

Dimensionamiento y selección de turbinas eólicas para el bombeo de agua en zonas pre-montañas

Sizing and selection of wind turbines for water pumping in pre-mountain zones

Conrado Moreno Figueredo^{1,*} José Augusto Medrano Hernández¹, José Arzola Ruiz², Arnold Janssens³

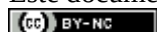
¹ Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría. Calle 114 No.11901 e/Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

² Centro de Estudio de Matemáticas para las Ciencias Técnicas. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría. Calle 114 No.11901 e/Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

³ Facultad de Arquitectura e Ingeniería. Universidad de Gante. Sint-Pietersnieuwstraat 41, 9000. Gante, Bélgica.

*Autor de correspondencia: conrado@ceter.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 25 julio 2020 **Aceptado:** 25 agosto 2020 **Publicado:** 1 septiembre 2020

Resumen

El presente trabajo está enfocado en la disminución de los costos por concepto de consumo de electricidad y combustibles en el complejo *Las Terrazas*, Cuba. Se identificaron los lugares más altos y cercanos, seleccionando la loma *El Salón* como lugar de estudio. A través del empleo de datos satelitales y bases de datos se determinó la media del viento (5,7 m/s a una altura de 50 m), lo cual favorece la instalación de turbinas eólicas. Se propuso instalar una turbina eólica con eje horizontal. Se concluyó que el modelo elaborado permite seleccionar las opciones de turbinas eólicas más factibles económicamente. De una base de datos compuesta por 17 modelos de turbinas eólicas, como resultado se obtuvo que cinco turbinas eólicas sea lo más factible económicamente. Adicionalmente, el modelo matemático obtenido es capaz de determinar las dimensiones óptimas del equipamiento a seleccionar. De acuerdo con el modelo matemático, la turbina eólica más idónea desde el punto de vista económico, que se debe instalar en la loma “El Salón” es la Nordex N27/150 (opción 1), porque cumple con los requisitos para el caso de estudio.

Palabras clave: turbina eólica, multicriterio, bombeo de agua, energía eólica

Abstract

This work arises from the need to reduce costs by concept of electricity and fuel consumption in *Las Terrazas* complex, Cuba. A visit to the place was done and the highest and closest places were identified. An evaluation of them was made, selecting *El Salón* hill as the study place. With satellite data and international databases, the average wind speed was determinate (5.7 m/s at 50 m), which favors the wind machines installation. These characteristics have been adopted to reduce costs for the complex by electricity consumption for water pumping. It has proposed to install a wind turbine with horizontal axis. The proposed mathematical model allows selecting the more feasible wind turbine options. From a database composed by 17 models of wind turbines, five wind turbines were selected as the most economically feasible. Additionally, the mathematical model

was able to determine the optimal dimensions of the selected equipment. According to the mathematical model, the most suitable wind turbine is the Nordex N27/150 (option 1), based on an economic point of view and because is in agreement with the requirements of the case studied.

Keywords: wind turbine, multi-criteria, water pumping, wind energy

1. Introducción

Debido al creciente desarrollo de nuevas tecnologías a nivel mundial, el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE) ha tenido un impacto directo, principalmente en el suministro de agua y de energía eléctrica, con mayor aplicación en zonas aisladas de la red eléctrica nacional y pre- montañosas. El presente trabajo está dirigido al suministro de agua, a través de la selección multi-criterio de turbinas eólicas para su aplicación al bombeo de agua. Para ello, se elabora un modelo matemático que permite la combinación de criterios técnico-energéticos y económicos, conocido como Modelo para el Dimensionamiento y Selección de Turbinas Eólicas para el Bombeo de Agua (MDSTEBA). En los últimos años, la elaboración de modelos matemáticos con el enfoque antes expresado se ha comportado de la siguiente manera: Zeng [1] desarrolla un modelo para la planificación de un sistema de producción de electricidad con energía eólica y solar fotovoltaica, a través de la teoría multi-objetivo. El modelo propuesto considera la toma de decisiones bajo las restricciones por la reacción de Generación distribuida. Para resolver el problema se emplea un enfoque heurístico para maximizar la producción de electricidad, minimizando a su vez los costos de obtención de cada kilowatt hora.

