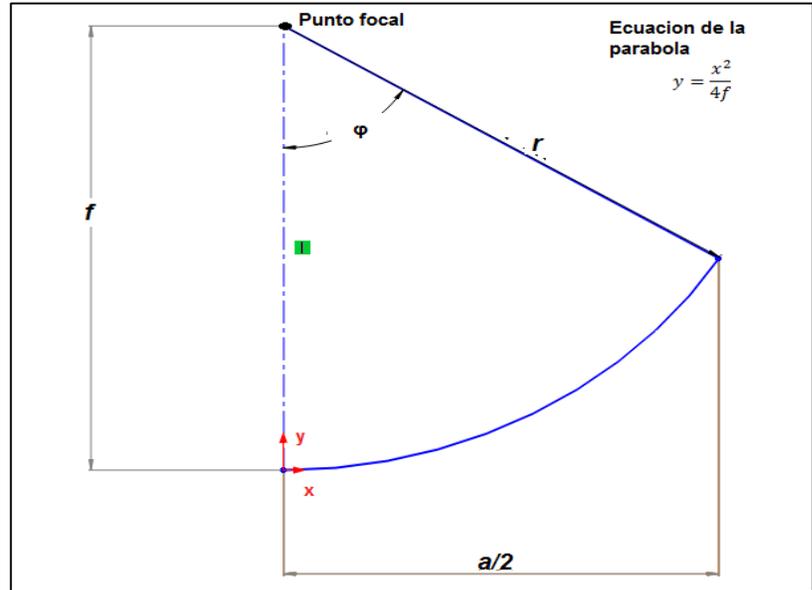


Figura 11 Angulo de incidencia del CCP

Como mencionamos el ángulo de incidencia es de especial importancia para nuestro estudio, el valor de este ángulo variara dependiendo de la zona que seleccionemos para dicho estudio, por lo que será conveniente tener una series de ecuaciones que nos permitan calcularlo

La relación que utilizaremos será la utilizada por el libro de Duffie que son ideales para colectores con dirección norte a sur.

$$\cos \varphi = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta \quad (2)$$

Donde:

$\varphi$ = Angulo de incidencia

$\lambda$ =Latitud

$\delta$ = Declinación

$\omega$ =Angulo horario

La latitud  $\lambda$  es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentre dicho punto angular. Según el hemisferio puede ser norte o sur

La declinación  $\delta$  es la posición angular del sol al mediodía solar con respecto al plano del ecuador. Esta puede ser calculada con la ecuación de Cooper:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (3)$$

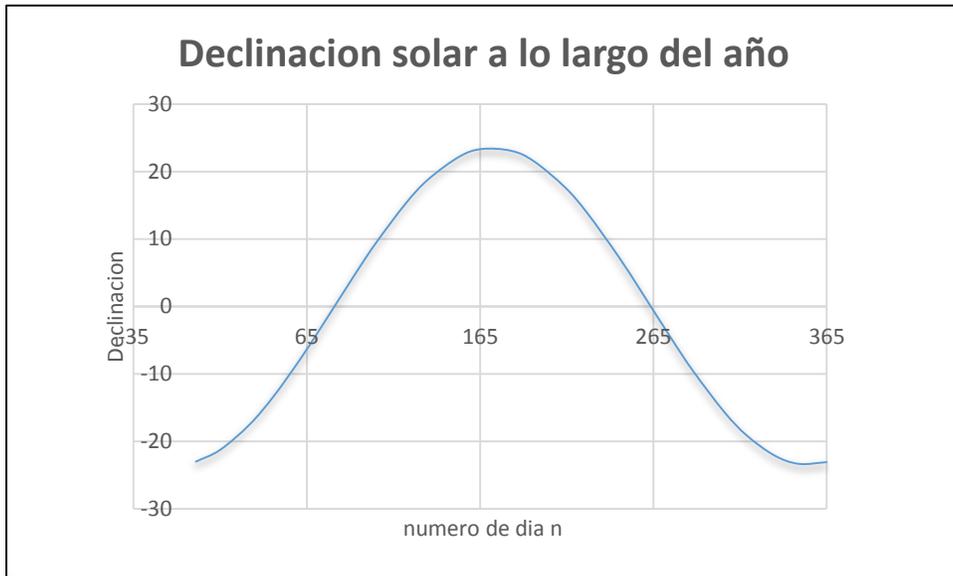
Donde n es el día del año.

En la siguiente tabla podemos observar los valores que va obteniendo la declinación en los días primero y quince de cada mes

*Tabla 17 Declinación en los días primero y quince de cada mes.*

Mes	Fecha del año	Día del año (n)	$\delta$ (grados)
enero	1	1	-23.0116367
	15	15	-21.2694739
Febrero	1	32	-17.5164955
	15	46	-13.2891562
Marzo	1	61	-7.914912
	15	74	-2.81887865
Abril	1	93	4.80970052
	15	105	9.41489335
Mayo	1	122	15.2103632
	15	135	18.7919175
Junio	1	153	22.1742353
	15	166	23.3144099
Julio	1	183	23.0496276
	15	196	21.517336
Agosto	1	214	17.6500371
	15	227	13.7835642
Septiembre	1	245	7.34236011
	15	258	2.21688678
Octubre	1	275	-4.61197927
	15	288	-9.59939723
Noviembre	1	306	-15.6660976
	15	319	-19.1478173
Diciembre	1	335	-22.1077488
	15	349	-23.3352195

Siendo el comportamiento ilustrado en la siguiente grafica



Grafica 2 Comportamiento de la declinación a lo largo del año

El ángulo horario es el desplazamiento angular del sol respecto al mediodía que el momento del día donde más alto se encuentra el sol en el cielo, cada hora corresponde a 15° de longitud.

Este puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$\omega = 15(Hrs - 12) \quad (4)$$

Tomando en cuenta la ecuación (4) podemos calcular el ángulo incidencia de la zona en la que planteemos el escenario.

### 3.1.3.2) Razón de concentración geométrica de un CCP

La razón de concentración geométrica a la que denotaremos como  $C_{geométrica}$  es la razón entre el área de apertura del colector y el área total del tubo absorbedor,

$$C_{geométrica} = \frac{A_a}{A_{tub}} \quad (5)$$

Donde:

$A_a$ : área de apertura del colector

$A_{tub}$ = área de la superficie del tubo colector

Como podemos ver en las siguientes figuras las áreas vendrían dadas por:

$$A_a = l \cdot l_a$$

$$A_{tub} = \pi \cdot d \cdot l$$

De esta forma podemos escribir la razón de concentración de la siguiente forma:

$$C_{geometrica} = \frac{l \cdot l_a}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{l_a}{\pi d} \quad (6)$$

Donde

$l$ : longitud del concentrador cilindro parabólico

$l_a$ : ancho del concentrador cilindro parabólico

$d$ = diámetro exterior del tubo absorbedor

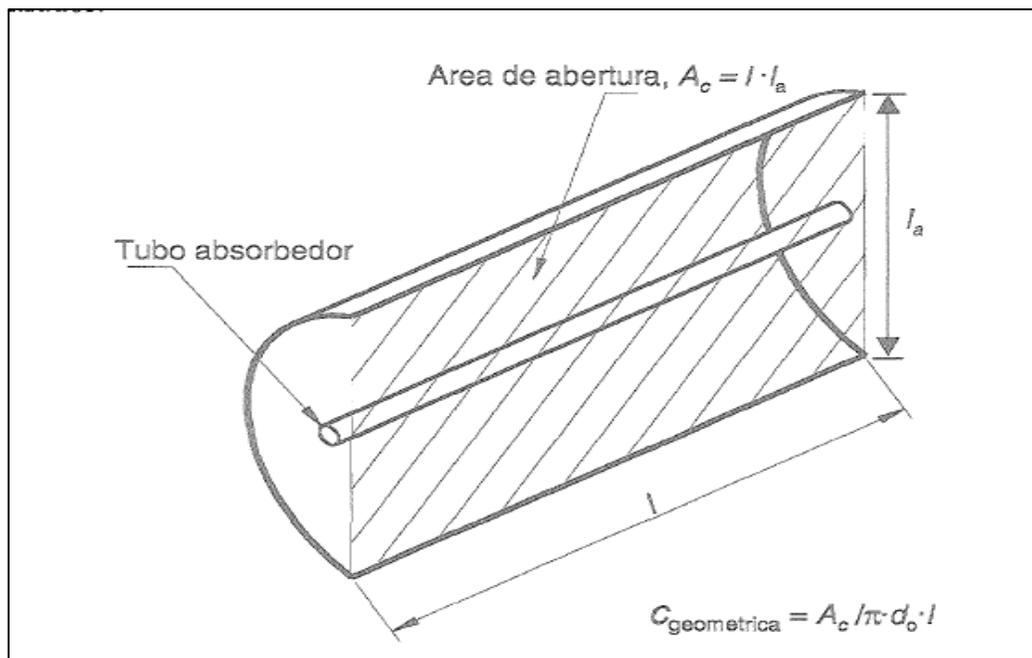


Figura 12 Razón de concentración geométrica del CCP

### 3.1.4) Pérdidas de un CCP

Por distintos factores no toda la radiación solar puede verse aprovechado, a estos factores los conocemos como pérdidas a las que podemos dividir en 3 grupos los cuales vendrían dados por:

- Pérdidas ópticas
- Pérdidas térmicas desde el tubo absorbedor al ambiente
- Pérdidas geométricas

#### 3.1.4.1) Pérdidas ópticas

Cuando hablamos de pérdidas ópticas es notorio el suponer que estas vendrán dadas por cuestiones de geometrías o propiedades físicas en los distintos componentes del colector, como lo es el hecho de que superficie reflexiva del concentrador no es un reflector perfecto o bien la superficie metálica del tubo puede tener propiedades abortivas perfectas así como tampoco la geometría del concentrador nos podría permitir tener un 100 % de aprovechamiento, todos estos factores provocan pérdidas ópticas. A esto podemos mencionar los 4 principales factores que provocan estas pérdidas cuyas describiremos a continuación:

*Reflectividad de la superficie reflectante del concentrador parabólico  $r$ :* las superficies reflexivas de los colectores no son perfectas, lo que provoca que solo una parte de la radiación incidente se refleje. Los valores típicos de la reflectividad están alrededor del 90%.

*Factor de interceptación* y Una fracción de la radiación solar reflejada por los espejos no alcanza a la cubierta de cristal del tubo absorbedor debido a diversas causas, como imperfecciones microscópicas o macroscópicas de los espejos errores de posicionamiento del colector, o incluso el bloqueo que pueden suponer los soportes del tubo absorbedor. Las imperfecciones de los espejos y los posibles errores de seguimiento solar provocan que algunos rayos no intercepten al tubo absorbedor durante su trayectoria después de ser reflejados. Estas pérdidas se cuantifican globalmente mediante el llamado factor de interceptación. Un valor típico de este parámetro es 0.95.

*Transmisibilidad de la cubierta de cristal,  $\tau$*  El tubo absorbedor metálico está situado dentro de una cubierta de cristal para disminuir las pérdidas térmicas y proteger a la superficie selectiva. Una fracción de la radiación solar reflejada por los espejos y que alcanza la cubierta de cristal del tubo absorbedor no es capaz de atravesarlo. La razón entre la radiación que pasa a través de la cubierta de cristal y la radiación total incidente sobre ella, da la transmisibilidad  $\tau$ , de dicha cubierta de vidrio, un valor de este parámetro es 0.9 o 0.95, dependiendo de que el cristal haya sido objetivo de un tratamiento anti reflexivo o no.

*Absortividad de la superficie selectiva,  $\alpha$* : Este parámetro cuantifica la cantidad de radiación que es capaz de absorber la superficie selectiva que recubre el tubo metálico absorbedor, comparada con la cantidad de radiación que llega a dicha superficie. Un valor típico de la absortividad está en el rango 90-96%.

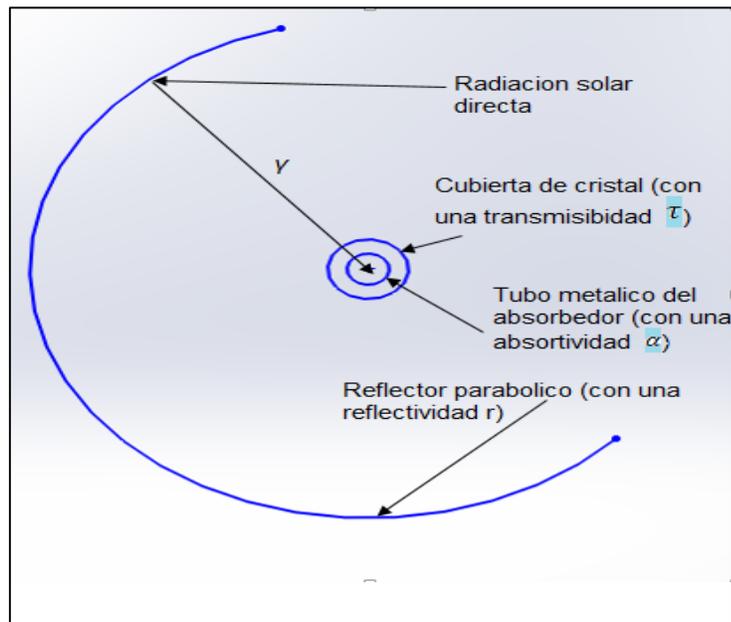


Figura 13 Propiedades ópticas de un CCP

### 3.1.4.2) Pérdidas térmicas de un CCP

Además de las pérdidas geométricas y ópticas también existen las llamadas pérdidas térmicas que se dan principalmente en dos lugares principalmente: en el tubo absorbedor y en la tubería de fluido térmico, siendo de mayor importancia las generadas en el tubo absorbedor.

