

# **Aerogenerador de eje vertical para aplicaciones In-situ Análisis y modelado de un aerogenerador de eje vertical**

**M.C Barrera Valdés J. G, M.I. Jurado Pérez F., M.I. Razo Hernández J. R., M.C.  
González Cabrera N.**

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

**jobarrera@itesi.edu.mx fejurado@itesi.edu.mx jorazo@itesi.edu.mx  
nestor.gonzalez@itesi.edu.mx**

## **Resumen**

En el presente artículo se presenta el análisis y modelado de un aerogenerador de eje vertical desarrollado en el instituto tecnológico superior de Irapuato (ITESI), del estado de Guanajuato. La validación del modelo matemático en cuanto al cálculo de energía generada, se realiza mediante el programa VISSIM EMBEDDED 5.0, por su versatilidad en simulaciones referentes a las energías renovables, esto en respuesta a las necesidades de generación de energía eólica que se cuenta en el campus de Irapuato Guanajuato.

**Palabras clave:** Aerogenerador eje vertical, fuentes alternas de energía, generación distribuida, modelado de A.G

## **Abstract**

This paper presents the analysis and modeling of a vertical axis wind turbine developed at the Technological Institute of Irapuato higher (ITESI), the state of Guanajuato. The validation of the mathematical model in the calculation of energy generated is done by the program VISSIM EMBEDDED 5.0, for its versatility in simulations concerning renewable energy, this in response to the needs of wind generation that has on campus Irapuato Guanajuato.

**Key words:** Vertical axis wind turbine, alternative energy sources, embedded generation, modeling AG

## **Introducción**

En la actualidad se presenta la necesidad de utilizar energías renovables para el funcionamiento de dispositivos electromecánicos debido a la creciente demanda de energía a la red eléctrica y a los altos niveles de contaminantes producidos por la generación mediante combustibles fósiles. Existe una modalidad de generación de eléctrica conocida como generación In-Situ, generación dispersa, o más cotidianamente conocida como generación distribuida. La cual se basa en generar energía eléctrica lo más cerca posible al lugar de consumo, es por eso que una opción importante a considerar es la generación de energía

eólica en sistemas de distribución, ya que su principal característica es que se origina partir de una fuente renovable y limpia, misma que ha tenido un gran auge en la última década a nivel mundial.

Hoy en día existen países como Dinamarca, Portugal, España que poseen un alto porcentaje de su capacidad instalada con energía eólica, sin embargo el uso de energía eólica en México aún es joven puesto que existen algunas zonas con área de oportunidad en el desarrollo de estos sistemas como se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Potencial de Generación eólica en México

Zona	Potencial para Generar en MW
El sur del Istmo de Tehuantepec	2,000-3,000
La Península de Baja California	1,500-2,500
La Península de Yucatán	1,000-2000
Zacatecas	800-1,500
La Costa del pacifico	1,000-1,500
El Golfo de México	1,000-1,500

En 1994, México puso en marcha su primer parque eólico localizado en el ejido de La Venta, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. El parque eólico La Venta, construido como proyecto prototipo, fue el primero en su tipo en nuestro país y en América Latina y cuenta con siete aerogeneradores de 225 kW, que han operado con un factor de planta de alrededor de 40%.

En enero de 2007, entró en operación comercial el segundo parque eólico, La Venta II, localizado también en el Istmo de Tehuantepec. Se trata de un proyecto de obra pública financiada, adjudicado en el año 2005 a un consorcio español. Este nuevo parque eólico, cuenta con 98 aerogeneradores de 850 KW y una capacidad total instalada de 83.3 MW.

Con esta adicción, la capacidad eólica actual es de 85.48 MW de los 48,259.59 MW de la capacidad total instalada por CFE.

