

Diseño de un concentrador solar circular con reflector secundario trapezoidal.

Eduardo Venegas-Reyes

Cátedras CONACYT, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango, Victoria 147 Nte., Durango, Dgo, C.P. 34000, México,
Teléfono (618) 811-3572, eduardo.venegas@cimav.edu.mx.

Juan A. Maturino-Quiñones

Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Durango, Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, Durango, Dgo, C.P. 34080, México,
Teléfono (618) 829-0900, tonyqnes@gmail.com.

Ignacio R. Martín-Domínguez

Sistemas solares térmicos, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango, Victoria 147 Nte., Durango, Dgo, C.P. 34000, México,
Teléfono (618) 811-3572, Ignacio.martin@cimav.edu.mx.

Resumen

One use of parabolic trough technology is the generation of solar process heat, however a great challenge to achieve widespread use of this technology in industrial processes is the reduction of manufacturing costs. A circular profile can be approximated to a parabola in the paraxial region and may be less expensive their manufacture than a parabolic profile. Circular profile can introduce errors due to optical aberrations and profile errors inherent in its manufacturing, so the use of secondary reflectors that minimize these errors is required. This work presents the mechanical design of a circular trough solar collector with a trapezoidal secondary reflector, an análisis of efforts was conducted using wind velocity of Durango city.

Keywords: Circular trough collector, Solar concentrator, Solar process heat.

1. Introducción

Ante la situación climática mundial se requiere un cambio energético sustentable ya que la principal fuente de energía en el mundo proviene de los combustibles fósiles que son los principales generadores de gases de efecto invernadero. Por otro lado México cuenta con un recurso solar importante lo que lo puede posicionar como líder mundial en energías renovables. Por otro lado la industria consume buena parte de la energía primaria en la generación de calor para sus procesos. En algunos casos se requieren temperaturas que están entre 90 °C y 250 °C (Kalogirou, 2003), dicho rango no lo pueden cubrir los

colectores planos. Para cubrir estos rangos se cuenta con colectores de tubos evacuados y Colectores Parabólico Compuestos (CPCs), y para mayores temperaturas los Colectores de Canal Parabólico (CCPs) y colectores de Fresnel Lineal (CFLs). Existen concentradores solares que usan reflectores secundarios para mejorar el factor de intercepción de estos. En Se han hecho desarrollos de algunos concentradores solares con segundas etapas de reflexión; Chemisana et al. (2011) se presenta el desarrollo de un concentrador solar compuesto por un lente de fresnel, un CPC como concentrador secundario y un módulo térmico fotovoltaico, este último es analizado y caracterizado eléctrica y

térmicamente; en Singh et al. (1999) se desarrolló un concentrador lineal de fresnel, se evaluó la cantidad de calor absorbido por el aceite usado con un número de 10, 15 y 20 espejos. El absorbedor se rodeó con espejos en tres lados con una forma trapezoidal. Zheng et al. (2014) desarrolló un concentrador solar cilíndrico el cual está compuesto por una lente de fresnel arqueada y un espejo de fresnel y un reflector secundario. Mediante trazado de rayos se obtuvo la eficiencia de colección del concentrador en función del error de seguimiento y del ángulo de incidencia longitudinal se llevó a cabo una comparación con resultados experimentales.

Existen otros trabajos donde se aplica la técnica de trazado de rayos; en Mills (1995) se presenta una comparación de diferentes configuraciones de segundas etapas de concentración, Cheng et al. (2014) se hace una estimación de la irradiancia concentrada con reflectores secundarios de no imagen.

En Rodríguez Sánchez y Rosengarten (2015) se presenta el análisis teórico de un canal parabólico con un reflector secundario plano para incrementar la razón de concentración (hasta un 80%), se llevó a cabo un trazado de rayos para validar las ecuaciones desarrolladas. Se obtuvieron curvas de energía recibida en el receptor en función del ángulo de desalineación para diferentes reflectividades así como la razón de concentración local en el receptor.