Las pérdidas que pueden ocurrir en el tubo absorbedor son: pérdidas de calor por conducción a través de los soportes del tubo, pérdidas por radiación, convección y conducción desde el tubo metálico hacia la cubierta de cristal y pérdidas por conducción y radiación desde el tubo de cristal al ambiente.

Despreciaremos las pérdidas por conducción que existen en los soportes y nos concentraremos en las que se dan en el tubo absorbedor cuyas denotaremos de la siguiente manera.

$P_{Q,absorbedor-ambiente}$ : Pérdidas térmicas por radiación en el tubo absorbedor, W.

$P_{Q,absorbedor-vidrio}$ : Pérdidas térmicas por conducción y convección entre el tubo metálico absorbedor y la cubierta de vidrio, W.

$P_{Q,vidrio-ambiente}$ : Pérdidas térmicas por convección, conducción y radiación desde la cubierta de vidrio del tubo absorbedor del ambiente, W.

$P_{Q,sol-vidrio}$ : Flujo de energía radiante proveniente del sol que es absorbida por la cubierta de vidrio del tubo absorbedor, W.

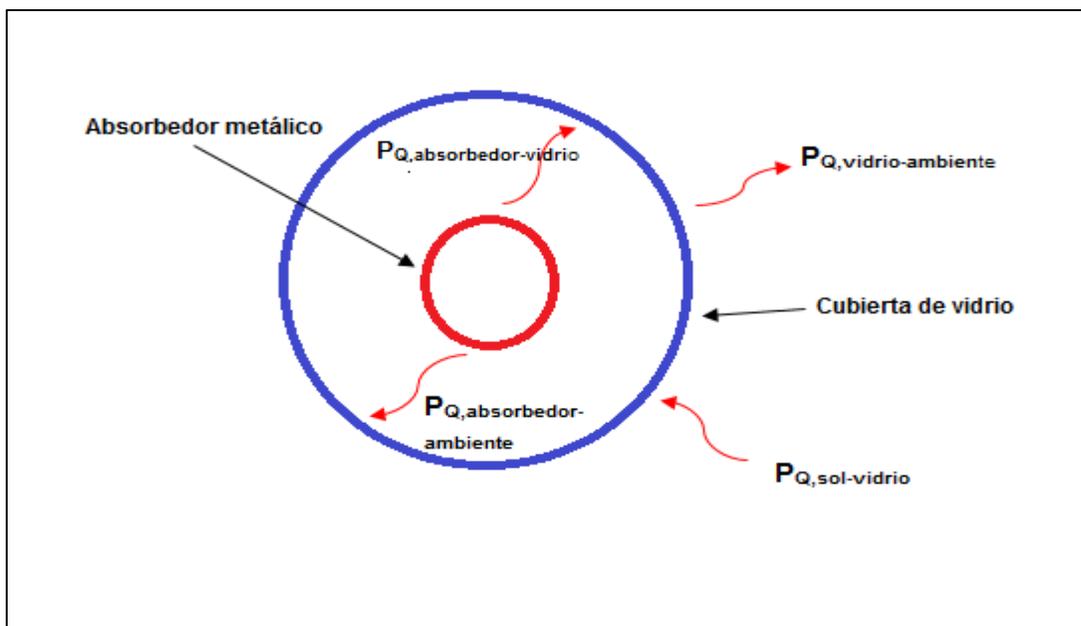


Figura 14 Pérdidas térmicas de un CCP

### 3.1.5) Rendimiento del CCP

Una vez mencionadas y descritas las características físicas, geométricas, tipos de pérdidas, componentes de un CCP, podremos realizar un estudio sobre el rendimiento de estos equipos, se plantearán las ecuaciones a partir de las características que ya hemos obtenido, así como nuevas consideraciones a tomar en cuenta.

El hecho de la existencia tanto de pérdidas geométricas, ópticas y térmicas provocan que la potencia útil de nuestro sistema sea menor a la ideal. A continuación calcularemos como se calculan estas potencias.

El flujo de calor que incide sobre el área de apertura del colector es la potencia ideal que actúa en el colector cilindro parabólico, este se da por radiación directa y viene dado por la siguiente ecuación:

$$P_{Q,sol-colector} = A_c \cdot G \cdot \cos \varphi \quad (7)$$

Donde:

$P_{Q,sol-colector}$ = potencia radiante sobre la apertura del colector, (W)

$A_c$ =área de abertura sobre la superficie reflexiva del colector, (m<sup>2</sup>)

$G$ = Irradiancia solar directa, (W/m<sup>2</sup>)

$\varphi$ = Angulo de incidencia, (°)

Podeos observar la manera en que afecta el ángulo para nuestro aprovechamiento de energía, siendo que si esta es 0 la potencia seria aprovechada al máximo, mientras que si fuera de 90 grados no tendríamos ningún aprovechamiento.

La potencial útil del sistema viene dada por el incremento de entalpia que sufre el fluido de trabajo debido al incremento en su temperatura y por la rapidez del flujo másico que circula por el tubo. Esto vendría dándose por:

$$P_{Q,colector-fluido} = \dot{m}(h_{sal} - h_{ent}) \quad (8)$$

Donde:

$P_{Q,colector-fluido}$ : potencia térmica útil suministrada por el colector, (W).

$\dot{m}$  : Flujo masico del fluido de trabajo, (Kg/s).

$h_{sal}$ : entalpia especifica del fluido de trabajo a la salida del colector, (J/Kg).

$h_{ent}$ : entalpia especifica del fluido de trabajo a la entrada del colector, (J/Kg).

Existen tres rendimientos principales los cuales son

$\eta_{global}$ : rendimiento global.

$\eta_{opt,0^\circ}$ : rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ .

$\eta_{th}$ : rendimiento térmico.

Y el parámetro

$K(\varphi)$ : Modificador de ángulo de incidencia.

### 3.1.5.1) Rendimiento global

El rendimiento global  $\eta_{global}$  es aquel que considera todas las pérdidas que surgen desde el proceso, es decir la relación entre la potencia obtenida por la radiación directa y la potencia útil generada por el cambio energético del fluido, expresado en manera de ecuación tenemos:

$$\eta_{global} = \frac{P_{Q,colector-fluido}}{P_{Q,sol-colector}} \quad (9)$$

### 3.1.5.2) Rendimiento óptico

El rendimiento óptico  $\eta_{opt,0^\circ}$  es un valor constante, ya que este no depende ni de la radiación, ni la temperatura de trabajo del fluido. Al ser el valor constante el fabricante generalmente incluirá este valor como uno de los parámetros característicos del colector. Un factor que si influye en el rendimiento óptico es el *grado de ensuciamiento*  $Fe$ , este factor influye en la reflectividad de los espejos y a la transmisibilidad de la cubierta de vidrio del tubo absorbedor, por lo tanto podríamos expresar al rendimiento óptico de la siguiente manera:

$$\eta_{opt,0^\circ} = r \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad (10)$$

Aunque por lo general este rendimiento ya vendrá otorgado por el fabricante.

### 3.1.5.3) Rendimiento térmico

El rendimiento térmico depende directamente de la temperatura de trabajo del tubo absorbedor, de modo que alcanza su valor pico ( $\eta_{th}=1$ ) cuando la temperatura del tubo es igual a la del ambiente. Este valor suele expresarse como una función de la temperatura ambiente y de la temperatura del absorbedor.

Para el presente trabajo utilizaremos la llamada *eficiencia instantánea* este valor nos permitirá observar la eficiencia de un colector a partir de dos datos importantes como son la irradiación solar G y la variación de temperatura a partir de una ecuación que tenga los coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $\eta_0$ .

Por lo tanto la ecuación que determinara nuestra eficiencia térmica vendría dada por:

$$\eta_{th} = \eta_0 - a_1 \left(\frac{\Delta T}{G}\right) - a_2 \left(\frac{\Delta T}{G}\right)^2 \quad (11)$$

$\eta_0$ = coeficiente de pérdida, este será el termino independiente

$a_1$ = coeficiente de pérdida de calor, el termino de grado 1

$a_2$ = coeficiente de pérdida de calor, este será el termino de grado dos

$\Delta T$ = diferencia de temperatura entre el ambiente él y el tubo absorbedor ( $T_m - T_a$ )

Esto lo haremos debido a que dichos coeficientes son brindados por los proveedores de dichos equipos y se nos hará más fácil en el momento de plantear una eficiencia global.

### 3.1.5.4) Modificador de ángulo de incidencia

Este factor depende directamente del ángulo de incidencia, es un valor muy importante que puede variar de un colector a otro por lo que se explicara en esta sección específicamente.

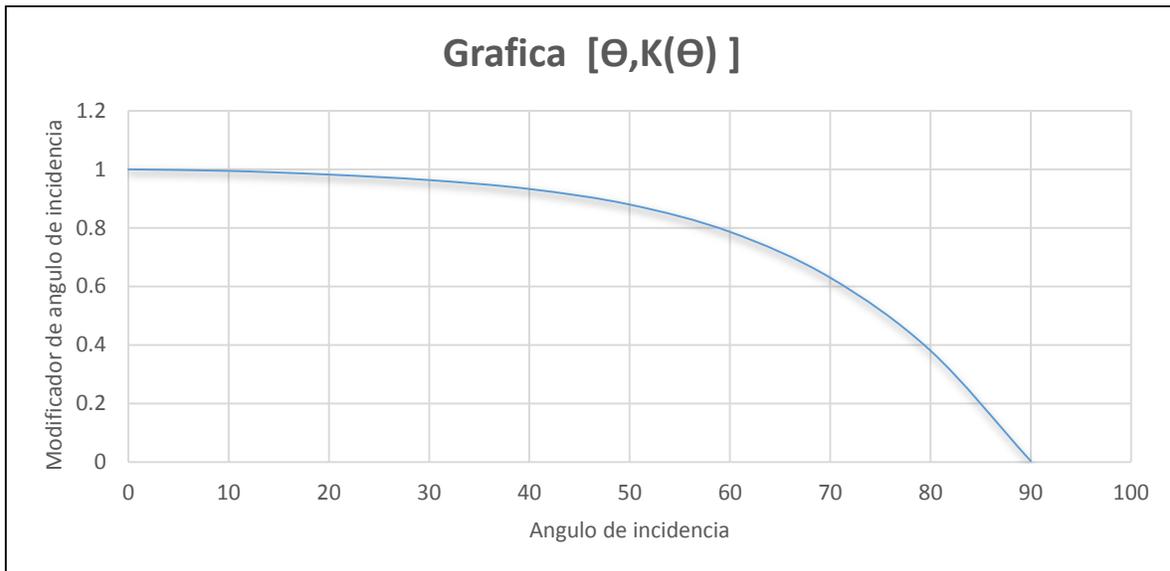
El *Modificador de ángulo de incidencia*  $k(\varphi)$  depende directamente del ángulo de incidencia como ya se mencionó, este se caracteriza que  $k=1$  cuando  $\varphi=0$  es decir un aprovechamiento pico y  $k=0$  cuando  $\varphi=90$  que es cuando no hay aprovechamiento energético, este modificador puede expresarse de manera polinomial y es obtenida de

manera experimental, la ecuación puede variar de un colector a otro como ya menciono anteriormente, aunque no suele haber gran diferencia de un modelo a otro

A continuación se presenta un ejemplo de un Modificador de ángulo de incidencia que fue adaptado para de un captador parabólico lineal Hexcel en el año de 1980.

$$k(\varphi) = 1 - 6.74 \times 10^{-5} \varphi^2 + 1.64 \times 10^{-6} \varphi^3 - 2.51 \times 10^{-8} \varphi^4 \quad (12)$$

En la siguiente grafica se muestra la variación del modificador en función del ángulo de incidencia.



Grafica 3 Comportamiento del modificador de ángulo de incidencia

Como se puede observar el rendimiento pico se da en 0° mientras es nulo en un angulo de 90°.