## Desarrollo

### Ventajas de los aerogeneradores de eje vertical

- No necesitan torre, por lo que la instalación y mantenimiento de los sistemas de generación es más fácil
- No necesitan mecanismo de orientación para orientarse respecto al viento.
- No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por lo tanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

## Desventajas de los aerogeneradores de eje vertical

- Al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja.
- Baja eficiencia.
- No son de arranque automático, requieren conexión a la red para poder arrancar utilizando el generador como motor
- Algunos modelos requieren cables tensores

## Modelo del viento

En un sistema de conversión de energía eólica es necesario modelar adecuadamente el comportamiento espacial y temporal del viento. Especialmente importante es conocer cómo afectarán ráfagas y cambios rápidos en rampa al comportamiento dinámico de la máquina y su repercusión en la calidad de la energía entregada a la red. También es interesante analizar un modelado de las variaciones aleatorias que sufre continuamente el flujo de aire. Con estas cuatro componentes se consigue un modelo razonablemente flexible para el estudio de las perturbaciones debidas al viento. El viento es una masa de aire en movimiento. Al considerar la energía cinética asociada obtenemos la relación en la ecuación 1.

$$E_{cin} = \frac{1}{2} * m_{aire} * v^2 \quad (1)$$

Donde:

**E<sub>cin</sub>**: Energía cinética del viento en [J].

**m<sub>aire</sub>**: Masa del aire en [kg].

**v**: Velocidad del viento en [m/s]

Tomando en cuenta que la potencia es la derivada de la energía con respecto al tiempo, es posible deducir finalmente la relación entre la potencia contenida en una masa de aire y la velocidad a la cual esta se mueve, relación expresada en la Ecuación (1).

De la ecuación anterior se puede definir la potencia del viento como:

$$P[W] = \frac{E_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} * \frac{dm_{aire}}{dt} * v^2 \quad (2)$$

Dónde:

**P**: potencia del viento en [W]

La potencia es definida respecto a la cantidad de aire (masa) que circula por un determinado sector del espacio. A su vez la masa puede ser expresada por:

$$m_{aire} [Kg] = \rho \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] * V [m^3] \quad (3)$$

Dónde:

**p**: densidad del aire en Kg/m<sup>3</sup>

**V**: volumen de aire [m<sup>3</sup>]

Al definir la variación de masa en el tiempo conlleva una variación del volumen de aire que circula por el mismo sector:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho * \frac{dV_{aire}}{dt} \quad (4)$$

A su vez el flujo está definido como:

$$F\left[\frac{m^3}{s}\right] = \frac{dV_{aire}}{dt} \quad (5)$$

Dónde:

**F**: flujo de aire m<sup>3</sup>/s

En la Figura 1 se aprecia, el volumen de aire que llega al área de barrido del rotor en un determinado tiempo.

$$\frac{dV_{aire}}{dt} = A[m^2] * v\left[\frac{m}{s}\right] \quad (6)$$

A: sección ortogonal al vector de velocidad del aire en [m<sup>2</sup>].

Sustituyendo la ecuación en la ecuación se obtiene:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho * \frac{dV_{aire}}{dt} \quad (7)$$

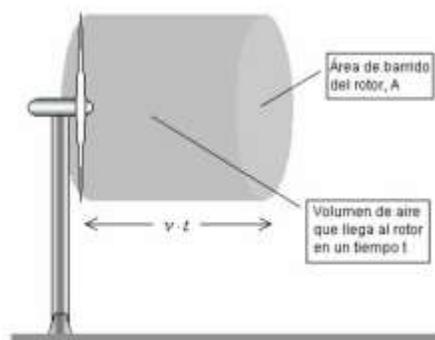


Figura 1 Barrido de aire en el rotor de un Aerogenerador

Luego, sustituyendo la Ecuación (7) en 2, se obtiene la ecuación que define el comportamiento de la potencia de una masa de aire (viento) que se desplaza con una cierta velocidad por unidad de superficie:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (8)$$

Dónde:

**A** : superficie [m<sup>2</sup>]

**p** : densidad del aire [kg/ m<sup>3</sup>]

$v$  : velocidad del viento [m/s]

Si bien  $P$  no corresponde a la potencia total que se podrá extraer por medio de la turbina, resulta ser proporcional a ésta.

De esta forma se explica porque la potencia mecánica de una turbina eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento, de ahí la importancia de conocer el comportamiento del viento en cualquier zona donde se evalúe instalar un aerogenerador. Cabe indicar que el análisis anterior corresponde a turbinas eólicas del tipo hélice de eje horizontal, que es el usado en la mayoría de los casos.