En este trabajo se llevó a cabo el diseño mecánico de un concentrador de canal circular con reflector secundario trapezoidal propuesto en Venegas et al. (2015), donde se evaluó mediante trazado de rayos el desempeño óptico del CCC en función de los errores de pendiente y de desalineación del colector. Adicionalmente se realizó un análisis de esfuerzo y deformación de la estructura

del colector. En el diseño se consideró que dentro de la región paraxial una sección circular se puede aproximar a una sección parabólica. La ventaja que presenta esta aproximación es que mediante un proceso de rolado se le puede dar forma circular a un perfil tubular cuadrado, lo que puede reducir los costos de manufactura de las costillas, que son elementos de gran importancia en el desempeño óptico de un CCP. Se propone el uso de un reflector secundario trapezoidal para reducir las pérdidas ópticas debidas a errores de superficie, de perfil y de pendiente del reflector primario.

2. Metodología

La tabla 1 muestra las dimensiones más relevantes del colector. Para el diseño mecánico se tomaron en cuenta los materiales disponibles en el mercado mexicano y los esfuerzos que la estructura debe soportar. Se llevó a cabo un análisis de elemento finito para determinar las deformaciones de la estructura del colector. En el diseño del concentrador solar cilíndrico se tomaron en cuenta como requerimientos su modularidad, con una estructura fuerte y liviana, y usando materiales disponibles en el mercado nacional para tener un bajo costo.

Tabla. 1: Datos del concentrador usados en el trazado de rayos

Variable	Cantidad	Unidad
Radio del	1.432	m
Distancia focal	0.716	m
Abertura	1.21	m
Perímetro de la	1.22	m
Diámetro del	0.0254	m
Abertura del	0.08	m
Longitud	5.0	m

En la figura 1 se muestra el trazado de rayos del colector donde en Venegas et al. (2016) se

determinó una eficiencia de colección de 0.847.

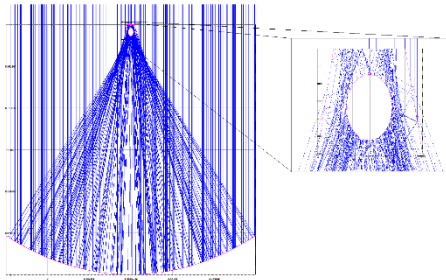


Figura 1. Trazado de rayos del concentrador solar.

La teoría de falla de máxima energía de distorsión se presenta en materiales dúctiles que son capaces de absorber una cierta cantidad de energía antes de sufrir una falla o romperse. Esta teoría está basada en los estudios realizados por Von Mises a una esfera maciza idealmente homogénea e isotrópica e hidrostáticamente comprimida y realizándole así el estudio del esfuerzo que actuaban sobre él, que conllevaría posteriormente a plantear las ecuaciones.

La falla ocurrirá en la parte compleja cuando la energía de distorsión por volumen unitario exceda una prueba de tensión simple en la falla.

La energía de deformación se compone de la energía de deformación (cambio de volumen) y de la distorsión.

$$\mu = \mu_v + \mu_d (\mu_{volumen} + \mu_{distorsion}) \quad (1)$$

La falla ocurre si la energía de distorsión por el volumen unitario excede la correspondencia a una prueba de tensión unitaria en la falla.

Los esfuerzos principales se componen de esfuerzos que producen cambio de volumen y distorsión.

$$\sigma'_1 = \sigma'_1 + \sigma'_{1v} \quad (2)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_1 + \sigma'_{2v} \quad (3)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_1 + \sigma'_{3v} \quad (4)$$

El dibujo del concentrador solar se llevó a cabo en el software comercial SolidWorks, en la figura 2 se muestra el dibujo CAD del concentrador solar. En la estructura se propuso el perfil cuadrado de acero A36 de 1", el perfil circular tiene un radio de 1.58 m. Se propuso que las costillas circulares, los travesaños y un perfil rectangular se unan mediante soldadura. Una de las consideraciones a tomar en cuenta en el diseño del concentrador es que resista el esfuerzo producido por el viento de la zona de Durango sin presentar deformaciones que afecten su desempeño óptico y térmico. En la ciudad de Durango el histórico de la velocidad de viento máxima llega a 41.60 km/h (<http://clima.inifap.gob.mx/>) para tener un margen de seguridad se propuso que el concentrador se someta a una velocidad máxima de viento de 50 km/h.