### 3.1.6) Balance de energía en el CCP en base a las eficiencias

Tomando en cuenta los dos rendimientos descritos anteriormente y el modificador de angulo de incidencia tenemos que:

$$\eta_{glob} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot k(\varphi) \cdot \eta_{th} \quad (13)$$

En la siguiente figura se expresa el balance de energía en un CCP, considerando todos los factores descritos anteriormente

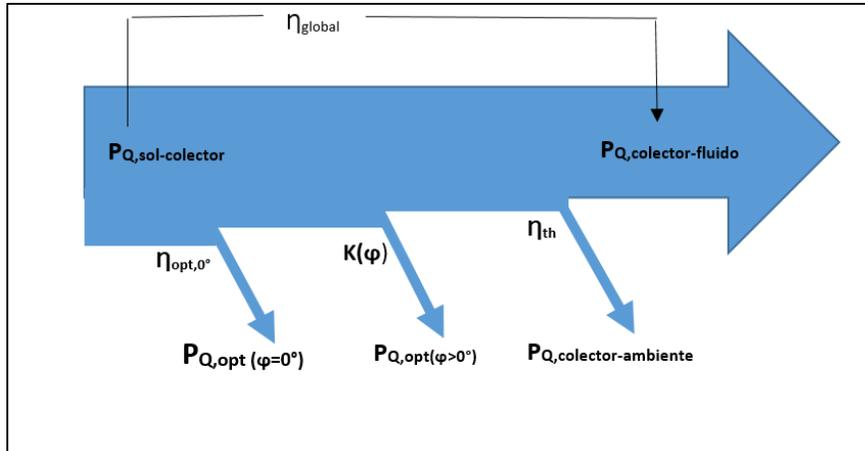


Figura 15 Balance de energía en un CCP

Ahora lo que a nosotros nos interesa es la potencia útil ya que es la que aprovecharemos para la generación de energía, a partir de los valores obtenidos anteriormente podemos expresar la potencia útil en función de los parámetros que establecimos y considerando el factor de ensuciamiento:

$$P_{Q,colector-fluido} = P_{Q,sol-colector} \cdot \eta_{global} = A_c \cdot G \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{opt,0^\circ} \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{th} \cdot Fe \quad (14)$$

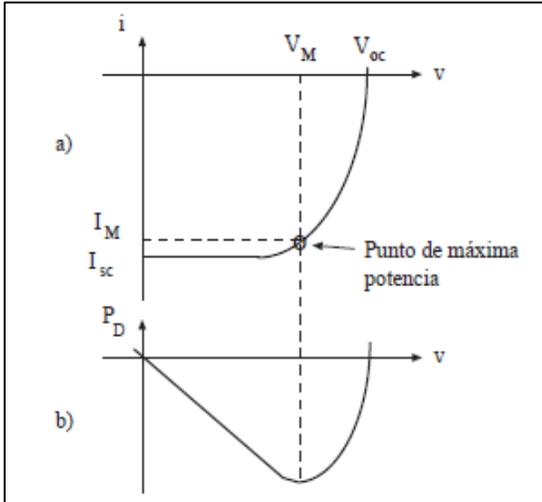
Tomando en cuenta un aprovechamiento pico en el modificador de ángulo de incidencia es decir a  $0^\circ$  podemos expresar la eficiencia de la siguiente manera.

$$\eta_{global} = \eta_{opt,0^\circ} \eta_{th} \quad (15)$$

### 3.1.7) Caso especial: La célula solar

Posteriormente se han propuesto para la selección del sector solar entre ellas se considerará un modelo que aparte de la tecnología de concentración solar, contiene células solares, por eso mismo describiremos las ecuaciones que rigen estos equipos.

La célula solar es un dispositivo que convierte la energía de la radiación luminosa que incide sobre ella en energía eléctrica. Consiste en un fotodiodo que trabaja en el cuarto cuadrante. Nótese que la potencia disipada es positiva en el primero y tercer cuadrante, pero es negativa en el cuarto.



Una potencia disipada negativa significa que el dispositivo entrega potencia en lugar de consumirla.

En la figura se representa la característica i-v de una celular solar y la potencia que entrega en función de la tensión entre sus terminales. Se hace trabajar a la célula solar en el punto de su característica en el que la potencia entregada es máxima. La potencia eléctrica que entrega en este punto, es  $I_m V_m$ . La

corriente que se entrega cuando se cortocircuitan sus terminales ( $v=0$ ) se denomina

Figura 16 a) Característica i-v de una célula solar. b) Potencia entregada en función de la tensión

corriente de corto circuito de la

celula  $I_{sc}$ . La tensión que presenta entre sus

terminales cuando estos se mantienen en circuito abierto se llama tensión de circuito abierto,  $V_{oc}$ . Se denomina factor de forma FF, a la siguiente relación

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (16)$$

Un parámetro importante de la célula solar es su rendimiento o eficiencia de conversión, que es la relación entre la potencia eléctrica que entrega y la potencia luminosa incidente:

$$\eta_{cel-sol} = \frac{P_{ele}}{P_{luz}} = \frac{I_m V_m}{P_{luz}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{luz}} \quad (17)$$

La potencia luminosa procedente del sol, en la superficie terrestre es del orden de  $100 \text{ mW/cm}^2$ . Un valor típico de eficiencia de conversión en las células actuales es del 15%. Por tanta, una célula solar puede proporcionar unos  $15 \text{ mW/cm}^2$  de energía eléctrica. Valores típicos de los otros parámetros de las células solares de silicio son:  $V_{oc}=0.6 \text{ V}$ ,  $I_{sc}=30$

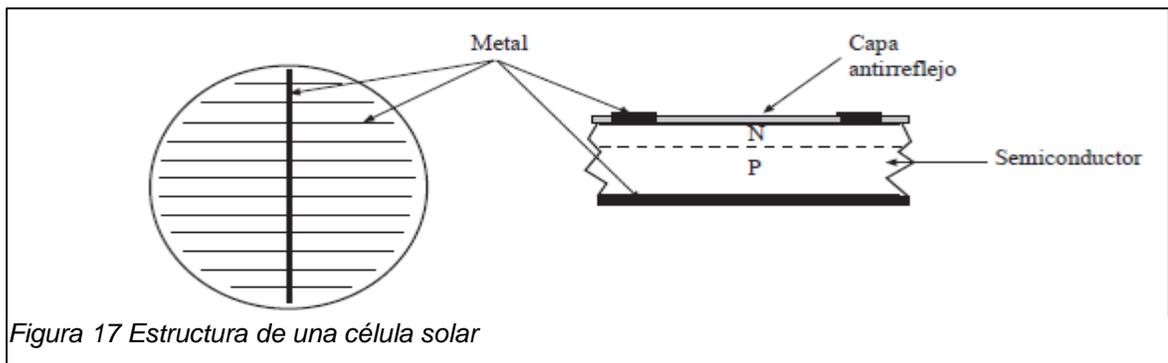


Figura 17 Estructura de una célula solar

$\text{mA/cm}^2$ ,  $\text{FF}=0.83$ . Para conseguir unos valores prácticos de tensión eléctrica a través de células solares suelen conectarse varias de ellas en serie. Si se conectan  $n$  en serie, el conjunto equivale a una batería que entrega una corriente  $I_m$  y una tensión  $nV_m$ . Este conjunto de células interconectadas se denomina *panel fotovoltaico*. En la figura se representan una célula solar. El contacto metálico de la superficie iluminada debe permitir la penetración de la radiación solar. Por esto tiene forma de espina de pez. En las regiones de la superficie no hay metal se deposita una capa antirreflejo para evitar las pérdidas por reflexión en la superficie. La superficie posterior está completamente metalizada. Entre ambas superficies se encuentra el dispositivo activo consistente en una unión PN de un espesor total de unos 0.3 mm.

### **3.1.8) Propuestas iniciales**

Con el fin de abastecer a una zona urbana que presente la problemática de electricidad tendremos que seleccionar un colector solar que nos pueda proveer de 100 kW como está considerado inicialmente, para esto se ha tomado en cuenta como principal opción el sistema de concentrador cilindro parabólico, así que analizaremos unos equipos para a partir de un análisis en su eficiencia seleccionar el que se adapte más a los requerimientos que proponemos.

Los equipos propuestos son equipos que encontramos en el mercado, con el fin de tomar medidas físicas, condiciones de operación propuestas por empresas, entre otros datos para poder realizar los cálculos para diseñar un campo solar que nos provea de la potencia propuesta.

#### **Propuesta 1**

Para la primera propuesta tomaremos las características de un equipo que existe en el sistema. Es un concentrador solar parabólico que concentra los rayos del sol en un receptor central. La cuba está cubierta por un vidrio templado que protege el reflector y el receptor. El producto no acumula suciedad y es resistente al granizo y al viento (solidez ante tifones).

Este sistema produce agua caliente y vapor hasta 160 Celsius y el producto se puede utilizar para reemplazar los combustibles fósiles en procesos industriales. El producto está diseñado para montaje en cubierta o directamente en el suelo.

A continuación describiremos algunas de sus características que consideramos importantes.

### Concentrador

*Tabla 18 Características del concentrador de la propuesta 1.*

<b>Superficie total</b>	<b>9.965 mm x 1.095 mm= 10.91 m<sup>2</sup></b>
Apertura	10.37 m <sup>2</sup>
Altura del colector	350 mm
Peso del colector	315 Kg
Material de sellado	silicona
Material externo	Acero galvanizado lacado
Vidrio	Vidrio templado bajo en hierro de 4mm

### Receptor

*Tabla 19 Características del receptor de la propuesta 1.*

<b>Material</b>	<b>Aluminio/ revestimiento selectivo</b>
Compensación de temperatura	Montaje sobre railes
Volumen de liquido	5 litros
Flujo recomendado	10 litros/min

### Rendimiento solar

*Tabla 20 Factores de rendimiento solar de la propuesta 1.*

<b>Coef. Perd. Lineal b1</b>	<b>0.849 W/(m<sup>2</sup>.K)</b>
Coef. Perd. Lineal b2	0.849 W/(m <sup>2</sup> .K)
Rendimiento óptico (laminar)	0.7
Rendimiento óptico (turbulento)	0.7

Coef perdidas- épsilon/alpha	0.003 W/(m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> )
Capacidad térmica dinámica	63361 J/K
Superficie absorbedor	0.7 m <sup>2</sup>
Fracción radiación difusa	0.294%
Max. Presión	16 bar

### Tubo absorbedor

Tabla 21 Dimensiones del tubo absorbedor de la propuesta 1.

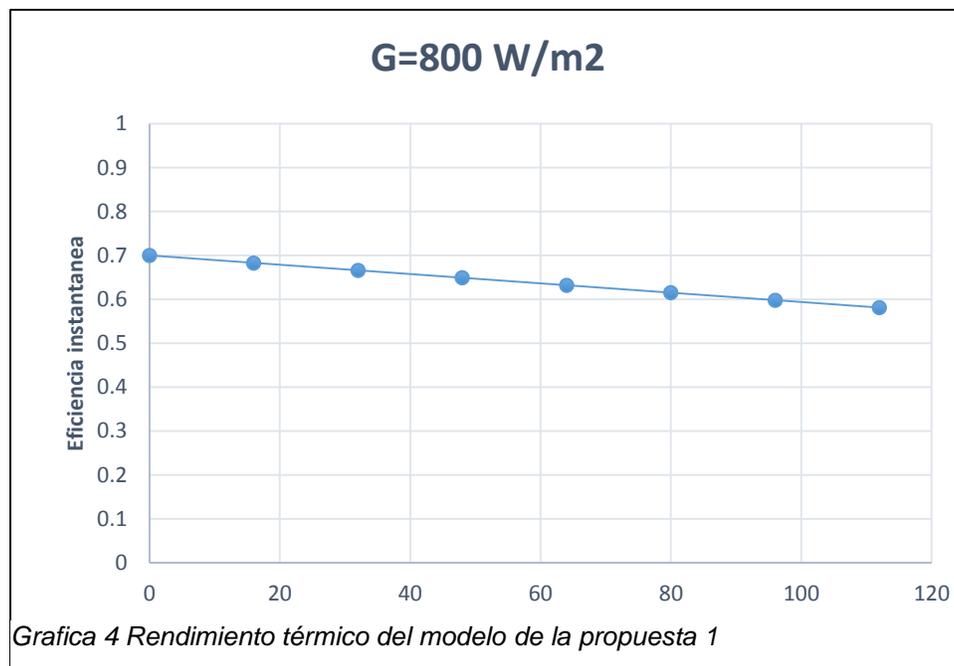
Longitud	9.965 m
Diámetro externo	22 mm
Diámetro interno	18 mm

### Eficiencia térmica para la propuesta 1

En base a los coeficientes obtenidos del boletín técnico podemos plantear la ecuación como:

$$\eta_{th} = 0.7 - 0.849 \left(\frac{\Delta T}{G}\right) - 0.003 \left(\frac{\Delta T}{G}\right)^2 \quad (18)$$

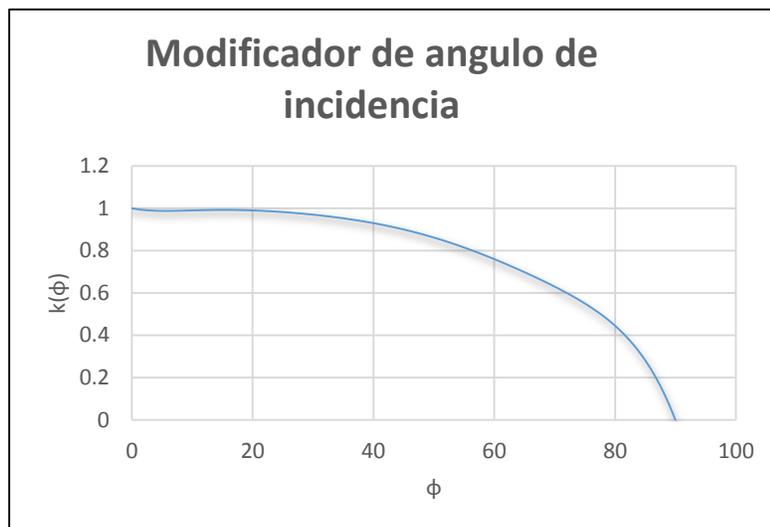
Tomando una radiación de  $G= 800 \text{ W/m}^2$  tendríamos el siguiente comportamiento.