Finalmente, la potencia que será transmitida al aspa, corresponde a un porcentaje de la potencia del viento, y dependerá de diversos factores constructivos de la misma, los que influyen en el denominado coeficiente de potencia, definido como  $CP$ , correspondiente al cociente entre la potencia extraída por la turbina y la potencia del viento. Los valores promedio para este coeficiente en este tipo de máquinas son del orden de 40% como se mencionó en la ley de Betz la cual se demuestra que  $CP$  tiene un límite teórico de 59%.

De tal manera que la potencia real extraída por la turbina se define en la Ecuación (9):

$$P_T = C_p P \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (9)$$

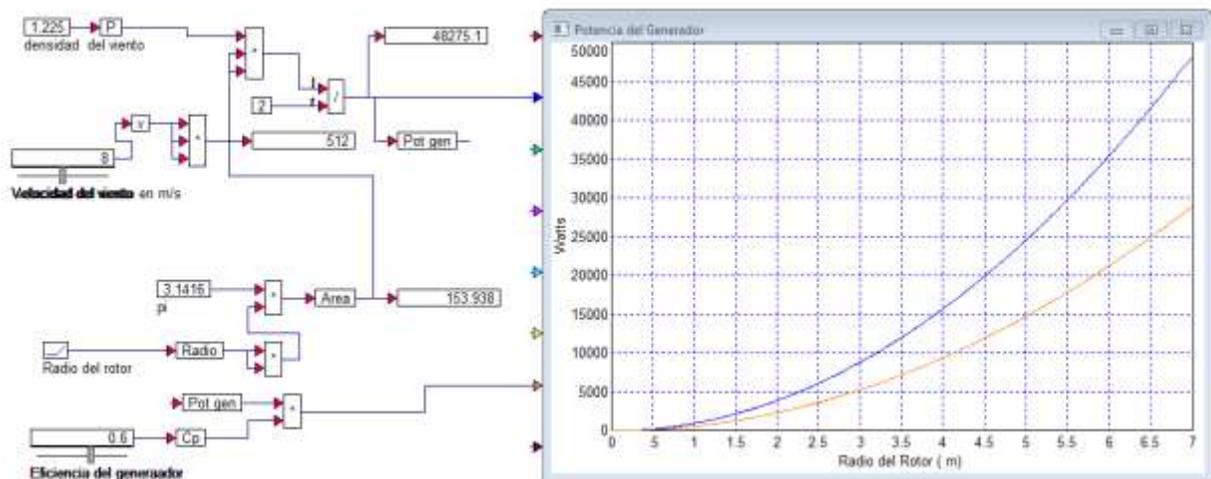


Figura 2 Potencia vs Radio del Generador.

En la Figura 2, Se puede apreciar que la potencia crece proporcionalmente con el cubo de la velocidad y al cuadrado respecto al radio del aerogenerador (superficie).

### Modelado del generador de imanes permanentes

Este tipo de generador está compuesto por 2 discos que se encuentran situados en el exterior formando el rotor. En el interior se encuentra el estator. Los imanes permanentes están situados en la superficie de los discos rotóricos, de forma que crean un flujo cuya dirección es paralela al eje de giro, como se ilustra en la Figura 3.

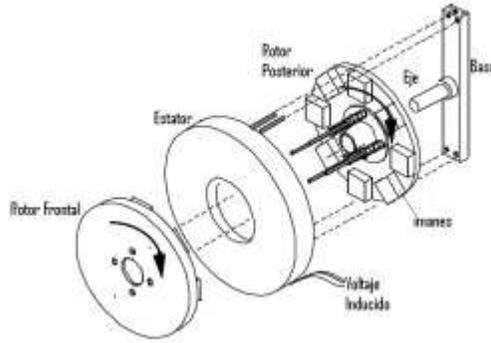
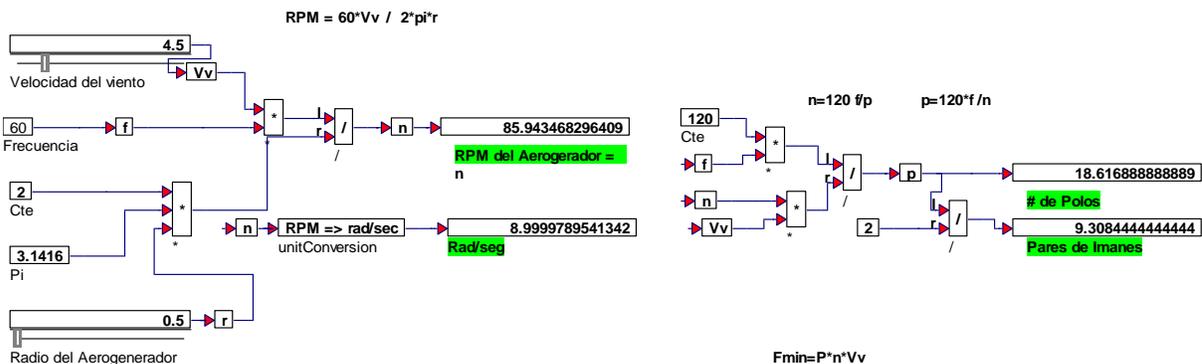


