

# **APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LAS CORRIENTES DE LAS MAREAS DE LOS CANALES ENTRE LOS CAYOS DEL NORTE DEL MUNICIPIO DE MARTÍ, PARA GENERAR ELECTRICIDAD. PROPUESTA DE PROYECTO**

Por Dr. C. José Luis Sánchez Avila\*  
\*Cubasolar Delegación Matanzas.

## **Resumen**

Mediante estudios preliminares se conocieron las potencialidades de los canales entre cayos e islotes en el norte del municipio de Martí, fundamentalmente la posibilidad del aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes que producen las mareas en los siguientes canales Canal de La Manuí; Canal de Los Barcos; Canal Juan Claro y Canal Juan Clarito. Se expusieron en el trabajo las potencialidades preliminares de los dos primeros: el canal de Los Barcos y el canal de La Manuí, que son los que tienen más fácil acceso y tienen un estudio precedente. Se espera en una segunda oportunidad, de tenerse financiamiento disponible, realizar el estudio de los canales Juan Claro y Juan Clarito.

Con la ejecución de este proyecto se pudiera lograr tener en Matanzas un sistema de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables (aprovechándose las mareas), además de tenerse a mano mayor nivel de información, educación y cultura general en estas tecnologías; a la vez se puede lograr una repercusión económica considerable, pues generaría energía limpia evitándose el uso de combustibles fósiles no renovables y contaminadores del medioambiente. Sería el primer paso en Cuba para la generalización futura del uso de las corrientes de las mareas y ríos para generar electricidad a partir de la energía cinética de las corrientes hidráulicas

*Palabras clave: Energía de las mareas, turbinas hidráulicas, energía eléctrica.*

---

# **HARNESSING THE KINETIC ENERGY OF THE TIDAL CURRENTS OF THE CHANNELS BETWEEN THE NORTHERN KEYS OF THE MUNICIPALITY OF MARTÍ, TO GENERATE ELECTRICITY. PROJECT PROPOSAL**

## **Abstract**

Preliminary studies revealed the potential of the channels between cays and islets in the north of the municipality of Martí, mainly the possibility of taking advantage of the kinetic energy of the currents produced by the tides in the following channels: La Manuí Canal; The Boat Channel; Juan Claro Channel, Juan Clarito Channel. The preliminary potentialities of the first two channels were exposed in the work: the Los Barcos channel and the La Manuí channel, which are those that have the easiest access today and are the ones that have a previous study, are expected in a second opportunity. If financing is available, carry out the study of the Juan Claro and Juan Clarito channels.

With the execution of this project, it would be possible to have a system of electricity generation in Matanzas using renewable sources (taking advantage of the tides), in addition to having at hand a higher level of information, education and general culture in this type of technology, to the Perhaps a considerable economic impact can be achieved, since it would generate clean energy avoiding the use of non-renewable fossil fuels and environmental pollutants. It would be the first step in Cuba for the future generalization of the use of tidal currents and rivers to generate electricity from the kinetic energy of hydraulic currents.

*Keywords: Wind speed, XyGrib tool, astronomical tide, Wxtide32.*

---

## Descripción

La necesidad de mitigar el efecto invernadero y el aumento de los precios del petróleo, como resultado de la disminución de las reservas mundiales y de la inseguridad en su suministro estable, debido a conflictos políticos en regiones productoras, han motivado la búsqueda de alternativas a los carburantes fósiles. Las fuentes de energía renovables se encuentran entre los potenciales sustitutos de los combustibles y fuentes de energía basados en los hidrocarburos tradicionales, y como una de las maneras más factibles de lograr la independencia energética de la nación con respecto a las fuentes externas de combustible (hidrocarburos importados).

La provincia de Matanzas está enclavada en la parte occidental de la República de Cuba (ver Fig. 1) y posee una población de alrededor de 700 000 habitantes.