Figura 2. Concentrador solar de canal circular.

En el análisis se tomó en cuenta la seguridad de la estructura principal ante el efecto de las fuerzas que se generan por las presiones

(empujes o succiones) producidas por el viento sobre las superficies de la construcción expuestas al mismo y que son transmitidas al sistema estructural. La revisión debe considerar la acción estática del viento y la dinámica cuando la estructura sea sensible a estos efectos.

En el diseño de estructuras sometidas a la acción de viento se tomaron en cuenta aquellos de los efectos siguientes que puedan ser importantes en cada caso:

- a) Empujes y succiones estáticos;
- b) Fuerzas dinámicas paralelas y transversales al flujo principal, causadas por turbulencia;
- c) Vibraciones transversales al flujo causadas por vórtices alternantes; y
- d) Inestabilidad Aero elástica.

Para el análisis de viento se consideraron tres posiciones (ver figura 3); en la primer posición el viento incide sobre la parte frontal de la abertura del colector, en la segunda posición el viento incide de manera lateral sobre el colector y en la tercera posición el viento incide en la parte posterior del colector solar. Se seleccionaron las posiciones 1 y 3 por que estas son las que representan una mayor área de contacto con el viento y por lo tanto un mayor esfuerzo sobre la estructura y la posición 2 porque se pueden observar los efectos que tiene el viento sobre el perfil circular.

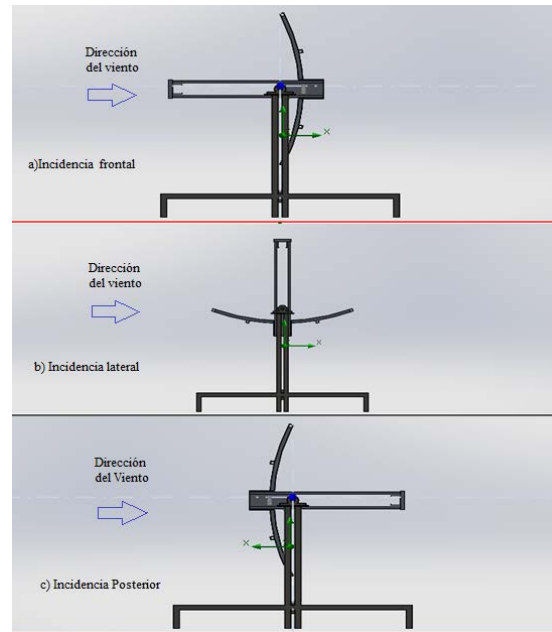
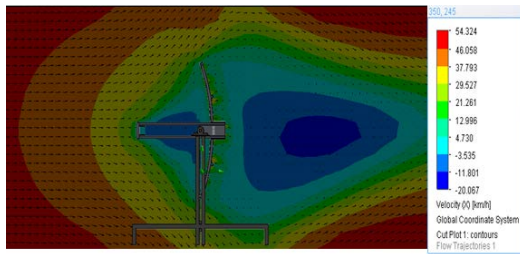


Figura 3. Posiciones en las que se realizó el análisis de viento.

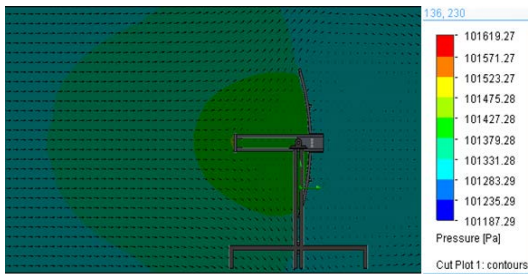
3. Resultados

En el análisis se consideró aire como fluido y la variable fue la velocidad del viento sobre el vector x. Los resultados del análisis de viento se exportaron a un análisis estático en forma de presión sobre la estructura.