Cohen [2] realiza una propuesta para la reducción de CO₂ y del consumo de energía. Para ello, se propone la implementación de sistemas de energía solar fotovoltaica y solar térmica en el techo de edificios. Para obtener la configuración óptima de la instalación solar fotovoltaica, se emplea un modelo que incluye un optimizador de algoritmo genético de clasificación. Zografidou [3] reporta la aplicación del diseño óptimo de la red de distribución de energía. Para ello, aplica un modelo de programación multi-objetivo que considera criterios sociales, medioambientales y económicos. Wang [4] propone un modelo a través de un algoritmo multi-objetivo para optimizar las dimensiones de un sistema híbrido, compuesto por paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, bancos de baterías y motores diésel. En particular, el modelo propuesto considera la minimización del costo anualizado del sistema, la probabilidad de suministro de energía y la emisión de gases de efecto invernadero, permitiendo la toma de decisiones. Para resolver el modelo se propone un algoritmo con operadores genéticos (algoritmos genéticos).

Li [5] desarrolla un modelo de optimización para la planificación energética de los distritos urbanos de Italia, a través de parques fotovoltaicos y micro turbinas eólicas, además de plantas de cogeneración. Concluye que los principales resultados son la cantidad de turbinas eólicas, la configuración del sistema solar fotovoltaico y el número de unidades de cogeneración a instalar. La función objetivo formulada en el trabajo consistió en la minimización de los costos capitales y costos de operación. Bracco [6] propone un enfoque para optimizar el dimensionamiento de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico autónomo (con sistema de almacenamiento de energía). Para el diseño del sistema se emplea un algoritmo basado en la Transformada de Fourier. Se minimiza el costo total de la electricidad y las pérdidas de energía, a partir del uso del método de los algoritmos genéticos. Abdelkader [7] reporta el empleo de las distintas Tecnologías Energéticas Renovables, con aplicación a la calefacción, desde el punto de vista de la toma de decisiones. Para ello, se analiza la calefacción solar, bombas de calor y calderas de pellets de madera a través del uso de la teoría multi-criterio, llegando a la conclusión que el calentamiento solar es la mejor alternativa.

Del análisis del estado del arte en la temática se observa que existen varios trabajos que utilizan técnicas modernas de optimización mono y multi-criterial, predominando en los últimos años la optimización no lineal y discreta en condiciones estocásticas. Se observó adicionalmente que las técnicas de optimización multi-criterio son aplicadas principalmente a instalaciones de energía solar fotovoltaica, sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, biomasa, entre otros, pero no se evidenció la aplicación de estos métodos a sistemas eólicos.

Como caso de estudio, en el presente trabajo se seleccionó el complejo eco-turístico *Las Terrazas*, localizado en el extremo oriental de la Sierra del Rosario, Cuba; donde predomina un relieve pre-montañoso, con un alto índice de turbulencia. En Cuba, el bombeo de agua utilizando el viento se realizaba a través del empleo de molinos de viento tradicional, disponibles desde las primeras décadas del siglo XX. En aquellos lugares donde existe un alto consumo de agua, se hace necesaria la instalación de varios sistemas de bombeo de este tipo y cavar un pozo para cada uno, lo cual representa un costo relativamente alto [8]. Los Sistemas de Bombeo Eolo-Eléctricos (SBEE) constituyen otra alternativa de sistema de bombeo eólico más avanzada, siendo capaces de entregar mayor caudal de agua que los sistemas de bombeo mecánicos. En la Figura 1 se muestra la representación esquemática de un SBEE.