## Modificador de Angulo de incidencia para la propuesta 1

En base al boletín técnico tenemos los siguientes datos sobre el MAI y podemos expresarlo en la siguiente gráfica:

$\phi$	$K(\phi)$
0	1
10	0.99
20	0.99
30	0.97
40	0.93
60	0.76
70	0.63
90	0



Grafica 5 Modificador de ángulo de incidencia de absolicon T160

Los valores en  $0^\circ$  igual a 1 y en  $90^\circ$  igual a cero, se tomaron a partir de las consideraciones de la tesis doctoral de Zarsa, y para tener una ecuación que nos rijan el sistema usaremos un método de interpolación en este caso el método de *diferencias divididas de Newton*.

Este método nos generará una ecuación polinómica que nos dará una aproximación del comportamiento del modificador dentro del rango de ángulos que hemos puesto. Por lo tanto tenemos:

$$k(\phi) = -1.0031 \times 10^{-12} \phi^7 + 2.7833 \times 10^{-10} \phi^6 - 3.0883 \times 10^{-8} \phi^5 + 1.7552 \times 10^{-6} \phi^4 - 0.0006 \phi^3 + 0.00086 \phi^2 - 0.00555 \phi + 1 \quad (19)$$

## Propuesta 2: Opción PVT (Photovoltaic thermal)

El sistema híbrido que cuenta con energía térmica y eléctrica fotovoltaico es un concentrador solar parabólico que concentra los rayos solares en un receptor central. La caba está cubierta por un vidrio templado que protege el reflector y el receptor.

La propuesta del equipo PVT se utiliza para instalaciones en cubierta o suelo para suministrar agua caliente y electricidad. La producción de energía solar térmica típica para un equipo PVT de 10 m es de 500 litros de agua caliente al día. La energía eléctrica (STC) es de 1.000 Wp.

### Características

- Producción térmica y fotovoltaica combinada
- Elevada producción térmica, especialmente en invierno
- Seguimiento de un eje
- Protección activa contra el viento: posición de seguridad en caso de viento fuerte
- No sobrecalentamiento del fluido térmico
- Posición de recogida vertical para protegerse de la nieve y la suciedad
- Soporte integrado con pies de fácil montaje
- Coste de canalización en la cubierta reducido
- Inversor pre montado
- Adaptado para seguir la rotación solar durante todo el día para mejor aprovechamiento de los rayos solares

### Concentrador

Tabla 22 Características del concentrador de la propuesta 2.

<b>Superficie total</b>	<b>9.965 mm x 1.095 mm= 10.91 m<sup>2</sup></b>
Apertura	10.37 m <sup>2</sup>
Altura del colector	350 mm
Peso del colector	315 Kg
Material de sellado	silicona
Material externo	Acero galvanizado lacado
Vidrio	Vidrio templado bajo en hierro de 4mm

## Receptor

Tabla 23 Características del receptor de la propuesta 2.

Material	Aluminio/ acero
Compensación de temperatura	Montaje sobre railes
Recubrimiento selectivo y FV combinando	

## Rendimiento solar

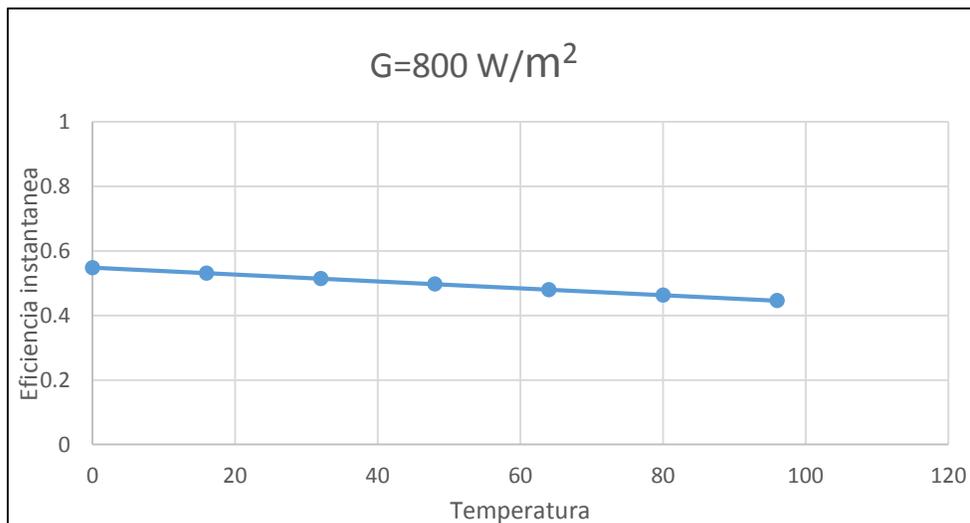
Tabla 24 Factores de rendimiento solar de la propuesta 2.

Coef. Perd. Cero $\eta_0$	0.548
Coef. Perd. De calor a1	0.849
Coef. De perdida de calor de segundo grado a2	0.003
Factor de eficiencia del dispositivo de absorción	0.617

Por lo tanto podemos expresar el rendimiento en la siguiente ecuación:

$$\eta_{th} = 0.548 - 0.849 \left( \frac{\Delta T}{G} \right) - 0.003 \left( \frac{\Delta T}{G} \right)^2 \quad (20)$$

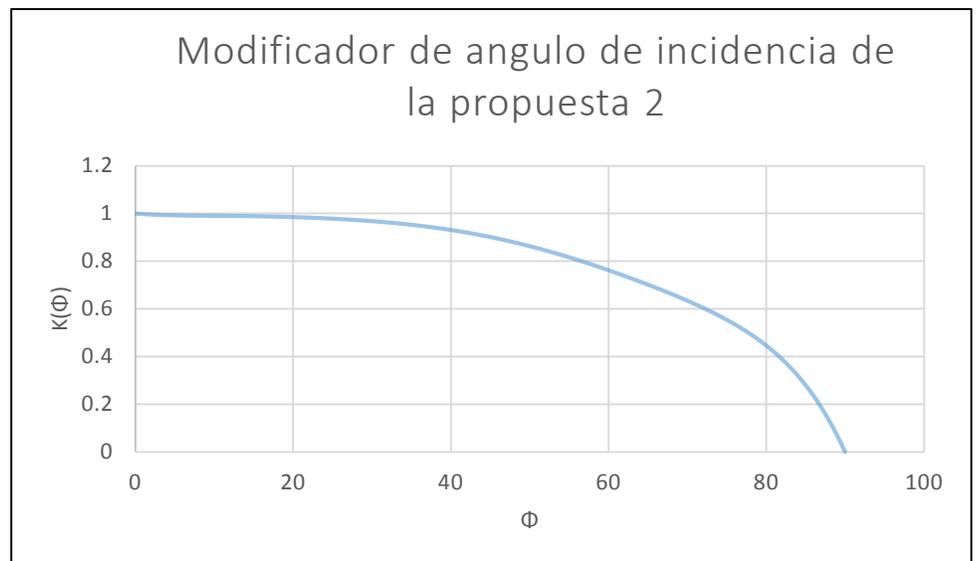
Que a una radiación de  $G=800 \text{ W/m}^2$  se tendría el siguiente comportamiento:



Gráfica 6 Rendimiento térmico de la propuesta 2

## Modificador de ángulo de incidencia

$\varphi$	$K(\varphi)$
0	1
20	0.985
30	0.968
40	0.931
50	0.863
60	0.762
70	0.634
90	0



Grafica 7 Modificador de ángulo de incidencia de la propuesta 2

De igual manera que en el sistema anterior utilizando un método de interpolación, en este caso el de Diferencias divididas de Newton, obtendremos una función polinomial que describa una aproximación al modificador de ángulo de incidencia. Cuya es:

$$k(\varphi) = -6.636x10^{-13}\varphi^7 - 1.68458x10^{-10}\varphi^6 - 1.676673x10^{-8}\varphi^5 + 8.429932x10^{-7}\varphi^4 - 2.440597x10^{-5}\varphi^3 + 3.654647x10^{-4}\varphi^2 - 2.854772x10^{-3}\varphi + 1 \quad (21)$$

## Rendimiento fotovoltaico

Tabla 25 Rendimiento fotovoltaico de la propuesta 2.

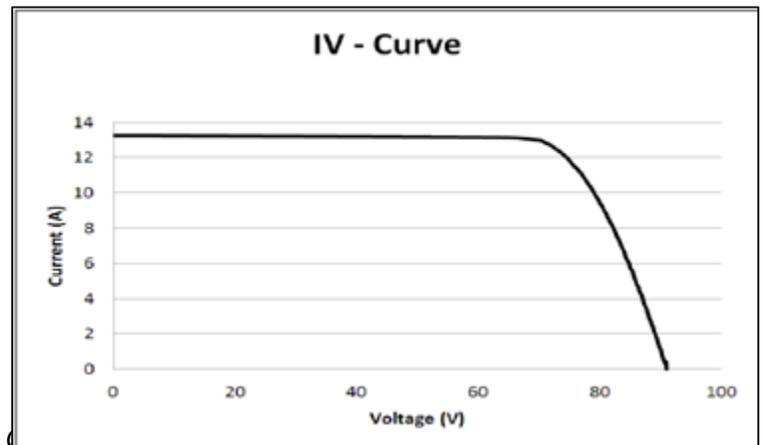
Potencia nominal STC	1, 000 W (+/- 5%)
Corriente STC a Mpp	12.5 A
Tensión STC a Mpp	80 V
Corriente de corto circuito STC	13.5 A
Tensión de circuito abierto STC	92 V

Tensión máxima del sistema	200 V
Fusible máximo circuito fuente	15 A
Tipo de célula	Mono cristalina 20x
Caída de potencia	-0.4%/°C
N° de diodos	14 Piezas
N° de células de 32 x 110 mm	166 Piezas

Tomando estos datos y las ecuaciones 16 y 17 tenemos que:

$$FF = \frac{(12.5 A)(80 V)}{(13.5 A)(92 V)} = 0.805$$

$$P_{ele} = (12.5A)(80V) = 1000W$$



Esta potencia generada se le sumara a la total generada por el colector cilindro parabólico.

### 3.2) Diseño de sistema hibrido (Energía a partir de biogás obtenido de nopal)

#### 3.2.1) Energía a partir de biomasas

Con el fin de diseñar un sistema hibrido de generación de energía en el que como principal fuente sea la energía solar a partir de un colector solar, se pretende que la otra alternativa sea utilizar biogás a partir de nopal, para eso se tienen que tomar varias consideraciones como son: condiciones para su cultivo, especies adecuadas, cantidad de metano que producen cantidad necesaria para alimentar al bloque de potencia por mencionar algunas.

Así que comenzaremos explicando en que consiste la energía a partir de biomasas, seguiremos con las condiciones para el cultivo de esta, y luego las cantidades de metano tanto producidas como necesarias.

### 3.2.2) ¿Qué son las biomásas y bioenergías?

La bioenergía es la energía que se obtiene a partir de biomasa, que es la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Biomasa es por tanto, toda planta o materia que hay sobre la superficie: residuos agrícolas, forestales, restos de la industria de la madera, y cultivos energéticos como cardo, girasol, pautonia, etc. También incluye todos los productores de energía provenientes de biomasa incluyendo los orígenes vivos de origen biológico. La biomasa se encuentra disponible localmente como fuente de energía de proveer electricidad, calor y energía.

La energía que contiene la biomasa es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO<sub>2</sub>) en compuestos orgánicos.

Si bien la biomasa solo representa solo una pequeña parte de la masa total de la tierra, su importancia es vital, ya que es el gran reservorio de energía para que la vida se sustente en el planeta a pesar de que solo aprovecha una fracción de la energía que entregada por el sol, y fijada por los organismos fotosintetizadores. La alteración de dicho ciclo influye directamente en la existencia de la vida sobre la tierra, ya que permite el suministro de oxígeno a la atmósfera y a todos los organismos que requieren de él para su existencia.

Los diferentes tipos de biomásas pueden clasificarse en:

-*Natural*: producidos en ecosistemas naturales

-*Residual*: de la que forma parte:

- Residuos forestales: comprende los residuos de tratamiento silvícolas y de cortes de pie maderables.
- Residuos agrícolas: incluye los restos de poda, rastrojos de cultivos, etc.
- Residuos de industrias forestales: representa los aserraderos, fábricas de pasta y pape, etc.
- Residuos de industrias agrícolas: comprende los bagazos, orujos, cascara, vinazas, huesos, etc.

- Residuos biodegradables: se refiere a los purines, estiércoles, fangos de depuradoras, domiciliarios, mataderos, harinas, cárnicas, sebos, etc.

-*Cultivos energéticos:*

- Especies leñosas en turnos de 3-4 años y con 280 m<sup>3</sup>/ha, *Populus*, etc.
- Especies herbáceas, *Miscanthus*, *Cynara*, etc.
- Cultivos para producir etanol (trigo, maíz, patata, sorgo azucarero, etc).
- Cultivos para producir biodiesel (colza, girasol, lino oleaginoso, etc.).

-Excedentes agrícolas

Sirven para completar los cultivos no alimentarios y sustituir los cultivos no alimentarios y sustituir parcialmente los biocarburantes y los combustibles fósiles (aceite de algodón, aceite de soya, aceite de cártamo, etc.) en su caso.

### **3.2.3) Trabajos previos**

La explotación del nopal como generador de biogas es muy reciente, y empezó casi por accidente. En los primeros estudios el año 1984 realizados en la Universidad de Chile (Contreras y Toha) fue casi por accidente que descubrieron que el nopal al fermentar en condiciones anaeróbicas produce volúmenes de gas en forma importante.