El mapa descriptivo de Cuba con la zona donde se aplicará el proyecto es el siguiente:

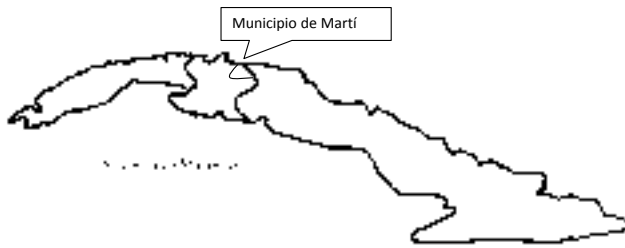


Fig. 1. Mapa de Cuba con la provincia de Matanzas y el municipio Martí.

Para el uso sostenible de las fuentes de energía renovables es indispensable que exista en la provincia de Matanzas un polígono demostrativo de las principales fuentes de energía renovable, que demuestre que su utilización no contamina el medioambiente. En ese contexto, y a partir de la edificación asignada para la delegación de Cubasolar en Matanzas, se ha diseñado un proyecto que permita la divulgación, capacitación y consulta en función de tener en dicho polígono un Centro generador del desarrollo de las actividades encaminadas al conocimiento y aprovechamiento racional de las fuentes renovables de energía; esto es, la energía solar en sus diferentes manifestaciones: la biomasa, el biogás, la energía hidráulica, del mar y la eólica, la solar fotovoltaica, la solar térmica, así como su aprovechamiento en la solución de los problemas económicos y sociales de la provincia y del país.

## Objetivo principal

El objetivo principal es, en un primer momento, estudiar y calcular las potencialidades de los dos canales entre los cayos principales del norte de Martí, y en un segundo momento la factibilidad de adquisición de varias turbinas hidráulicas para generar energía eléctrica aprovechándose la energía cinética de las corrientes de agua que producen las mareas en dichos canales.

## Objetivo secundario

Como objetivo secundario se proyecta contribuir a la red nacional con energía eléctrica limpia, y demostrar que

es factible el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes de agua que producen las mareas para obtener electricidad; además, para que sirva a la capacitación, desarrollo y divulgación de este tipo de energía renovable.

## Alcance

El alcance del proyecto es local, pero va a permitir la divulgación, capacitación y el desarrollo de futuros proyectos para la aplicación de la energía renovable de las mareas y algunos ríos en la provincia de Matanzas, y posteriormente generalizarlo al resto del país, recordando que la Isla de Cuba se encuentra rodeada de cayos e islotes, cuyos canales intermedios son factibles de utilizar durante los cambios de marea, sin contaminar el medio ambiente.

## Contenido general

Se ha estudiado, en el norte del municipio de Martí, la posibilidad del aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes que producen las mareas en los canales siguientes:

- Canal de La Manuít
- Canal de Los Barcos
- Canal Juan Claro
- Canal Juan Clarito

Primero se estudiarían los dos primeros canales, el de Los Barcos y el de La Manuít, que son los que hoy tienen más fácil acceso y tienen un estudio preliminar realizado hace ya más de 20 años; y en una segunda oportunidad, de tenerse financiamiento disponible, realizar el estudio de los canales Juan Claro y Juan Clarito.

Al inicio se adquirirían los instrumentos para realizar las mediciones de profundidad, velocidad y temperatura del agua, todos ellos portátiles y mediante baterías recargables, así como una computadora de mesa, laptop y periféricos para el tratamiento de las mediciones y cálculo posterior del estimado del flujo, la energía máxima y mínima posible a aprovechar, y la determinación de la ubicación y distribución futura de las turbinas hidráulicas posibles a instalar. También en esta primera etapa se adquirirían los equipos de buceo necesarios para el estudio de los perfiles y el fondo de los canales, para evitar accidentes y deslizamientos que pongan en peligro las turbinas de generación, así como evitar afectaciones a la navegación y circulación de naves por esos canales; este módulo debe venir con sistema de protección contra tiburones, no tan comunes en esa zona pero posibles de encontrar. Un escáner de profundidad sería ideal para determinar los perfiles del fondo marino.