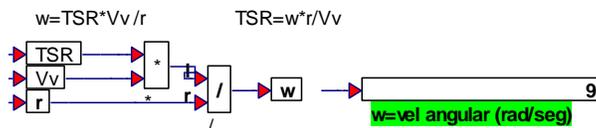
Figura 3. Rotor del Generador de Imanes Permanentes de flujo axial.

Esta configuración de dos entrehierros tiene la ventaja de cancelar las fuerzas longitudinales sobre el estator, además esta topología minimiza la inductancia de dispersión. Además al utilizar un estator sin ranuras, conseguimos eliminar el par de ranura y las vibraciones provocadas por él. El hecho de no usar hierro disminuye las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault. Es importante especificar que los imanes deben ir situados uno al lado de otro de forma magnéticamente opuesta, es decir, N-S-N-S y así sucesivamente. De la misma manera en el disco opuesto deben ir situados al contrario que en el anterior para que en uno vaya el flujo en un sentido y en el otro vaya en el sentido contrario, uniéndose ambos flujos en el estator, donde se encuentra el devanado de tal forma que el flujo magnético pasa de un rotor a otro a través de las bobinas del estator mientras el eje del rotor gira y de esta manera se induce una tensión eléctrica en las terminales de las bobinas.

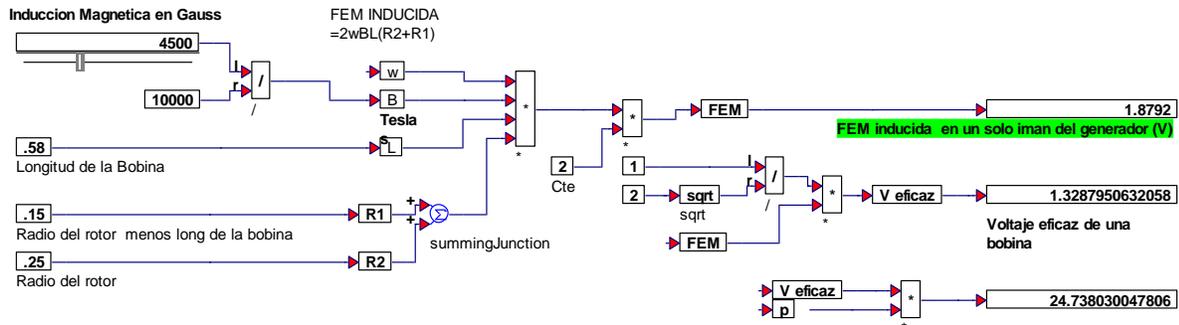
1.- el cálculo del número de polos, pares de Imanes y bobinas.



2.- Calculo de la velocidad angular del generador.



3.- Fuerza electromotriz inducida en las bobinas.



### Turbina eólica de eje vertical (VAWT).

Los componentes principales que intervienen en el funcionamiento de una turbina eólica son: el rotor con sus paletas o aspas, la caja de engranajes, el generador y el poste o torre donde se sostiene la turbina.

Inicialmente el proceso de generación de electricidad el viento o energía cinética golpea las palas o aspas del rotor haciendo que el eje donde se sostiene rote, convirtiendo así la energía del viento en energía mecánica. Esta energía es tomada por la caja de engranajes la cual cumple la función de captar la energía mecánica de baja rotación, y aumentarla en energía mecánica de alta rotación antes de ser canalizada al generador. El generador capta la energía mecánica desde la caja de engranajes y la convierte finalmente en electricidad.