En los años 90 se construyeron diversas plantas experimentales, perfeccionando el proceso y el layout de los elementos. A medida que el costo de instalación bajaba, y la población tomaba una conciencia cada vez mayor de la necesidad de encontrar fuentes de energía renovable, el proceso se convirtió en una opción rentable. En el 2010 se realizaron las primeras prospecciones en México, país en el cual el nopal es una especie cultivada y consumida desde tiempos inmemoriales. Incluso está representado en su símbolo patrio, la bandera.

### 3.2.3.1) Uso del biogás de nopal en México

La empresa mexicana Grupo Agroindustrial Nopal de Camébaro ubicada en Zitácuaro, Michoacán, desarrolla biogás electricidad a partir de la biomasa de nopal, esto tras varios años de investigación, selección y análisis de materia prima.



Figura 18

El proyecto inició en 2007 con una serie de investigaciones sobre las potenciales aplicaciones del nopal y el proceso para la generación del biogás, con apoyo de expertos del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), así como la asesoría técnica y orientación profesional del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). En 2008, la empresa logró la obtención de biogás a nivel experimental.

Miguel Aké Madera, investigador de energías renovables y director técnico del proyecto, comentó a la Agencia Informativa Conacyt que la obtención de biogás a partir de la biomasa de nopal se logró a través del proceso anaerobio, para el que se utilizó nopal del género *Opuntia ficus-indica*, variedades Esmeralda y Chicomostoc, una de las 104 especies de nopal que existen en México.

### 3.2.4) Proceso de producción de biogás

#### 3.2.4.1) Manejo y almacenamiento

Los estudios realizados han demostrado que una hectárea de plantas de nopales de más de 5 años puede producir hasta 100 toneladas frescas de cladodios al año en superficies que reciben poca lluvia, por ejemplo, 150mm anuales. La modalidad de explotación de las nopaleras silvestres a través de la recolección de cladodios, aún subsiste y es llevada a cabo por los habitantes de las zonas semiáridas de algunos estados de México.

La poda de los cladodios es una práctica de manejo muy importante de este cultivo; sin embargo, a los nopales no se les ha dado la importancia que este tiene sobre el rendimiento y calidad de sus productos. Esto puede obedecer a la eventualidad del mercado y los costos de producción más elevados en un mercado incierto.

En el caso de que el material proveniente de la poda no se utilice para nuevas plantaciones o que no reúna las características deseadas para tal fin, se sugiere utilizarlo para la obtención de **biogás**, abono orgánico o para la alimentación del ganado.

Así mismo se puede prever una producción de cladodios específica para alimentar biodigestores en combinación con la producción animal. Para dicho fin no se requiere un manejo especial de la planta; los cladodios maduros de cerca de un año, una vez cortados y trozados, pueden alimentar directamente los biodigestores, En algunas ocasiones quedaran en el suelo, pero se debe evitar que sea por un largo periodo ya que se inicia el proceso de biodegradación restando eficiencia al proceso de obtención de biogás y bioabono. Si los cladodios no se van utilizar inmediatamente por que el tamaño del biodigestor no lo permite, se pueden almacenar a la sombra, en un lugar fresco y seco por varios días.

#### **3.2.4.2) Proceso utilizado en México**

En la empresa mexicana Grupo Agroindustrial Nopal de Camébaro se ha utilizado un proceso en el que las pencas de nopal son cortadas y colocadas en una tolva de recepción, que pasan a un triturador, son sujetas a un proceso de homogenización, para posteriormente incorporarse al biodigestor anaeróbico, en el que se mezcla agua y desechos de ganado alimentado con nopales. La obtención de gas se obtiene después de cuatro a seis semanas de proceso dentro del biodigestor.

De lo anterior se obtiene un 92 por ciento de gas metano, dióxido de carbono, y una pequeña cantidad de ácido sulfhídrico. El gas metano alimenta un generador que produce 35.5 kilovatios (kW) de energía eléctrica. El biogás generado es almacenado, lavado y comprimido. Otro de los productos que se generan a través del biodigestor son agua nitrogenada y material sólido para producir humus.

### **3.2.5) Requerimientos agro – climáticos para el cultivo de nopal.**

#### **3.2.5.1) Condiciones climáticas**

En cuanto a las condiciones climáticas requeridas para su desarrollo, es necesaria una temperatura media anual de 16-28° C; una precipitación pluvial media anual de 150-1800 mm., la altitud tiene un margen de 800- 1800 msnm. En general, los rangos mencionados se refieren a condiciones óptimas de desarrollo del nopal, sin embargo el nopal prolifera, fuera de estas características.

#### **3.2.5.2) Variables topográficas**

El nopal para verdura se presenta desde el nivel del mar hasta los 2.600 m de altura. Su distribución natural es en laderas, terrenos planos y valles. Las plantaciones más grandes se encuentran en laderas al sur de la ciudad de México y norte del estado de Morelos, el cultivo requiere de áreas con exposiciones soleadas durante la mayor parte del día.

#### **3.2.5.3) Otras consideraciones**

De preferencia la plantación se debe establecer cerca de una cortina rompe vientos, ya sea una cerca, pared o hilera de árboles, ya que si en la región existen vientos fuertes pueden romper el plástico o mover los almácigos.

Una vez establecido el nopal, se adapta a condiciones o áreas disturbadas, aunque requieren de labores y cuidados para lograr buenos resultados en cuanto a rendimientos de verdura y duración de la plantación.

### **3.2.6) Requerimiento para el cultivo**

#### **3.2.6.1) Suelo**

Suelos de origen calcáreo, textura franca, franco arcilloso arenosa, arena franca, franco arenoso, profundidad de 10- 15 cm., Ph 6.5 – 8.5. Los mejores suelos para las plantaciones de nopal son los de origen ígneo o calcáreo con textura arenosa, profundidad media y con un Ph neutro o de preferencia alcalino. El suelo deberá tener buena fertilidad natural y al menos 30 cm de profundidad para garantizar un buen vigor de las plantas.

#### **3.2.6.2) Agua**

Aunque el cultivo de nopal es tolerante a la falta de agua, si se pretende establecer una plantación de nopal para la producción de verdura deberá ser accesible y cercano a una fuente de agua, con el fin de proporcionarle el manejo adecuado a la plantación, y obtener mejores rendimientos. Si el cultivo es para forraje y fruto, la producción depende de la cantidad y calidad del riego.

#### **3.2.6.3) Otras consideraciones**

De preferencia la plantación se debe establecer cerca de una cortina rompe vientos, ya sea una cerca, pared o hilera ya que si en la región existen en vientos fuertes pueden romper el plástico o mover los almácigos.

### **3.2.7) Cantidades necesarias**

#### **3.2.7.1) Cantidades extraídas del nopal**

El cultivo del nopal es uno de los cultivos de mayor importancia en México de la actualidad no sólo porque está integrado a la canasta básica, sino, además, representa una opción energética viable para la producción de biogás y energía eléctrica comparándolo con la jatropha. Como referencia una hectárea de nopal produce 43.200 m<sup>3</sup> de biogás o bien el equivalente en términos de energía a 25,000 litros de diésel, al comparado con jatropha únicamente nos produce 3,000 litros de biodiesel por Hect. dejando muy claramente que además es un cultivo muy versátil y de bajo costo. La alta densidad de plantación y su alta

productividad (1000 ton / hect / año) permiten competir con otras energías renovables y no requerir subsidios.

El nopal presenta excelentes características moleculares lo cual permite entregar una gran cantidad de biogás en muy corto tiempo. En términos comparativos, para un mismo volumen de biogás el nopal se degrada 5 - 10 veces más rápido que el estiércol animal, ello permite que un mismo equipo sea 5- 10 veces más productivo. Además, no produce ácido sulfhídrico el cual al ser quemado en contacto con el aire se transforma en óxidos de azufre y posteriormente en ácido sulfhídrico produciendo lluvia ácida.

El nopal es una planta extraordinaria, con un riego tecnificado, dos o tres cosechas anuales, permite entregar en forma continua desde 800 a 1.200 ton de biomasa / año. En términos de energía equivale a 20.000 - 25.000 litros de diesel/ hectárea.



Figura 19

#### **4) Diseño del sistema**

##### **4.1) Modelo a utilizar**

Una vez ya teniendo las propuestas a utilizar hay que realizar cálculos pertinentes para tener una idea de la eficiencia del campo a diseñar, para esto se tienen que tomar algunas

consideraciones y una de ellas es la configuración en las que van a estar acoplados los colectores. En el presente trabajo se usara el modelo de “un solo paso”.

En el proceso de un solo paso toda el agua de alimentación se introduce al principio de la fila de colectores, de modo que el agua se precalienta, evapora y convierte en vapor sobrecalentado en un proceso sin interrupción, desde la entrada hasta la salida de la fila. De este modo se tiene que el caudal másico de vapor sobrecalentado que se produce se corresponde completamente con el caudal de agua que se introduce al comienzo de la fila.

Desde el punto de vista de la inversión inicial y de la ingeniería, este proceso es el de menor coste y mayor simplicidad ya que no requiere elemento auxiliar alguno. También es el que posee un mayor rendimiento global, ya que las cargas parasitas quedan reducidas al consumo de la bomba de agua de alimentación.

Pero, al mismo tiempo el proceso de un solo paso es el que presenta mayores dudas sobre la controlabilidad y estabilidad del flujo bifásico en el interior de los tubos absorbedores, ya que requiere un sistema de control muy eficiente que permita mantener constantes la presión y temperatura de vapor a la salida del campo solar aunque haya transitorios importantes en la irradiancia solar directa disponible (paso de nubes) o cambios en la temperatura del agua de alimentación a la entrada del campo solar. Este problema se ve agravado por el elevado tiempo de respuesta del sistema solar en este caso, ya que la gran longitud que deben tener las filas de colectores impone un tiempo de residencia alto, lo que siempre supone el problema a la hora de diseñar e implementar un sistema de control eficaz. Puesto que un cambio brusco en las condiciones del vapor puede suponer un grave peligro para la durabilidad de la turbina, la fiabilidad y precisión del sistema de control del campo solar en este caso debe ser garantizada.

En el siguiente esquema podemos ver un modelo simplificado del como sería el proceso, el número de colectores y la longitud total de tubería nos los darán cálculos y simulaciones que realizaremos posteriormente.

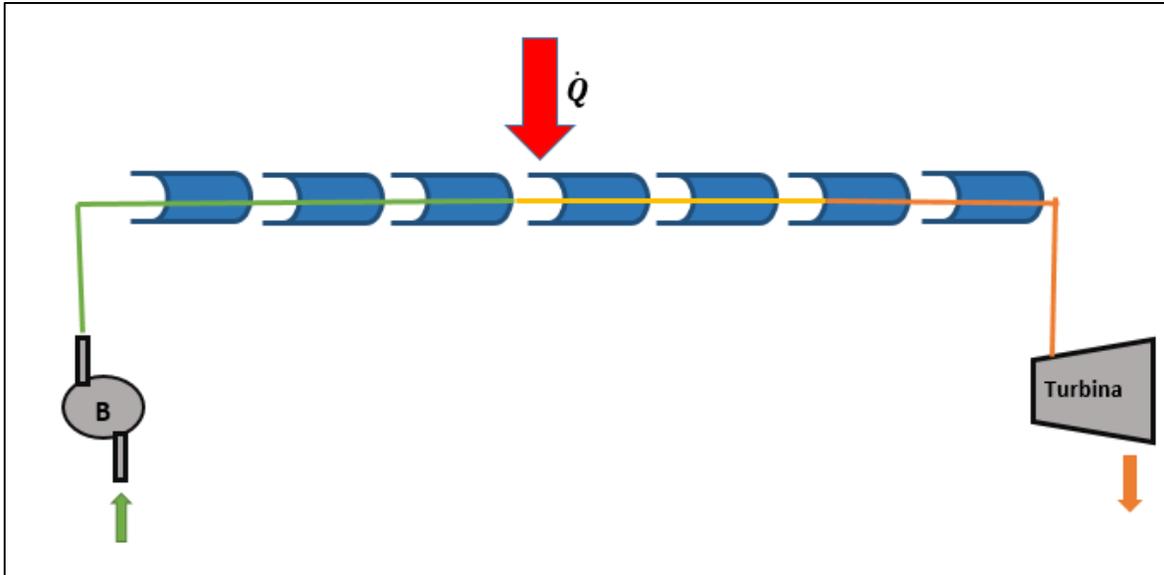


Figura 20 Esquema de modelo un-solo-paso.

## 4.2) Condiciones de operación

### 4.2.1) Flujo másico

Una propuesta inicial sería tomar el fluido a la entrada a una temperatura ambiente y tomar las condiciones de salida como vapor saturado y tomando en cuenta una generación de 100 kW, podemos entonces utilizar esta diferencia de entalpías junto con la potencia esperada para hacer el cálculo del flujo másico de nuestra conveniencia.

$$h_{25}=106.2 \text{ kJ/kg (entalpía del fluido a } 25^{\circ}\text{C)}$$

$$h_g=2793 \text{ kJ/kg (entalpía del fluido a vapor saturado)}$$

$$\text{Pot}=100 \text{ kW (Potencia útil deseada)}$$

Entonces utilizando la ecuación (8) tenemos que:

$$100 \text{ kW} = \dot{m}(2793 - 106.2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} = 0.03721 \text{ kg/s} \approx 0.04 \text{ kg/s}$$

Otro valor a tomar es el recomendado de 10 lpm, para nuestro uso practico este valor lo daremos es unidades de flujo másico, que vendría dándose por:

$$\dot{m} = \left(10 \frac{l}{min}\right) \left(\frac{1000l}{1m^3}\right) \left(\frac{1min}{60seg}\right) \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \approx 0.1666667 \text{ kg/s}$$

#### 4.2.2) Temperatura de entrada

Utilizando lo anterior podemos proponer una temperatura de entrada diferente a la del ambiente, cuya pasaría por condiciones de precalentado tomando como límite 100°C para tener condiciones que se consideren reales partiendo de los 25°C. Con ayuda del software EES (Engineering Equation Solver) tenemos la siguiente tabla de valores.