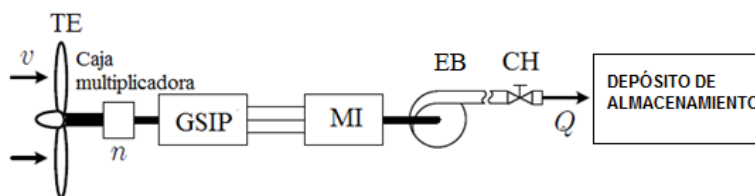


Fig.1 Representación esquemática de un sistema de bombeo eolo-eléctrico

De acuerdo con la Figura 1, TE es la turbina eólica que incluye el generador síncrono de imanes permanentes GSIP, MI es el motor de inducción, EB es la electrobomba y CH es el circuito hidráulico. El objetivo del MDSTEBA es encontrar las dimensiones óptimas (diámetro de rotor y altura de la góndola) de la turbina eólica a instalar para el suministro de agua al complejo *Las Terrazas*.

2. Materiales y Métodos

Conceptualmente, el MDSTEBA es el procedimiento de cálculo a través del cual se realiza el dimensionamiento y la selección de las opciones de turbinas eólicas más factibles económicamente, entre las existentes en el mercado. Para ello se combinan criterios técnico-energéticos y económicos. El MDSTEBA está estructurado por cinco sub-modelos, divididos en tres bloques y una base de datos de turbinas eólicas.

Bloque técnico-energético: Se compone de cuatro sub-modelos (requerimientos de bombeo, evaluación del recurso eólico, determinación de la clase de viento de la turbina y el de producción energética) y una base de datos de turbinas eólicas. Estos sub-modelos y la base de datos constituyen la variable de entrada al siguiente bloque (bloque económico).

Bloque económico: En este bloque se calculan los conocidos indicadores económicos para cada opción de turbina eólica: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI) y el costo nivelado de la electricidad (LEC, por sus siglas en inglés). Estos indicadores económicos constituyen las variables de entrada al bloque matemático.

Bloque matemático: Está compuesto por el Modelo Matemático Conceptual (MMC), a través del cual se seleccionan las opciones de turbinas eólicas más factibles desde el punto de vista económico.

Formulación conceptual del modelo propuesto (bloque matemático)

La formulación conceptual del modelo matemático se divide en tres partes: 1) Definición de las principales variables que intervienen en el MDSTEBA. 2) Definición de la función multi-objetivo (MMC). 3) Descripción de los sub-modelos que constituyen variables de entrada al MMC.

Principales variables que intervienen en el MDSTEBA

Las principales variables que intervienen en el MDSTEBA se clasifican como:

Variables de coordinación: Para el caso de las turbinas eólicas, se consideran como variables de coordinación más importantes, la demanda de agua (Q_d), la carga total de bombeo (H_T) y la velocidad media del viento en el sitio ($\bar{v}$).

Variables de decisión: Como variable de decisión se considera la cantidad de turbinas eólicas a seleccionar, las cuales van a permitir al decisor seleccionar las mejores opciones en función de su preferencia.

Indicadores de eficiencia: Estos indicadores de eficiencia pueden ser de carácter energético o económico. A los efectos del presente trabajo, los indicadores de eficiencia tienen un carácter económico.

Datos significativos de entrada: Para el caso de la selección de turbinas eólicas con aplicación al bombeo de agua, como otros datos significativos de entrada al modelo, se tienen los valores deseados (V^d) de los indicadores de eficiencia económica, los cuales, a diferencia de los valores reales se establecen de acuerdo a la satisfacción de las expectativas del decisor.

Definición de la función multi-objetivo

Para definir la función multi-objetivo, se considera un caso de estudio con alto consumo de electricidad en el bombeo de agua y grandes gastos financieros resultantes del consumo de electricidad para este fin. Por tanto es necesario encontrar una alternativa para generar la energía eléctrica demandada por el equipamiento de bombeo, y por ende, atenuar estos gastos financieros. Adicionalmente, se conoce que la velocidad media del viento en el sitio del caso de estudio a 10 m sobre el nivel del terreno, es superior a los 5 m/s. Con el fin de satisfacer la demanda de agua y determinar las opciones de turbinas eólicas más factibles desde el punto de vista económico, se deduce la siguiente función multi-objetivo:

$$Z = \min \left\{ \max \left[\frac{|VAN_{ij} - VAN^d|}{VAN^d}, \frac{|TIR_{ij} - TIR^d|}{TIR^d}, \frac{|TRI_{ij} - TRI^d|}{TRI^d}, \frac{|LEC - LEC^d|}{LEC^d} \right] \right\} \quad (1)$$