También es imprescindible la adquisición de un Van o camioneta todoterreno que utilice combustible diésel, y que además tenga la posibilidad de consumir también biodiésel, biocombustible que va a empezar a producirse en fincas de ese municipio mediante un proyecto europeo con el municipio de Martí y con la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey del municipio de Perico, en la propia provincia de Matanzas. También el polígono de energía renovable (Delegación de Cubasolar en Matanzas) debe tener en un futuro, mediante proyectos, una pequeña

planta de generación de biodiésel con aceites desechables de los hoteles e industrias de la provincia. Este transporte es imprescindible para el traslado de los instrumentos de medición y computadoras, y también para poder acceder a la zona objeto de estudio, que es bastante remota, sin carreteras asfaltadas y sin existencia de transporte local hacia esa zona; es por esto último que también se necesita que el Van posea *winch* en la parte delantera y trasera del vehículo, ya que en el período lluvioso esa zona se convierte en un pantano, donde es muy posible quedar atascado.

También se necesita para la realización de las mediciones:

1. Un módulo de supervivencia, casa de campaña, herramientas, cocina portátil, radio portátil, radiolocalizador, televisor portátil, cargadores de baterías, etc.; para la estadía en esos lugares apartados.
2. Brújula, celulares satelitales, GPS u otro localizador para guiar en condiciones de extrema oscuridad o comunicar en caso de naufragio, accidentes o de alguna otra contingencia.
3. Destilador solar pequeño portátil para purificar agua, que permita su consumo sin utilizar productos químicos.
4. Paneles fotovoltaicos portátiles para la producción de energía eléctrica, para utilizar durante el día la energía generada para cargar las baterías de los equipos portátiles.
5. 5. Financiamiento para alquilar una de las 20 lanchas que existen en el lugar, adquirir el combustible del vehículo y la lancha que se alquile.

En el caso del Canal de la Manuí se construyó un camino de tierra de más de 20 km que llega hasta el mismo canal, al cual se puede acceder por dicho camino. En el caso del Canal de los Barcos se llega hasta el caserío de La Salina por carretera y de ahí, hasta el canal, se necesita un barco para cruzar la bahía de Santa Clara (alrededor de 15 km); en ese lugar existe una base de pesca deportiva con más de 20 barcos, con los que se pueden contratar los viajes.

En un segundo momento, y en función de los resultados obtenidos en los cálculos, se espera la adquisición de varias turbinas hidráulicas para la generación de electricidad, con transformadores, convertidores, cables y sincronizadores para su futura sincronización con la red eléctrica nacional.

**Ecuaciones utilizadas**

Los resultados de estas ecuaciones se reflejan en la tabla 2, lo primero que se calcula es la potencia cinética máxima que tiene la corriente, mediante la expresión siguiente:

$$E = \frac{V^2}{2 \cdot 1000} \cdot G \cdot n \cdot \zeta$$

Donde:

Ek → Energía cinética máxima de la corriente, kW

V → Velocidad del flujo o corriente, m/seg (entre 2 y 3 m/seg, llega hasta 5 m/seg)

G → Gasto o flujo, kg/seg

n → Cantidad de turbinas posibles a instalar (se proponen 100)

η → Eficiencia de las turbinas (fracción, 0,9)

1000 → Conversión de Watt a kiloWatt

El flujo puede determinarse por la expresión siguiente:

$$G = V \cdot A \cdot \rho$$

Donde:

ρ → Densidad del agua de mar, 1000 kg/m<sup>3</sup>

A → Área útil de la sección transversal que pueden barrer las aspas de la turbina, m<sup>2</sup>. Ver figura 2

El área se calcula por la expresión siguiente:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Donde:

π → 3,14159

d → diámetro útil de barrido de las aspas de la turbina, m. Se proponen 10 metros de diámetro. Mediante la figura siguiente se puede observar el tipo de turbina y su colocación:

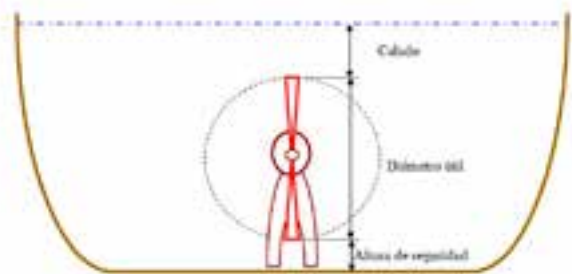


Fig. 2. Esquema frontal del posicionamiento de la turbina.