Tabla 26 Pruebas de potencia a diferentes temperaturas de entradas.

1..10	1 P <sub>T1</sub> [kW]	2 m [kg/s]	3 Pot <sub>bif</sub> [kW]	4 Pot <sub>precalentado</sub> [kW]	5 T <sub>1</sub> [°C]
Run 1	107.5	0.04	77.39	30.1	25
Run 2	106.6	0.04	77.39	29.26	30
Run 3	105	0.04	77.39	27.59	40
Run 4	103.3	0.04	77.39	25.92	50
Run 5	101.6	0.04	77.39	24.25	60
Run 6	99.96	0.04	77.39	22.57	70
Run 7	98.29	0.04	77.39	20.9	80
Run 8	96.61	0.04	77.39	19.22	90
Run 9	95.77	0.04	77.39	18.38	95
Run 10	94.93	0.04	77.39	17.54	100

Podemos observar que a una temperatura de 70°C todavía contamos con prácticamente los 100kW propuestos, esta puede ser una buena temperatura de entrada en el sistema.

También se consideró conveniente separar la potencia generada en la zona bifásica y la generada en la zona de precalentado esto con el fin de saber la energía necesaria tanto para llevar al fluido a la zona de mezcla como para saber la energía necesaria para el cambio de fase.

### 4.2.3) Gradiente de temperatura

Considerando una buena temperatura ambiente como la de 25°C y considerando una temperatura de saturación de  $T_{\text{sat}}=201.4^{\circ}\text{C}$ , esto nos servirá para obtener una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) para obtener la eficiencia térmica, tenemos que

$$\Delta T = (201.4 - 25)^{\circ}\text{C} = 176.4^{\circ}\text{C}$$

Cabe recalcar que esta diferencia de temperatura se presentara en la zona bifásica del sistema, mientras que en la zona de precalentado tendríamos eficiencias más altas, aunque por cuestiones de diseño podemos tomarla por el momento una eficiencia global en todo el sistema.

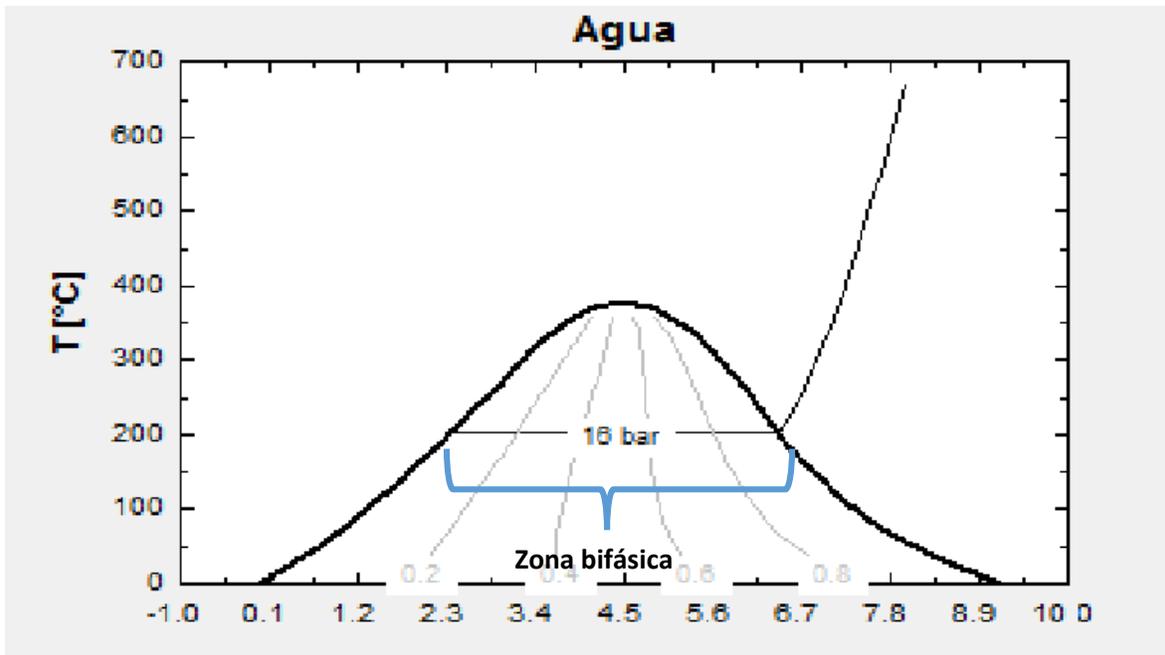


Figura 21 Diagrama T-S a una presión de 16 Bar

### 4.3) Angulo de incidencia

Para realizar estos cálculos utilizaremos la ecuación del modificador de ángulo de incidencia que ya hemos ajustado y a la ecuación de la eficiencia térmica podemos comenzar a realizar los cálculos del sistema en diferentes horarios en un mes seleccionado (enero) para esto necesitaremos el ángulo de incidencia, que dependerá de distintos

factores como ya se ha mencionado con anterioridad, esto para comprender el comportamiento en varias horas del día tomando como horas avilés de 7 a 17 horas.

Contamos con datos como un área de apertura de 10.37 m<sup>2</sup> y una irradiancia solar de 850 W/m<sup>2</sup>

Se utilizaran las siguientes ecuaciones:

$$\cos \varphi = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta$$

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284+n}{365} \right)$$

$$\omega = 15(\text{Hrs} - 12)$$

Y utilizaremos una latitud de 31.48 en base a la zona geográfica de la población seleccionada que sería en el estado de chihuahua y una declinación promedio del mes de 21.101°, así tendremos los siguientes resultados para distintas horas del día, la declinación fue tomada de una media del mes de Julio.

Tabla 27 Angulo de incidencia para diferentes horas del día en el mes de julio.

Julio						
Hora	$\delta$	$\lambda$	$\omega$	$\cos(\varphi)$	$\varphi$	
7	21.1014674	31.48	-75	0.39392886	66.8008134	
8	21.1014674	31.48	-60	0.58582109	54.1389828	
9	21.1014674	31.48	-45	0.75060268	41.3573893	
10	21.1014674	31.48	-30	0.87704404	28.7121822	
11	21.1014674	31.48	-15	0.9565284	16.9561173	
12	21.1014674	31.48	0	0.98363904	10.3785326	
13	21.1014674	31.48	15	0.9565284	16.9561173	
14	21.1014674	31.48	30	0.87704404	28.7121822	
15	21.1014674	31.48	45	0.75060268	41.3573893	
16	21.1014674	31.48	60	0.58582109	54.1389828	
17	21.1014674	31.48	75	0.39392886	66.8008134	

#### 4.4) Eficiencia global

Ahora aplicando la siguiente ecuación podemos obtener los valores de la potencia que el colector está recibiendo.

$$P_{Q,sol-colector} = A_c \cdot G \cdot \cos \varphi$$

Tabla 28 Potencia solar directa, a diferentes horas del día.

Hora	$\varphi$	Psol
7	66.8008134	3472.28594
8	54.1389828	5163.71997
9	41.3573893	6616.1873
10	28.7121822	7730.70468
11	16.9561173	8431.3196
12	10.3785326	8670.2863
13	16.9561173	8431.3196
14	28.7121822	7730.70468
15	41.3573893	6616.1873
16	54.1389828	5163.71997
17	66.8008134	3472.28594

Y ahora agregando las ecuaciones del modificador de ángulo de incidencia y la eficiencia térmica podemos calcular la eficiencia útil.

$$k(\varphi) = -1.0031x10^{-12}\varphi^7 + 2.7833x10^{-10}\varphi^6 - 3.0883x10^{-8}\varphi^5 + 1.7552x10^{-6}\varphi^4 - 0.0006\varphi^3 + 0.00086\varphi^2 - 0.00555\varphi + 1$$

$$\eta_{th} = 0.7 - 0.849 \left(\frac{\Delta T}{G}\right) - 0.003 \left(\frac{\Delta T}{G}\right)^2$$

$$P_{Q,colector-fluido} = A_c \cdot G \cdot \cos \varphi \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{th}$$

Tabla 29 Eficiencia global del equipo, para diferentes potencias solares directas a lo largo del día.

Psol	k( $\varphi$ )	$\eta$	Pflui	$\eta_{global}$
3472.28594	0.678155477	0.52367832	1233.13139	0.35513532
5163.71997	0.824817539	0.52367832	2230.41238	0.43193907
6616.1873	0.923778997	0.52367832	3200.66686	0.48376304
7730.70468	0.971074422	0.52367832	3931.30009	0.50853063
8431.3196	0.987607465	0.52367832	4360.58257	0.51718862

<b>8670.2863</b>	0.990417168	0.52367832	4496.93071	0.51866
<b>8431.3196</b>	0.987607465	0.52367832	4360.58257	0.51718862
<b>7730.70468</b>	0.971074422	0.52367832	3931.30009	0.50853063
<b>6616.1873</b>	0.923778997	0.52367832	3200.66686	0.48376304
<b>5163.71997</b>	0.824817539	0.52367832	2230.41238	0.43193907
<b>3472.28594</b>	0.678155477	0.52367832	1233.13139	0.35513532

Esto nos da una eficiencia media de:

$$\eta_{global} = 0.46$$

Ahora hay que realizar los cálculos para saber la longitud necesaria para la GDV

#### 4.5) Primera aproximación del número de colectores a partir de cálculos analíticos

En nuestra hora pico tenemos una potencia de 4.492kW esto nos daría un total de:

$$No\ de\ colectores: \frac{100kW}{4.496kW} = 22.24\ colectores$$

Puesto que hablamos de cantidades enteras vendrían siendo 23 colectores, siendo que cada colector tiene una longitud de tubería de 9.965 m tendríamos un total de 229.195 metros de longitud.

De los cuales tendríamos que:

$$No\ de\ colectores\ en\ zona\ de\ precalentado = \frac{22.57\ kW}{4.496\ kW} = 5\ colectores$$

Lo que nos daría una longitud de aproximadamente 50 metros, mientras que la zona bifásica vendría dada por:

$$No\ de\ colectores\ en\ la\ zona\ bifasica = \frac{77.39kW}{4.496kW} = 17.213\ colectores$$

Esto nos da una longitud de 171.681 m de longitud de tubería. El hecho de que la suma no den los 23 colectores dichos anteriormente se debe al redondeo que se hizo anteriormente.

## 4.6) Simulación

Estos primeros cálculos nos permiten tener condiciones aproximadas para realizar una simulación utilizando el software RELAP, que resulta muy práctico para estudios de GDV en CCP, lo que se procederá hacer es tomar a todos los colectores como una sola tubería dividiéndolo en varios volúmenes de control (VC) cuyos RELAP resolverá una vez que establecemos condiciones de entrada y salida, parámetros de operación y dimensiones de la tubería. Para la simulación trabajaremos con 2 casos en los que diferirán en los flujos másicos y las presiones de entrada.

### Procedimiento de la simulación

Para este procedimiento primero se crea una fuente (source) que es un espacio ficticio en el que establecemos nuestras condiciones de entrada como temperatura, presión, flujo másico, etc, así como también se creará un sumidero en la parte final (sink) siendo de igual manera un espacio ficticio donde colocaremos las condiciones de salida.

se tomara en cuenta las tuberías de los  $n$  colectores que utilizaremos como una sola, realizando la separación en la estructura del programa donde se colocaran las condiciones de entrada salida de cada colector, y realizar las uniones entre una tubería y la otra siendo el primer colector unido a la fuente y el último al sumidero.

Y posteriormente a esto generar una estructura de calor donde colocaremos condiciones como el calor incidente sobre las tuberías así como la eficiencia de estos.

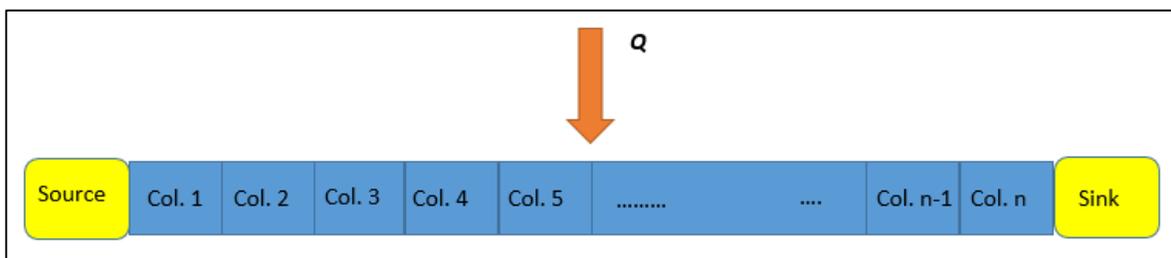


Figura 22 Representación de la unión de las tuberías de un número  $n$  de colectores con calor incidiendo sobre estos para simulación en RELAP

Para que los cálculos en la simulación sean más exacto se requiere un enmallado de cada uno de los colectores en un número determinado de volúmenes de control (VC).