La ecuación 1 es una función que vista como una relación matemática, representa a la desviación entre los valores de los indicadores de eficiencia económica y sus valores deseados. Por tanto, es adimensional. Los valores de la variable Z son los que se optimizan de acuerdo a las restricciones que se planteen. El principal propósito de la función multi-objetivo es minimizar la máxima desviación entre los indicadores de eficiencia económica y sus valores deseados. Como el problema a resolver consiste en determinar las opciones de turbinas eólicas más factibles desde el punto de vista económico, se seleccionan como valores deseados de los indicadores de eficiencia económica, el máximo valor del VAN y TIR, así como los valores mínimos del TRI y el LEC. Es decir:

$$\{VAN^d; TIR^d\} = \{VAN_{\max}; TIR_{\max}\} \quad (2)$$

$$\{TRI^d; LEC^d\} = \{TRI_{\min}; LEC_{\min}\} \quad (3)$$

Adicionalmente, se establece la siguiente restricción:

$$\{TRI\} \leq 8 \text{ años}$$

De acuerdo con la experiencia de empresas que realizan proyectos relacionados con las fuentes renovables de energía en Cuba (Ej. Empresa cubana INEL), el TRI se encuentra aproximadamente entre los 6 y los 8 años. De aquí que se haya establecido como restricción 4 que el TRI sea menor de ocho años.

En la Figura 2 se muestra de manera esquemática la secuencia para la generación de las opciones de turbinas eólicas más factibles desde el punto de vista económico. De acuerdo con la Figura 2, los indicadores económicos son el VAN, la TIR, el TRI y el LEC. Se analiza cada una de las opciones de turbinas eólicas componentes de la base de datos, se aplica la restricción correspondiente y se eliminan aquellas que no satisfacen esta restricción. Este método de optimización es conocido como búsqueda exhaustiva [9]. Con ello se genera una población de opciones de turbinas eólicas que cumplen la restricción establecida.

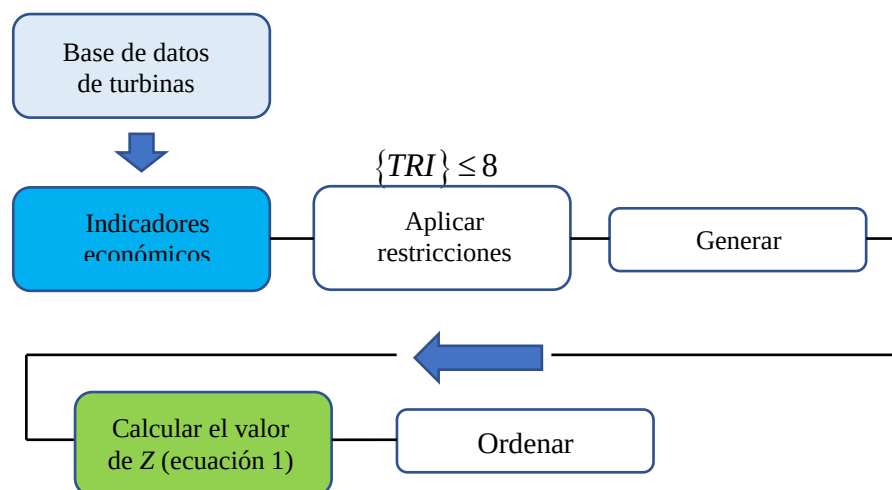


Fig.2 Secuencia para las opciones de turbinas eólicas más factibles económicamente

Determinación de los valores de la función Z (función multi-objetivo) y ordenamiento de las opciones de turbinas eólicas generadas