Donde:

Calado → de 15 a 25 metros, según la profundidad sea de 30 o 40 metros

Diámetro útil → Se proponen 10 metros de diámetro

Altura de seguridad → Al menos 5 metros, puede llegar a 10 metros

**Determinación de la energía del agua**

Para determinar la energía del agua hay que partir del hecho de que con el aumento de la altura de la marea la velocidad en el canal va aumentando progresivamente, y después disminuyendo hasta llegar a 0. Este ciclo lo com-

pleta en un tiempo aproximado de seis horas y 12 minutos, repitiéndose luego en sentido contrario. Se ha seleccionado un generador con álabes de 10 metros de diámetro y la fórmula utilizada para la energía es la siguiente:

### Determinación de la potencia útil máxima

La potencia útil máxima que se puede extraer de este flujo de agua en movimiento se obtiene por la ecuación:

$$\Delta N \text{ útil máx} = \frac{8\rho A V_1^3}{27} \eta \Delta N \text{ útil máx} = \frac{8\rho A V_1^3}{27} \eta$$

Donde:

$\eta$ =rendimiento de la turbina

### Determinación de la potencia real aprovechable por la turbina

Esta potencia se determina a partir de la ecuación:

$$\Delta N \text{ real aprov.} = \frac{8\rho A V_1}{27} (V_1^2 - V_2^2) \cdot \eta$$

$$\Delta N \text{ real aprov.} = \frac{8\rho A V_1}{27} (V_1^2 - V_2^2) \cdot \eta$$

Donde:

$V_1$  = Velocidad de entrada

$V_2$  = Velocidad de salida

### Determinación de la potencia por el coeficiente Cf

La potencia a partir del coeficiente Cf puede determinarse por la ecuación siguiente:

$$N = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad N = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Donde:

Cf = Coeficiente de pérdidas para el caso de utilización de molinos de agua

### Impacto económico y ambiental

Con la ejecución del proyecto se puede tener en Matanzas un sistema de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables (aprovechándose las mareas), además de tenerse a mano mayor nivel de información, educación y cultura general en este tipo de tecnologías; a la vez se tiene una repercusión económica pues generaría energía limpia evitándose el uso de combustibles fósiles no renovables y contaminadores del medio ambiente. Sería el primer paso para la generalización futura del uso de las corrientes de las mareas y ríos para generar electricidad a partir de la energía cinética de las corrientes hidráulicas.

El costo inicial es relativamente alto pero se amortiza teniendo en consideración los precios que tiene el petróleo y el daño ecológico que se evita. La propuesta inicial sería colocar 200 turbinas hidráulicas de 100 kW, con una potencialidad máxima de generación de 20 000 kW (20 MW).

### Cálculos económicos

Para calcular la potencia aprovechada se multiplica el número de turbinas por la potencia aprovechable promedio por hora. La energía aprovechable al día se calcula multiplicando el número de turbinas por la potencia real aprovechable y se obtiene la potencia aprovechable al año multiplicando por 365 días, y por tanto, multiplicando por la tarifa eléctrica se calcula el dinero ahorrado al año.

a) Cálculo de recuperación de la inversión

$$Tri = \frac{\text{Inversión (\$)}}{\text{Ahorro} \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]} = \text{año}$$

La recuperación se determina multiplicando el costo del KW instalado por la potencia a instalar. De ahí se tiene el costo de la inversión y dividiendo por el dinero ahorrado será el tiempo de recuperación.

Según los precios del mercado europeo es posible recuperar la inversión en tres años y seis meses, inferior a los cinco años, lo cual se considera muy positivo desde el punto de vista económico.