Debido a que este tipo de generador tiene un eje de rotación perpendicular el flujo de aire que se acerca, su modelo aerodinámico resulta ser más complejo que el de los convencionales aerogeneradores de eje horizontal. Las principales desventajas de los VAWT es que implica un alto ángulo de ataque y la estela que viene en la cuchilla de la parte contra el viento desde el eje. En comparación con el rotor Savonius el rotor Darrieus generalmente trabaja con la velocidad de punta relativamente alta lo que hace atractivo a los aerogeneradores, sin embargo no son de arranque automático y requieren excitación externa.

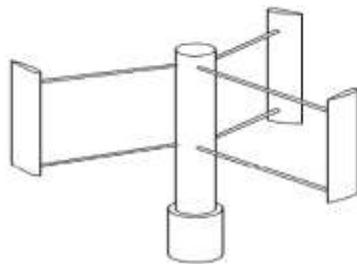


Figura 4. Turbina eólica de Eje vertical (VAWT).

Si se representa la hoja recta Darrieus tipo VAWT en un plano de dos dimensiones como se aprecia en la Figura 5 se distingue con mayor claridad las características aerodinámicas de este tipo de aerogenerador.

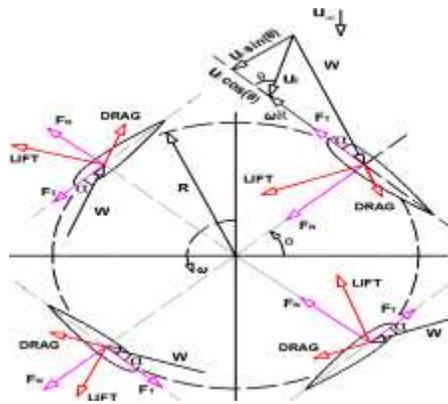


Figura 5. Características aerodinámicas de un VAWT.

Una turbina eólica de tipo Savonius considerando un coeficiente de potencia de 0.18.

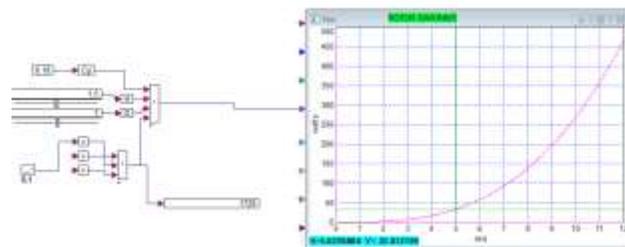


Figura 6. Velocidad y flujo en las palas de un Aerogenerador vertical.

## Resultados

A continuación se muestran los resultados del análisis de la simulación del pequeño sistema:

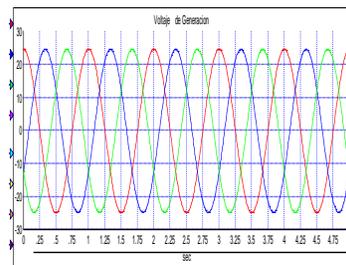


Figura 7. Voltaje trifásico ideal esperado para el Aerogenerador

La Figura 7 muestra el voltaje trifásico ideal del aerogenerador analizado y la Figura 8 muestra el voltaje trifásico real obtenido con el generador de Imanes permanentes propuesto.

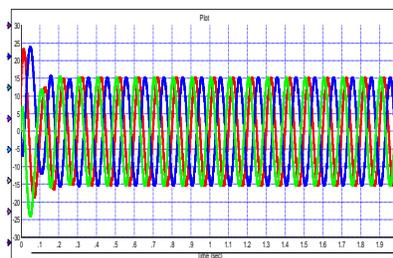


Figura 8. Voltaje trifásico real obtenido con el generador de Imanes permanentes propuesto.

Como se puede observar en la Figura 8 el voltaje real es muy similar al ideal por lo que podemos garantizar su perfecto funcionamiento en condiciones reales esto se muestra en la Figura 9 que muestra la corriente de arranque del generador.

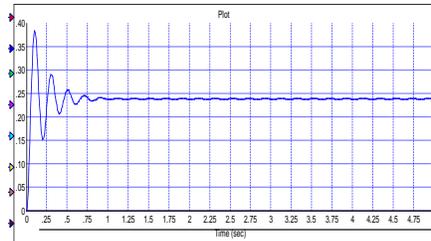


Figura 9. Corriente de arranque del generador.