Como se trata de indicadores diferentes entre sí, las opciones de turbinas deben ordenarse de acuerdo a la función multi-objetivo Z, representada por la ecuación 1. Para ordenar las opciones seleccionadas con respecto a Z, se procede de la siguiente manera:

1. Seleccionar el mayor valor de la diferencia entre todos los indicadores de eficiencia de cada combinación u opción generada (pues se trata de minimizar la máxima diferencia). Este es el resultado de la función multi-objetivo Z para cada opción de turbina eólica generada por el modelo matemático.
2. Ordenar estos valores de Z de menor a mayor.

Descripción de los sub-modelos que constituyen variables de entrada al MMC

Bloque técnico-energético

Requerimientos de bombeo: Los requerimientos de bombeo son la demanda de agua (Q_d) y la carga total de bombeo (H_T). En el caso de Q_d , esta se puede conocer por información directa del caso de

estudio, o a través de la identificación de los tipos de consumidores existentes. Para el caso de H_T , esta también se puede conocer por información directa, o conociendo las características del circuito hidráulico que conduce el agua hasta el consumidor.

Evaluación del recurso eólico: En esta etapa se recopilan y analizan los datos del viento que se dispongan. Lo más común es que al evaluar el recurso eólico, los datos sean provenientes de las estaciones meteorológicas. Existen varios métodos para la estimación del recurso eólico en un sitio, los cuales se resumen en [10]. Esta etapa incluye además la determinación de lugares ventajosos (con velocidad de viento superior a los 5 m/s a 10 m sobre el nivel del terreno) de manera que sea factible para el emplazamiento de turbinas eólicas. Para ello, debe tenerse en cuenta un parámetro muy importante como el factor de capacidad (FC), el cual generalmente se considera bueno para este tipo de instalaciones a partir del 20% [11]. El factor de capacidad en un sitio se puede determinar a través de la ecuación:

$$FC = [(0,07 \cdot \bar{v}) - 0,2] \cdot 100\% \quad (4)$$

Donde $\bar{v}$ representa a la velocidad media en m/s.

Dimensionamiento de la turbina eólica

En este paso se determina el diámetro de rotor mínimo para satisfacer los requerimientos de bombeo (Q_d y H_T). El diámetro del rotor de la turbina se determina a través de las ecuaciones 5 y 6.

$$A = \frac{\rho_{agua} \cdot g \cdot H_T \cdot Q_d}{\frac{1}{2} \rho_{aire} \cdot \bar{v}^3 \cdot FPE \cdot \eta} [\text{m}^2] \quad (5)$$

Donde FPE es el Factor Patrón de Energía; η es la eficiencia global del sistema de bombeo (este valor se estima entre 0,1 y 0,12); ρ_{aire} es la densidad del aire ($1,225 \text{ kg/m}^3$) y $\bar{v}$ es la velocidad media del viento a la altura del buje de la máquina. La metodología para determinar el FPE se describe de manera detallada en [11-12]. El diámetro del rotor de la turbina eólica (D), se obtiene a través de la ecuación 6.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} [\text{m}] \quad (6)$$

Determinación de la clase de viento de las turbinas eólicas

La clase de turbina eólica caracteriza la resistividad de la máquina ante la acción de vientos extremos (vientos provocados generalmente por huracanes). La determinación de la clase de la turbina se realiza a través de la metodología descrita en [11,13]. Una vez determinados el diámetro de rotor (D) y la clase de viento de la turbina eólica, se consultan catálogos de fabricantes y proveedores, para la posterior selección y confección de una base de datos.

La base de datos de turbinas eólicas

La base de datos de turbinas eólicas se confecciona en función del diámetro de rotor necesario, altura a la cual es factible instalar las turbinas eólicas en el sitio bajo estudio y la clase de viento recomendada de acuerdo a las características del emplazamiento. Esta base de datos debe incluir además, las características técnicas de cada máquina.