Estos ahorros no tienen en cuenta la posibilidad de adquisición de bonos de carbono por el ahorro en emisiones del CO<sub>2</sub>, que es un gas que incrementa el efecto invernadero.

b) Principales resultados técnicos obtenidos

Para la realización de los cálculos se hace necesario conocer los datos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Datos preliminares para el cálculo

Datos:		
Densidad del agua	1000	kg/m <sup>3</sup>
Diámetro de las paletas	10	m
Rendimiento de la turbina	0,5	adimensional
Área	78,54	m <sup>2</sup>
Tarifa	0,24	\$/kW.hr
Precio del petróleo	700	\$/Ton
Coef b=Vsalida/Ventrada	0,5	adimensional
Coeficiente de pérdidas (Cf)	0,3	adimensional

Se calcula la energía total que existe en el flujo de agua en movimiento, resultando ser:

$$E_k = 2158,6 \text{ kW.hr/día}$$

De dicha energía puede obtenerse una potencia útil máxima:

N útil máx.= 639,6 kW.hr /día

Se obtiene una potencia real aprovechable de:

N real=480 kW.hr /día

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos a partir de las horas de las mareas y las velocidades de entrada y salida del agua

**Resultados económicos**

Se realiza el cálculo económico a partir de la instalación de 200 turbinas con capacidad para generar 100 kW cada una, lo

cual da como resultado una potencia a instalar de 20 MW, de los cuales se aprovecharán aproximadamente 4 MW para un porcentaje de aprovechamiento de 20 %, el mínimo posible.

La energía producida por las turbinas será de 96 MW.hr al día lo que corresponde con 95 017 MW.hr al año lo cual significa un ahorro anual de \$ 8 404 123 por el costo del kW.hr de energía eléctrica. Es importante señalar que se dejarán de quemar 12 676 toneladas de petróleo anualmente que tienen un valor aproximado de 8 873 354 U.S.D. (Tabla 3).

O sea, a los precios del mercado europeo es posible recuperar la inversión en tres años y seis meses, inferior a los cinco años, lo cual resulta muy positivo desde el punto de vista económico [Sánchez, 1999].

Tabla 2. Resultados técnicos

Resultados técnicos							
Horas de mareas	Velocidad entrada	Velocidad salida	Potencia del agua	Potencia útil máxima	Potencia real aprovechable	Potencia por Cf	Error
hora	m/seg	m/seg	kW	kW	kW	kW	%
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
1	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
2	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
3	2,2	1,1	418,15	123,90	92,92	125,44	1,23
4	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
5	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
6	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
7	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
8	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
9	2,2	1,1	418,15	123,90	92,92	125,44	1,23
10	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
11	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
12	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
13	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
14	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
15	2,2	1,1	418,15	123,90	92,92	125,44	1,23
16	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
17	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
18	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
19	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
20	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
21	2,2	1,1	418,15	123,90	92,92	125,44	1,23
22	1,1	0,55	52,27	15,49	11,62	15,68	1,23
23	0,6	0,3	8,48	2,51	1,88	2,54	1,23
24	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total:		kW.hr/día	2 158,59	639,58	479,69	647,58	
Total:		kW	89,94	26,65	19,99	26,98	

Tabla 3. Resultados económicos de la posible implementación del sistema de generación de energía

Resultados económicos				
Cantidad de turbinas	200	Turbinas		
Capacidad de las turbinas	100	kW		
Costo del kW instalado	1500	\$/kW		
Potencia a instalar	19 996	kW	20,00	MW
Potencia aprovechada	3997,40	kW	4,00	MW
Energía aprovechada	95 937	kW.hr/día	95,94	MW.hr/día
Energía aprovechada	35 017 181	kW.hr/año	35 017,18	MW.hr/año
Dinero ahorrado	8 404 123	\$/año		
% de aprovechamiento	20,0	%		
Tn de petróleo ahorradas	12 676,22	Tn/año	8 873 354	\$/año
			por petróleo dejado de quemar	

Cálculo de la recuperación de la Inversión				
Costo	29 994 464	\$		
Tiempo de recuperación de la inversión	3,57	años		
	3	años y	6	meses

Estos ahorros no tienen en cuenta la posibilidad de adquisición de bonos de carbono por el ahorro en emisiones del CO<sub>2</sub>, que es un gas que incrementa el efecto invernadero. Todos estos cálculos se realizaron para un aprovechamiento 20 %, cuando este valor debe estar alrededor de 50 %.