La corriente de arranque del aerogenerador mostrada en la Figura 9 es realmente mínima y soportaría los diversos cambios de velocidad de viento que tengamos en un caso real.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos expresan la factibilidad de este tipo de aerogeneradores para instalarse en In-Situ y así disminuir la demanda eléctrica, sin embargo aún existen algunos aspectos por analizar como son:

- Implementación de levitación magnética en los discos del aerogenerador para suavizar el par de arranque.
- Adecuación del freno dinámico en el rotor del generador como protección del equipo en zonas de vientos críticos.
- Desarrollo de controladores de potencia para mejorar la calidad de energía suministrada mediante el aerogenerador presentado.
- Interconexión del proyecto a la red de suministro comercial de energía y a cargas menores a 20 kw

## Referencias

J.C. Antezana, "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical". Tesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile, 2004.

A.Pinedo et al. "Modelo teórico de los sistemas de generación eléctrica para las turbinas eólicas de eje vertical". Investigación de física. Universidad Nacional de Trujillo Perú, 2007.

A. Abarazua, "Aspectos de Diseño de Generadores Síncronos de flujo axial para aplicación de aerogeneradores". Tesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile, 2012.

R. Wallace et al. "Diseño de un generador de flujo axial con imanes permanentes para aplicaciones eólicas. Revista Facultad de Ingeniería, enero-junio. Universidad de Tarapaca Arica, Chile, 2000.

Comisión nacional para el ahorro de energía "Generación distribuida y fuentes alternas de energía", última modificación año 2005 <http://www.conae.gob.mx>

F. Vázquez et al. "Control Multivariable: Aplicación al control de un aerogenerador. X Simposio CEA de Ingeniería de Control. Universidad de Córdoba España, 2012.

E. González et al. "Modelado y Análisis de interacción de un Generador Eólico para Control Multivariable. Universidad Autónoma de Zacatecas. Congreso Anual 2009.

J. Mejía et al. "Propuesta metodológica para el diseño de las aspas de turbinas de viento de Eje Horizontal". Instituto de Energía. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 2005.

R. Medina. "Cálculo y diseño de la Pala (Heecamani) de un Aerogenerador". Sección de estudios de posgrado e investigación. Instituto Politécnico Nacional. México D.F., 2011.

## **Diseño de un desalinizador solar para las zonas costeras en el estado de Tabasco**

*Técnicas ambientales para la sustentabilidad*

**Arias-Santos N.N. \*; Aguilar-May B.\*\* y Jiménez Flores L.\*\*\***

Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta

**[nnas\\_050484@hotmail.com](mailto:nas_050484@hotmail.com)**

### **Resumen**

En el sur de Tabasco, la escasez de agua está tomando una importancia relevante, esta deriva principalmente a la contaminación por agua salada que presenta el agua de los pozos cerca de las zonas costeras, así como aquellas zonas rurales en donde es más presencial dicha escasez. En el presente trabajo, se exponen los resultados preliminares, de dos prototipos de desalinizador, implementando la generación de una tecnología sustentable, que permita el desarrollo de un estudio en las principales sitios que disponen de recursos de agua salada, realizando el proceso por evaporación con energía solar; tomando en consideración los materiales, la incidencias de los rayos solares y las zonas de mejor captación de estos. Se han probado hasta el momento, obteniendo valores económicos y ecológicamente compatibles con la zona. En el prototipo preliminar A esta hecho a base de cristal blanco y el prototipo preliminar B esta hecho de cristal ahumado, ambos con una base refractante de aluminio, se obtuvieron resultados de eficiencia de ambos desalinizadores, siendo favorables en las mediciones de los parámetros fisicoquímicos, tales como oxígeno disuelto (OD), pH, sólidos suspendidos, temperatura y conductividad. Obteniendo valores de conductividad de 7.1  $\mu\text{S}$ , pH 7.2, sólidos suspendido mínimos y oxígeno disuelto de 3.56 mg/l.

**Palabras clave:** Desalinizador de agua de mar, evaporación, energía solar, eficiencia.

### **Abstract**