Determinación de la producción energética de las turbinas eólicas

Para la determinación de la producción energética de las turbinas, se considera el efecto de la turbulencia. El análisis del efecto de la turbulencia se realiza empleando el modelo de Kaimal. La metodología para determinar la velocidad equivalente del viento se describe de manera detallada en [12-13]. El modelo de Kaimal tiene como ventaja que puede dar una mejor observación empírica de la turbulencia atmosférica que el resto de los modelos existentes, de ahí su amplio uso. La producción de energía se determina a través de la ecuación 7 [11-12].

$$E = \Delta t \sum P_i \cdot f_i \quad (7)$$

Donde: P_i es la potencia que entrega la máquina (de acuerdo a la nueva curva de potencia construida al tener en cuenta el efecto de la turbulencia), en función de la velocidad del viento equivalente (obtenida como salida del modelo de turbulencia de Kaimal), en W o kW, en dependencia de la curva de potencia original; f_i es la frecuencia para la cual es probable que exista cierto valor de velocidad v_i y Δt es el tiempo que se analiza, en horas. La frecuencia f_i para la cual es probable que exista cierto valor de velocidad v_i , es una combinación entre el tiempo que se analiza (Δt en horas) y la distribución de probabilidad de la velocidad del viento $p(v)$. La frecuencia de ocurrencia de cierto valor de velocidad de viento se calcula a través de la ecuación 8.

$$f_i = \Delta t \cdot p(v) [\text{horas}] \quad (8)$$

La probabilidad de ocurrencia de cierto valor de velocidad de viento v_i se determina a través de la expresión de la distribución de probabilidad de Weibull, mediante la ecuación 9 [11-13].

$$p(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \cdot \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (9)$$

Donde: k y c son los factores de forma (se puede determinar a partir de los métodos descritos en [14]) y escala, respectivamente; v es la velocidad del viento a la altura del buje de la turbina eólica. El factor de escala c es un factor cuyo valor es cercano al de la velocidad media del viento. Este factor se puede obtener a partir de la ecuación 11 [12]. El término $\Gamma(1+1/k)$ se obtiene según se indica en [11].

$$c = \left(\frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \right) [\text{m/s}] \quad (10)$$

El bloque económico está compuesto por el sub-modelo Análisis Económico, donde se determinan los indicadores económicos VAN, TIR, TRI y LEC. Para ello, es necesario estimar los gastos a incurrir (inversión inicial). En la Tabla 1 se presenta un estimado de los costos a tener en cuenta para la instalación de una turbina eólica. La estimación de la inversión dependerá de las condiciones y ubicación de sitio para el emplazamiento de las turbinas.

Tabla 1. Estimación de costos durante el montaje y puesta en marcha de una turbina eólica

Concepto	Cantidad	Costo unitario (USD)
Cimentaciones	1	5,88 USD/m ³
Zanjas	1	13 560
Caminos	1	6 000
Edificio de control	1	6 780
Turbina eólica	1	2 184 USD/kW
Instalación y grúas	1	76 USD/m
Transporte	9	43,46 USD/m/vehículo
Sistema de control	1	11 865
Equipos eléctricos	1	1 920
Capacitación del personal	1	4 680

Como se observa en la Tabla 1, los costos a incurrir se encuentran en función del volumen de la cimentación ($0,32 \text{ m}^3/\text{kW}$), el diámetro de la turbina D (para el caso de las grúas y el transporte) y de la potencia nominal de la turbina eólica. Al total de los costos resumidos en la Tabla 1 se le incrementa un 10% del costo inversión, para la solución de imprevistos que puedan surgir.