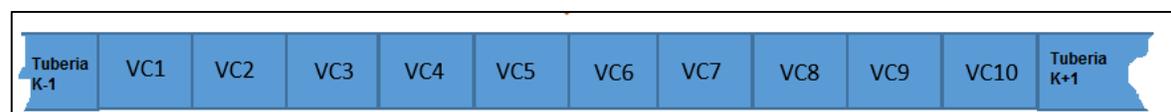


Figura 23 Estructura de 10 volúmenes de control para una tubería en el colector.

Como podemos observar en la figura 23 se utilizó una tubería k de las n tuberías que hay, y esta fue dividida en 10 volúmenes de control, en el que habrá que especificar datos como el diámetro interno de la tubería o el área según se decida, así como la longitud del VC, en este caso se dividiría la longitud de la tubería entre 10.

Una vez realizado correctamente el proceso de enmallado se puede proceder a correr la simulación para así poder extraer los datos que necesitamos.

## Parámetros para la simulación

### Medidas del colector

Tabla 30 Medidas del colector de la propuesta 1 para ingresar a la simulación.

Parámetros	Valor
Longitud (m)	9.965
Apertura (m)	1.04
Diámetro externo (mm)	22
Diámetro interno (mm)	18

### Condiciones de operación

Tabla 31 Condiciones de operación de la propuesta 1.

Parámetros	valor
Calor incidente (W)	857.9595
Eficiencia	0.53
Temperatura de entrada (K)	343
Presión de salida (Mpa)	1.2 (Caso 1)
	1.4 (Caso 2)
Flujo másico (kg/s)	0.04 (Caso 1)
	0.1666667 (Caso 2)

Tabla 32 Condiciones de malla de la propuesta 1.

Parámetros	Valor
Numero de colectores	25

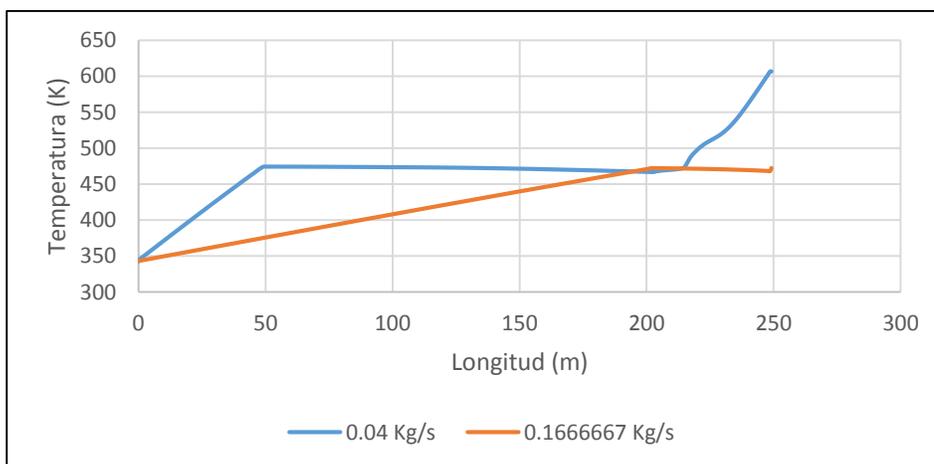
Numero de VC	250
Tamaño del VC (m)	0.9965
Longitud del campo (m)	249.125

Con los datos anteriores se procede a realizar la simulación en la que podemos obtener los datos como temperatura, calidad, presión a lo largo de la longitud de la tubería, en las primeras pruebas se utilizaron 23 colectores como nos habían dado en los cálculos analíticas pero pudimos observar que no alcanzábamos las condiciones de sobrecalentado, sino más bien se quedaba en la zona bifásica por eso se decidió introducir 2 colectores más para observar cual es el número de colectores más indicado para nuestro campo, otra decisión que se tomo es la de considerar un precalentado en la temperatura del fluido de entrada para disminuir la energía necesaria en la zona líquida y entrar más rápido a la zona bifásica.

### Resultados de la propuesta 1

Una vez corriendo el software extrajimos los resultados para su análisis y se procede a realizar la siguiente gráfica de longitud-temperatura en la que efectivamente alcanzamos las condiciones de sobrecalentado a una longitud aproximadamente de 221 metros.

En la gráfica 9 se tomaron los datos de dos simulaciones una con el caudal propuesto por fabricante y el otro que fue calculado analíticamente para tomar la decisión de cual nos conviene.



Gráfica 9 Perfiles de temperatura para las dos opciones de flujos másicos

Se puede observar que con el flujo recomendado no logra condiciones de sobrecalentado, sino más bien se queda en la zona bifásica, mientras que el flujo que habíamos calculado si logra buenas condiciones de sobrecalentado.

En base a esto podemos decidir que se trabajara con un flujo másico de 0.04 kg/s, nos damos cuenta de que se alcanza una temperatura de aproximadamente de 606 K (333°C) que son menores a nuestra temperatura máxima de diseño de 350°C. Así que los datos importantes a tomar en cuenta serian:

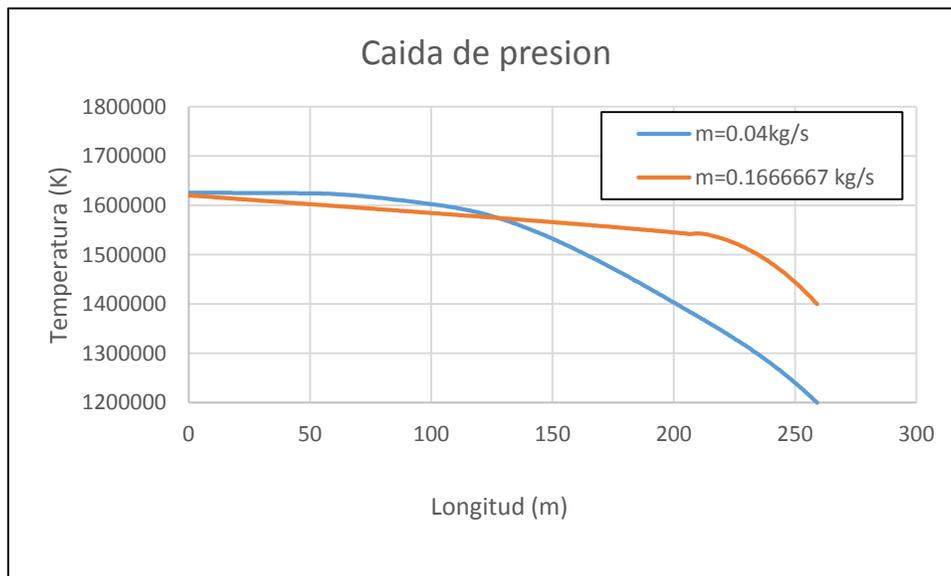
Temperatura de salida= 606 K

Presión de entrada= 1.59 Mpa

Caída de presión  $\Delta P=0.39724$  Mpa

Flujo másico  $m=0.04$ kg/s

En la siguiente grafica se muestra la caída de presión considerando los dos flujos, y notamos que las pérdidas son más grandes en el flujo que va a menor razón.



Gráfica 10 Caída de presión en la propuesta 1

Con base a los datos de simulación podemos concluir los parámetros que tendrían nuestro campo de concentración solar.

Tabla 33 Resultados y características del campo solar para la propuesta 1.

Parámetro	Valor
Eficiencia térmica	$0.7 - 0.849 \left(\frac{\Delta T}{G}\right) - 0.003 \left(\frac{\Delta T}{G}\right)^2$
Numero de colectores	25
Modificador de ángulo de incidencia	$-1.0031 \times 10^{-12} \varphi^7 + 2.7833 \times 10^{-10} \varphi^6 - 3.0883 \times 10^{-8} \varphi^5 + 1.7552 \times 10^{-6} \varphi^4 - 0.0006 \varphi^3 + 0.00086 \varphi^2 - 0.00555 \varphi + 1$
Diámetro externo	22
Diámetro interno	18
Longitud total del campo	249.125
Área total de apertura	259.25

Considerando las temperaturas de entrada y salida podemos realizar el cálculo de las entalpías.

Tabla 34 Datos importantes de entrada y salida del campo simulado para la propuesta 1.

	Temperatura (K)	Presion (MPa)	Entalpia (kJ/kg)
Entrada	343	1.59	293.7
Salida	606	1.2	3116

Por lo tanto la potencia térmica sería de:

$$P_{ter} = \left(0,04 \frac{kg}{s}\right) (3116 - 293.7) \frac{kJ}{kg} = 112.892 kW$$

Se consiguen rebasar ligeramente los 100 kW deseados.

#### 4.7) Simulación para la propuesta 2

Como ya hemos mencionado con anterioridad esta segunda propuesta es un sistema que contiene dos fuentes de generación, por un lado generación de energía térmica por el sistema de concentración solar y por otro generación de energía eléctrica por medio de células fotovoltaicas, para analizar este sistema se realizara una simulación como se hizo

con el equipo anterior, con la ventaja de que la mayoría de las características son prácticamente las mismas con la diferencia de la eficiencia.

#### *Medidas del colector*

*Tabla 35 Medidas del colector de la propuesta 2 para ingresar a la simulación.*

Parámetros	Valor
Longitud (m)	9.965
Apertura (m)	1.04
Diámetro externo (mm)	22
Diámetro interno (mm)	18

#### *Condiciones de operación*

Estas condiciones no tendrán la gran variación, como se consideran la misma temperatura de saturación y la misma temperatura ambiente la diferencial de temperatura será la misma lo que nos dará como resultado una eficiencia de 37% a diferencia de los 52% del caso anterior, ya que en el caso anterior notamos que el flujo másico más recomendable era el de 0.04 kg/s no hay necesidad de hacer dos simulaciones en esta ocasión.

*Tabla 36 Condiciones de operación de la propuesta 2.*

Parámetros	valor
Calor incidente (W)	857.9595
Eficiencia	0.37
Temperatura de entrada (K)	343
Presión de salida (MPa)	1.15 Mpa
Flujo másico	0.04

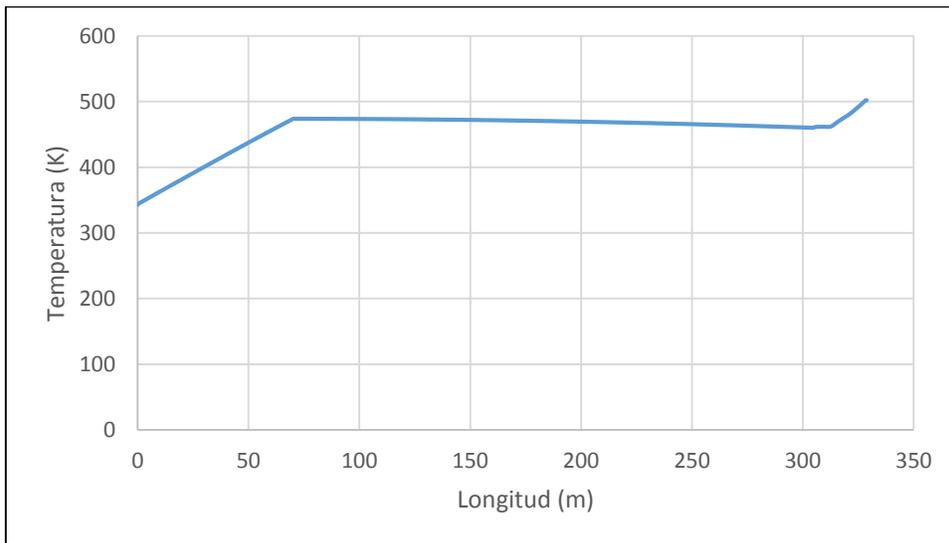
#### *Malla*

Al a ver menor eficiencia en este caso se necesitaron 9 colectores más para obtener unas condiciones de sobrecalentado, posteriormente se hará el análisis si no es contraproducente dependiendo de la generación de energía eléctrica por células.

Tabla 37 Condiciones de malla de la propuesta 2.

Parámetros	Valor
Numero de colectores	33
Numero de VC	340
Tamaño del VC (m)	0.9965
Longitud del campo (m)	338.81

En la siguiente grafica se pueden observar el perfil de temperatura a lo largo de la tubería.



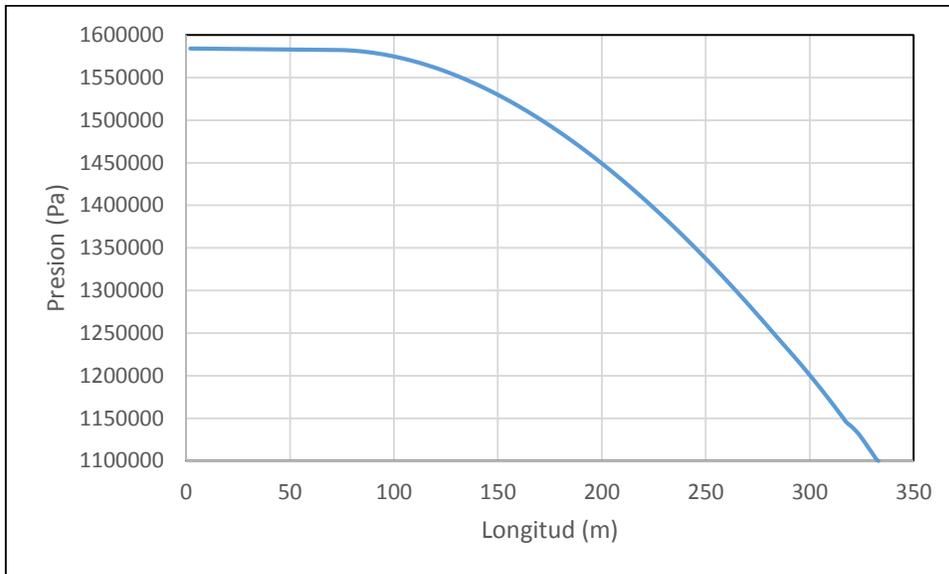
Grafica 11 Perfil de temperatura para la propuesta 2

El sobrecalentamiento se presenta aproximadamente a una longitud de 322 metros, con lo que podemos darnos cuenta que se necesitan 33 colectores para el sobrecalentado.