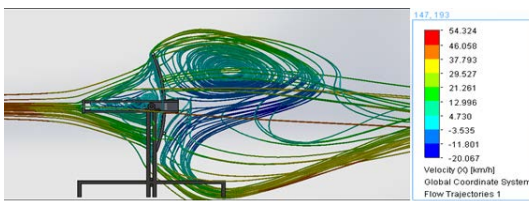
En la figura 4 a) se puede observar la distribución de velocidades donde se puede observar que la velocidad cerca de la superficie del colector disminuye a valores cercanos a 0 km/h. En la figura 4 b) se muestra la distribución de la presión en pascuales donde se observa que la presión es mayor en la parte frontal del perfil del colector, aproximadamente 101.42 kPa, y en la figura 4 c) se pueden ver las trayectorias principales del flujo de aire donde se puede ver que se forman vórtices en la parte posterior del colector.



a)



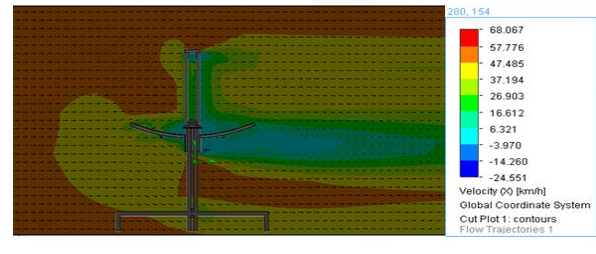
b)



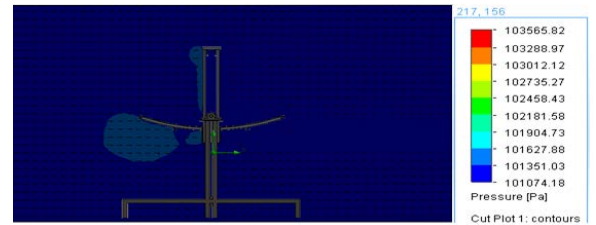
c)

Figura 4. Posición frontal: a) Distribución de velocidades, b) Distribución de presiones y c) Trayectorias del flujo de aire.

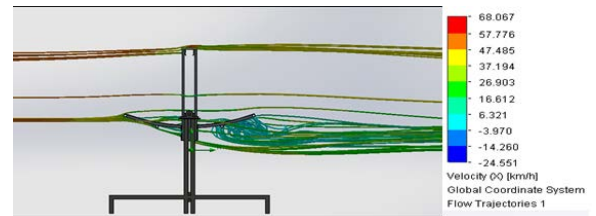
En la figura 5 a) se observa el perfil de velocidades cuando este incide en la cara posterior del colector, se observa que en el frente la velocidad disminuye a aproximadamente 26.9 km/h. En la figura 5 b) se puede ver que la distribución de presión casi no tiene variaciones, las mayores presiones que se registran son de aproximadamente 101.62 kPa, y en la figura 5 c) se observa que la mayor turbulencia está en el perfil inferior derecho del colector.



a)



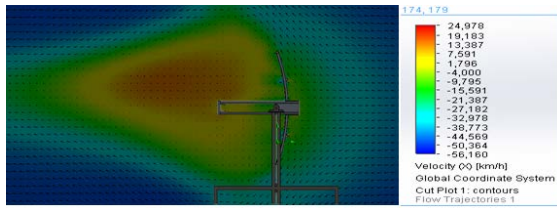
b)



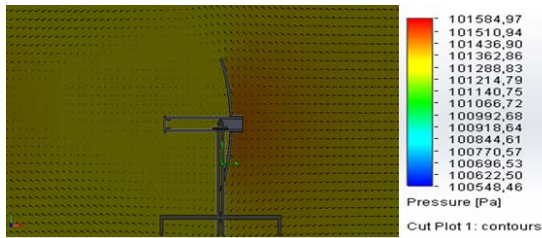
c)

Figura 5. Posición lateral: a) Distribución de velocidades, b) Distribución de presiones y c) Trayectorias del flujo de aire.