### Conclusiones

- Contar con la instrumentación requerida para comprobar los cálculos preliminares realizados, es imprescindible antes de realizarse cualquier inversión.
- Tener en la provincia de Matanzas un sistema de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables, aprovechándose las mareas, además de lograrse un mayor nivel de información, educación y cultura general en este tipo de tecnologías; también se lograría una repercusión económica importante, pues generaría energía limpia, evitándose el uso de combustibles fósiles no renovables y contaminadores del medioambiente.
- De acuerdo a datos preliminares esos canales tienen la potencialidad de generar 35 017 181 kW.hr al año, o sea, 35 017,18 MW.hr al año, lo que corresponde al ahorro de 12 676 Tn de petróleo al año; al precio actual de 100 USD el barril de petróleo ese ahorro equivale a 8 millones 873 mil 354 USD al año, que puede recuperarse en tres años y seis meses.
- Se dejan de emitir al medioambiente más de 120 000 Tn de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) al año, por dejar de consumirse ese combustible en las centrales termoeléctricas del país.

### Recomendaciones

- Realizar un estudio que permita reajustar y comprobar los valores preliminares, mediante modernos instrumentos de medición.
- De comprobarse la factibilidad técnica y económica de la inversión se recomienda la búsqueda de financiamiento para su ejecución.

- Contratar a un equipo de trabajo especializado a liderar el proyecto.
- Ejecutar el proyecto en un periodo de dos años, con un financiamiento de 950 000 CUC y 999 851,32 CUP.

### Agradecimientos

Se agradece la colaboración de la M. Sc. Ing. Marlene Orama Ortega, miembro de Cubasolar Matanzas (marlene.oramas@umcc.cu); el M. Sc. Ing. Armando Díaz Mejías, el M. Sc. Lic. Miguel Ángel López Estrada y la Lic. Iralda Sánchez Ávila (de CNA GESMAE).

### Bibliografía

- ARRABAR MONTERO, CARLOS Y ALFONSO MADERA SÁNCHEZ (2011). *Equipamiento electromecánico de una Central minihidroeléctrica*. Publicado por ICAI y Universidad Pontificia Comillas. Disponible en: [http://www/wb/conae/cona\\_1\\_pagina\\_principal/energía\\_minihidraulica](http://www/wb/conae/cona_1_pagina_principal/energía_minihidraulica).
- MARTÍN DE EUGENIO POZA, JULIÁN Y ALFONSO MADERA SÁNCHEZ (2011). *Diseño hidráulico y mecánico de la Central minihidroeléctrica del embalse Valmayor*. Publicado por ICAI y Universidad Pontificia Comillas. Disponible en: [http://www/wb/conae/cona\\_1\\_pagina\\_principal/energía\\_minihidraulica](http://www/wb/conae/cona_1_pagina_principal/energía_minihidraulica).
- SÁNCHEZ ÁVILA, J. L (1999). «Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento de los sistemas centralizados de aire acondicionado». Tesis de Doctorado. Universidad de Matanzas. Matanzas, 129 páginas.
- SENER (2009). *Energías renovables para el desarrollo sustentable en México*. Disponible en: <http://www.conaea.gob.mx>.
- COMISIÓN NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA (CONAE) (2012). Disponible en: <http://www.energia.gob.mx>.
- COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA, CRE (2012). Disponible en: <http://www.cre.gob.mx>.

Recibido: 1ro de febrero 2020.

Aceptado: 15 de febrero de 2020.