La caída de presión total sería de

$$\Delta P = 0.48414 \text{ MPa}$$

Con el siguiente comportamiento:



Grafica 12 Caída de presión de la propuesta 2

### Cálculos fotovoltaicos

Al considerar las condiciones del sistema de célula eléctrica podemos realizar los siguientes cálculos:

Primeramente veremos cuanta radiación incide sobre el colector que posteriormente será concentrada, se toma  $1000 \text{ W/m}^2$  porque son bajo las que se hicieron las pruebas del equipo

$$P_{sol} = \left(1000 \frac{W}{m^2}\right) (10.37m^2) = 10370W$$

Considerando las corrientes y voltajes máximos de igual manera tenemos:

$$P_{ele} = (12,5A)(80V) = 1000 W$$

Lo que nos dará como resultado una eficiencia de:

$$\eta_{ele} = \frac{1000W}{10370W} \times 100\% = 9.964\%$$

Con esto sabemos que para nuestro colector habrá una potencia de:

$$P_{ele} = (G)(Ac)(\eta_{ele}) = \left(850 \frac{W}{m^2}\right) (10.37m^2)(0.0964) = 850W$$

Ahora esto multiplicado por el número de colectores para tener el aproximado de generación de energía eléctrica.

$$P_{ele/total} = (850W)(33) = 28050 W = \mathbf{28.05kW}$$

Con base a los datos de simulación podemos concluir los parámetros que tendrían nuestro campo de concentración solar.

*Tabla 38 Resultados y características del campo solar para la propuesta 2.*

Parámetro	Valor
Eficiencia térmica	$\eta_{th} = 0.548 - 0.849 \left(\frac{\Delta T}{G}\right) - 0.003 \left(\frac{\Delta T}{G}\right)^2$
Numero de colectores	33
Modificador de ángulo de incidencia	$k(\varphi) = -6.636x10^{-13}\varphi^7 - 1.68458x10^{-10}\varphi^6 - 1.676673x10^{-8}\varphi^5 + 8.429932x10^{-7}\varphi^4 - 2.440597x10^{-5}\varphi^3 + 3.654647x10^{-4}\varphi^2 - 2.854772x10^{-3}\varphi + 1$
Diámetro externo (mm)	22
Diámetro interno (mm)	18
Longitud total del campo (m)	328.845
Área total de apertura (m)	342.21

Considerando las temperaturas de entrada y salida podemos realizar el cálculo de las entalpías.

*Tabla 39 Datos importantes de entrada y salida del campo simulado para la propuesta 2.*

	Temperatura (K)	Presion (MPa)	Entalpia (kJ/kg)
Entrada	343	1.584	293.7
Salida	502	1.1	2890

Por lo tanto la potencia térmica sería de:

$$P_{ter} = \left(0,04 \frac{kg}{s}\right) (2890 - 293.7) \frac{kJ}{kg} = \mathbf{107.452 kW}$$

Podemos notar que en total tenemos 107.452 kW de energía térmica y 28 kW de energía eléctrica, muchas más que en el sistema anterior, pero la desventaja vendría dada a que se tendrían que incorporar 8 colectores más que podría ser contraproducente.

### 5) Análisis de costos

Para esta sección tomaremos en cuenta aquella información que nos proporciona la empresa, de los diferentes costos que se requieren para los concentradores solares.

Esa información está incluidas en las siguientes tablas.

#### Retorno de inversión

*Tabla 40 Retorno de inversión para un sistema de 1000 metros cuadrados proporcionados por la empresa*

Tamaño del sistema	Valor simulado (120°) kWh/m <sup>2</sup> /año	Valor total kWh/año/sistema	Inversion	Gas/petróleo precio	Ahorro de energía anual	Retorno de inversión - años
1000m <sup>2</sup>	1 292,3	1 292 300	\$ 391 750	\$30/MWh	\$ 38 769	10,1
1000m <sup>2</sup>	1 292,3	1 292 300	\$ 391 750	\$40/MWh	\$ 51 692	7,6
1000m <sup>2</sup>	1 292,3	1 292 300	\$ 391 750	\$50/MWh	\$ 64 615	6,1
1000m <sup>2</sup>	1 292,3	1 292 300	\$ 391 750	\$60/MWh	\$ 77 538	5,1
1000m <sup>2</sup>	1 292,3	1 292 300	\$ 391 750	\$70/MWh	\$ 90 461	4,3

*Tabla 41 Retorno de inversión para un sistema de 100 metros cuadrados proporcionados por la empresa*

Tamaño del sistema	Valor simulado (120°) kWh/m <sup>2</sup> /año	Valor total kWh/año/sistema	Inversion	Gas/petróleo precio	Ahorro de energía anual	Retorno de inversión - años
100m <sup>2</sup>	1 292,3	129 230	\$ 59 680	\$30/MWh	\$ 3876,9	15,4
100m <sup>2</sup>	1 292,3	129 230	\$ 59 680	\$40/MWh	\$ 5169,2	11,5
100m <sup>2</sup>	1 292,3	129 230	\$ 59 680	\$50/MWh	\$ 6461,5	9,2
100m <sup>2</sup>	1 292,3	129 230	\$ 59 680	\$60/MWh	\$ 7753,8	7,7
100m <sup>2</sup>	1 292,3	129 230	\$ 59 680	\$70/MWh	\$ 9046,1	6,6

La empresa nos toma valores para campos de 100 y 1000 metros cuadrado, estos mismos precios tendrían que ser tomados para aproximarlos a lo que sería para nuestro campo de 259.25.

Por lo tanto los valores adaptados a nuestro sistema quedan como:

Tabla 42 aproximación del retorno de inversión de nuestro sistema en la propuesta 1

Tamaño del sistema	Valor total kWh/año/sistema	Inversión	Gas/petroleo precio	Ahorro de energia anual	Retorno de inversión-años
259.25 m <sup>2</sup>	335028	\$ 118438	30/MWh	\$ 10050	14.5
259.25 m <sup>2</sup>	335028	\$ 118438	40/MWh	\$ 13401.15	10.81
259.25 m <sup>2</sup>	335028	\$118438	50/MWh	\$ 16751.44	8.65
259.25 m <sup>2</sup>	335028	\$ 118438	60/MWh	\$ 20101.73	7.24
259.25 m <sup>2</sup>	335028	\$ 118438	70/MWh	\$ 23452.01	6.2

Estas solo serían aproximaciones en base a los datos que ya nos proporcionan, pero podrían servir para realizar unas primeras cotizaciones.

### Mantenencia

La mantenimiento de un sistema solar es mínima. El costo es 1% de la cuota final/año.

Tareas típicas de mantenimiento;

- Lubricación
- Revisar los tornillos y apretar los mismos si es necesario
- Inspección de los Concentradores Solares

### Conclusiones

Este proyecto puede dividirse en varias etapas y por tanto diferentes conclusiones para cada una de ellas, entre las etapas que podemos resaltar son la selección de población y la selección a una propuesta en este caso las dos propuestas de concentradores solares como también la propuesta del uso de biogás de nopal para generación de energía eléctrica entonces podemos realizar las siguientes conclusiones:

-El hecho de que en nuestro país existan estados con una gran necesidad de energía eléctrica, nos está prácticamente obligando a buscar otras alternativas a las ya utilizadas con fósiles, pero para comenzar una implementación es necesario de empezar a enlistar una serie de consideraciones. Ya que en el actual trabajo se toman como fuentes alternas de energía la solar y la de biogás el factor climático es un tema primordial ya que se necesita una buena cantidad de radiación solar para tener una eficiencia rentable para la generación de energía, mientras que el nopal también necesita varias condiciones de clima y suelo que con el que afortunadamente México cuenta, con la depuración que hicimos vimos estados

y seleccionar estados potenciales que en lo que a mi consideración personal se tendría que elegir entre Chiapas y Chihuahua al ser estados que cuentan con buenas condiciones climáticas y municipios con altas carencias.

-El uso de concentradores cilindro parabólico para la generación directa de vapor es una propuesta muy aceptable pero la verdadera conclusión aquí sería la selección del equipo, si se utiliza un sistema netamente de concentrador o un sistema PVT que combina energía fotovoltaica y energía térmica. Para tomar estas decisiones se realizaron cálculos tanto analíticos como en simulación en base a los datos de las fichas técnicas de cada equipo y se notó una diferencia considerable entre el número de colectores entre un equipo y otro siendo de 11 colectores debido a la baja eficiencia óptica del sistema PVT pero en compensación a esto hay también una gran cantidad de energía eléctrica generada, en lo que a mi opinión personal es contraproducente ya que si con los 22 colectores generamos la potencia requerida no hay necesidad de aumentar tanto el campo, ya que esto generaría más gastos iniciales así como también más espacio de terreno. Un sistema PVT sería una opción más factible en una industria ya que la energía que se requiere para el calentamiento de agua es mucho menor a la necesaria para un cambio de fase por lo que no se necesitarían tantos colectores y la ganancia de energía eléctrica sería un extra por eso para el presente proyecto recomiendo el sistema puramente de concentración solar cuyo sería combinado con otra fuente de energía explicada más adelante.

-Al ser el principal tema de interés el uso de concentradores cilindro parabólico no se profundizó tanto el tema del biogás del nopal, sino más bien se propuso como una fuente alterna o secundaria, para cuando no se pudiera operar, pero se hace una opción atractiva ya que las condiciones de suelo y clima en México son apropiadas y el hecho de que existen micro turbinas que aceptan el gas natural y es una fuente limpia, esta opción me parece muy aceptable para aquellos días con poco sol.

### **Recomendaciones para trabajos futuros**

-Como primera recomendación para trabajos futuros sería la selección más específica de una población, en el presente trabajo se realizó un análisis a nivel municipal, pero esto podría llevarse a zonas todavía más específicas de diferentes municipios para comenzar con la implementación de un proyecto de este tipo.

-Se recomienda también considerar diferentes eficiencias para cada colector, en el presente trabajo se tomó en cuenta un diferencial de temperatura que corresponde a la zona bifásica, esto no es completamente real, ya que en la zona de precalentado se tendría una mayor eficiencia por ser temperaturas menores, mientras que en la zona de precalentado una menor por ser temperaturas más altas, en algún trabajo futuro sería apropiado considerar la eficiencia en cada colector, probablemente en la zona de mezcla no sea necesario ya que las temperaturas se mantienen constantes pero en lo demás sería conveniente trabajar con distintas eficiencias.

-Otro aspecto a considerar es que las pruebas se hicieron para un mes de verano en este caso Julio, se recomendaría a quien retomara este proyecto considerar pruebas en tal vez no los 12 meses pero si por lo menos las 4 estaciones del año.

-Ir más allá del campo solar y meterse en el ciclo termodinámico completo, hacer un estudio de las bomba que se utilizara para la circulación del agua, la turbina de vapor a utilizar, el consumo de ambas, así como el transformador de corriente directa a alterna necesario para los hogares.

-En lo que respecto al nopal, sustentar más esa información con base a cantidades necesarios para producir el biogás, el proceso que utilizara el biodigestor, como se realizara el almacenamiento de este y analizar que bloque de potencia seria el más adecuado para recibir el biogás.

### **Fuentes de información**

- CONACYT, *Obtienen biogás y electricidad con biomasa de nopal*, Mexico Df (2015)  
<http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/723-desarrolla-empresa-mexicana-biogas-y-electricidad-a-partir-de-la-biomasa-de-nopal>
- Elías Castells Xavier, (2012) , *Biomasa y bioenergía*, Editorial Díaz de santos
- Sildeshare, <http://es.slideshare.net/juanajuarezperez3/manual-de-cultivo-de-nopal-para-verdura>

- Veoverde, (2010). <https://www.veoverde.com/2010/12/todas-las-respuestas-sobre-el-nopal-un-nuevo-biocombustible/>
- Veoverde, <https://www.veoverde.com/2010/12/el-nopal-un-biocombustible-desconocido/>.
- Sáenz Carmen, *Utilización agroindustrial del nopal*,
- Inafed, <http://www.inafed.gob.mx/>
- Zarza E., (2003). Generación directa de vapor con colectores cilindro parabólicos. Proyecto Direct Solar Steam (DISS). Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla España
- Jacobo Saynes Bartolo., (2014). Estudio termo-hidráulico de una fila tipo de captadores cilindro-parabólicos (CCP) para generación directa de vapor de una central eléctrica Termosolar, Tesis de maestría en ciencias, Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico
- John A. Duffie, William A. Beckman ( ), *Solar Engineering of thermal Processes* cuarta edición, Wiley, 12-17.351-362.
- Lluís Prat Viñas, Ramón Bragós Bardia, *Circuitos y fundamentos electrónicos Fundamentos de la electrónica*, Edicions de la UPC, S.L., 1999, 332-333