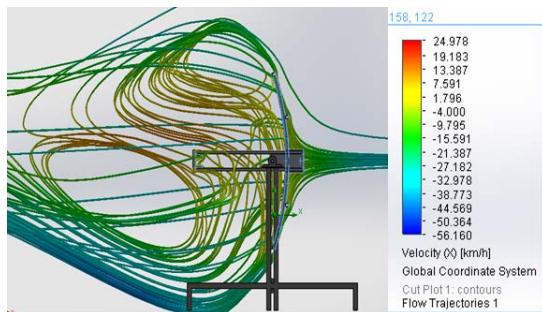
En la figura 6 a) se observa el perfil de velocidades cuando este incide en la cara posterior del colector, se observa que en el frente de impacto la velocidad disminuye a aproximadamente 27.18 km/h, mientras en la figura 6 b) se observa una distribución de presión uniforme sobre la cara posterior del colector de aproximadamente 101.43 kPa, finalmente en la figura 6 c) se pueden ver los vórtices que se forman en la cara frontal del colector.



a)



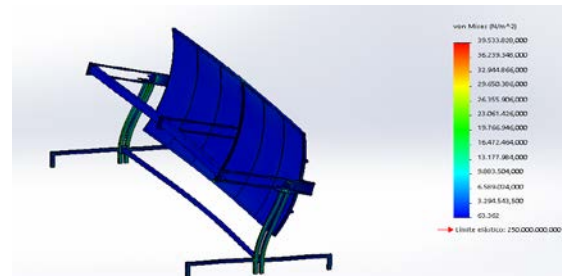
b)



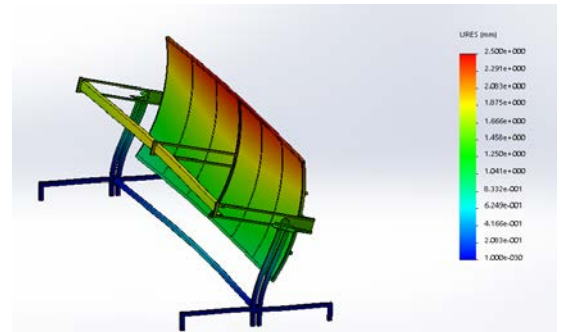
c)

Figura 6. Posición posterior: a) Distribución de velocidades, b) Distribución de presiones y c) Trayectorias del flujo de aire.

En la figura 7 a) se muestra la tensión de Von Mises para la posición en la que el viento impacta de frente al colector donde la tensión de Von Mises es de $13.177 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ que es menor a la tensión máxima que puede soportar el material. En la figura 7 b) se puede ver que la deformación máxima es de 2.5 mm.



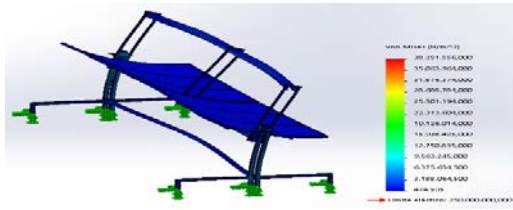
a)



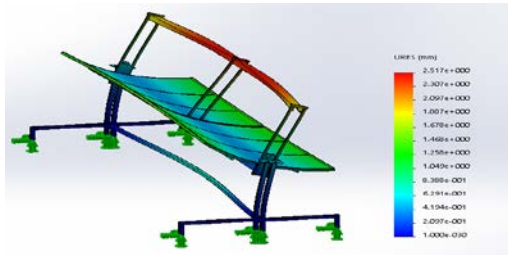
b)

Figura 7. Posición frontal: a) Tensión de Von Mises, b) Desplazamiento de deformación del colector.

En la figura 8 a) se muestra la tensión de Von Mises para la posición en la que el viento impacta de en la parte lateral del colector donde la tensión de Von Mises es de $9.563 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ que es menor a la tensión máxima que puede soportar el material. En la figura 8 b) se puede ver que la deformación máxima es de 2.517 mm.



a)



b)

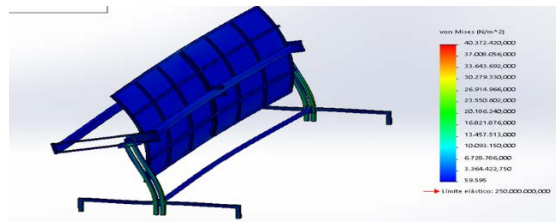
Figura 8. Posición lateral: a) Tensión de Von Mises, b) Desplazamiento de deformación del colector.

En la figura 9 a) se muestra la tensión de Von Mises para la posición en la que el viento impacta de en la cara posterior del colector donde la tensión de Von Mises es de $13.457 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ que es menor a la tensión máxima que puede soportar el material. En la figura 9 b) se puede ver que la deformación máxima es de 2.572 mm.

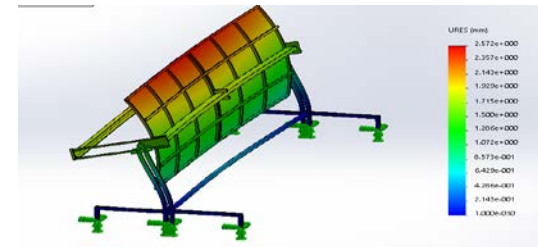
En la Tabla 2 se presentan las variables para las tres posiciones que se evaluaron, para el material seleccionado el esfuerzo máximo de Von Mises es de $40.372 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, los esfuerzos presentados en la estructura para las tres posiciones estuvieron por debajo del esfuerzo máximo del material.

Tabla 2. Datos de esfuerzos y deformación para las tres posiciones evaluadas.

Posición de incidencia	Presión [kPa]	Tensión de Von Mises [N/m^2]	Deformación máxima [mm]
Frontal	101.42	13.177×10^6	2.500
Lateral	101.62	9.563×10^6	2.517
Posterior	101.43	13.457×10^6	2.572



a)



b)

Figura 10. Posición posterior: a) Tensión de Von Mises, b) Desplazamiento de deformación del colector.

4. Conclusiones

El análisis de esfuerzos de Von Mises mostró que las tensiones que se presentaron para las posiciones frontal y posterior fueron mayores que en la posición lateral, sin embargo estos estuvieron por debajo del esfuerzo máximo que puede soportar el material. La deformación máxima fue en promedio de 2.53 mm aproximadamente, lo que asegura que el colector no va a tener deformaciones

significativas que afecten el desempeño óptico del colector.

Agradecimientos

A los técnicos académicos del área de Energía del CIMAV unidad Durango M.C. Jorge A. Escobedo-Bretado y al M.C. Mario Nájera Trejo por el apoyo brindado en la simulación de esfuerzos mecánicos. Se agradece el apoyo económico recibido por parte del: Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto: P13 "Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora" Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

Referencias

Chemisana D., Ibáñez M., Rosell J.I., 2011. Characterization of a photovoltaic-thermal module for Fresnel linear concentrator. *Energy Conversion and Management*. 52, 3234–3240.

Cheng Q., Chai J., Zhou Z., Song J., Su Y., 2014. Tailored non-imaging secondary reflectors designed for solar concentration systems. *Solar Energy*. 110, 160–167.

<http://clima.inifap.gob.mx/>

Kalogirou S. A. The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, 76 (2003) 337–361.

Mills D. R., 1995. Two-stage solar collectors approaching maximal concentration. *Solar Energy*. 54, 41-47.

Rodriguez-Sanchez D., Rosengarten G., 2015. Improving the concentration ratio of

parabolic troughs using a second-stage flat mirror. *Applied Energy*. 159, 620–632.

Singh P. L., Ganesan S., Yadav G. C. Performance study of a linear Fresnel concentrating solar device. *Renewable Energy* 18 (1999) 409-416.

Venegas-Reyes E., Martín Domínguez I. R., Rodríguez Muños N. A., Sosa-Montemayor F., Dehesa-Carrasco U., Jaramillo Saqlgado O. A. Solicitud de registro de patente MX/a/2015/013665, Concentrador solar de canal cilíndrico con reflector secundario trapezoidal 2015.

Zheng H., Feng Ch., Su Y., Dai J., Ma X., 2014. Design and experimental analysis of a cylindrical compound Fresnel solar concentrator. *Solar Energy*. 107, 26–37

La Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

al proyecto

“Diseño de un concentrador solar de canal cilíndrico con receptor secundario trapecoidal”

Presentado por

Eduardo Venegas Reyes

En el marco del VI Congreso Internacional Sobre las Energías Renovables.
Oaxaca de Juárez, Oaxaca, a 28 de Octubre de 2016



Mtro. Fidencio Julián Luna Santiago
Rector