3. Resultados y Discusión

Aplicación del modelo propuesto al complejo Las Terrazas

Las necesidades de agua fueron estimadas en función de los tipos de consumidores. La distribución de la demanda de agua en el complejo *Las Terrazas* se resume en la Tabla 2

Tabla 2. Distribución de la demanda de agua en el complejo *Las Terrazas*

Concepto de consumo de agua	Cantidad actual	Tasa de crecimiento anual de la población (%)	Cantidad futura en 20 años	Consumo unitario ($\text{m}^3/\text{consumidor}/\text{día}$)	Demanda de agua ($\text{m}^3/\text{día}$)
Habitantes de la comunidad	1 000	0,1	1 020	0,3	306
Habitantes en las áreas aledañas	250	0,1	255	0,1	25,5
Círculo infantil (niños)	150	-	-	0,11	16,5
Escuela (alumnos)	300	-	-	0,06	18
Albergues (personas)	48	-	-	0,2	9,6
Hotel Moka y servicios	-	-	-	-	110
Animales (cerdos)	170	6	545	0,16	87,2
Total					572,8

Con respecto a la estimación de la carga total de bombeo, se realizó la caracterización de la fuente de abasto de agua al complejo. El suministro de agua al complejo se realiza a partir de dos pozos localizados a una distancia de 12 km y mediante dos estaciones de bombeo. La estación de rebombeo se encuentra a 4 km de la cisterna y dada la cercanía al complejo y a los lugares más altos existentes en la zona (lomas). El presente trabajo se centra en esta estación, con el propósito de sustituir la fuente de alimentación eléctrica al equipamiento de bombeo, por una turbina eólica que suministre la energía eléctrica para el funcionamiento de las dos bombas de superficie que se encuentran instaladas. La diferencia de altura entre la estación y la cisterna de almacenamiento localizada en la comunidad, es de 70 m aproximadamente, según la topografía del lugar. Adicionalmente, se conoce que la tubería conductora es de hierro fundido y 6 pulgadas de diámetro. Las pérdidas hidráulicas se estiman en 35 m de la columna de agua aproximadamente. De aquí que la carga total de bombeo a considerar para los cálculos es de 105 m.

Algunos puntos de la zona de *Las Terrazas* pueden ser ventajosos para la instalación de máquinas eólicas. Al complejo lo rodean tres elevaciones: una al suroeste (*El Salón* con una altura de 544 m sobre el nivel del mar), otra más al este (*La Gloria* con una altura de 241 m sobre el nivel del mar) y una más cercana, (*El Taburete* con una altura de 452 m sobre el nivel del mar). En la zona donde se localiza el complejo, los vientos más favorables provienen del noreste y *El Salón* es la única elevación que enfrenta perpendicularmente esta dirección. También es la más cercana a la estación

de rebombeo (se localiza a sólo a 1,3 km). Por tanto, se propuso emplazar la turbina eólica en la loma *El Salón*. Dada la carencia de mediciones de los parámetros del viento para estimar la velocidad media del viento, se consultaron cuatro bases de datos, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Velocidad media del viento a 50 m de altura para distintas fuentes

Fuente de datos	Velocidad media del viento (m/s)
Atlas Eólico de Cuba	5,9
NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center	5,84
Global Wind Atlas	5
Web de las Energías Renovables	5,9
Promedio de velocidad	5,7

Aplicando la ecuación 4, para una velocidad media del viento de 5,7 m/s, el factor de capacidad es de un 20%, cuyo valor demuestra que es factible instalar turbinas eólicas en la loma *El Salón* a partir de los 50 m de altura. A partir de los requerimientos para el bombeo (Q_d y H_T) y de la estimación del recurso eólico en el lugar seleccionado para el emplazamiento de la turbina eólica, aplicando la ecuación 6 para una velocidad media de viento de 5,7 m/s a 50 m, resulta que el diámetro de rotor mínimo necesario para satisfacer los requerimientos para el bombeo es 20,3 m (considerando el valor de eficiencia más bajo correspondiente a 0,1).

Como se expresó anteriormente, la clase de la turbina eólica se determina a partir de la metodología descrita en [11], basada en la aplicación de la distribución de Gumbel. Como resultado, se obtuvo que la velocidad de referencia V_{ref} es de 49,9 m/s. Este valor de velocidad corresponde a una turbina clase I. Por otro lado, el índice de turbulencia en la loma *El salón* es estimado como alto, algo normal en zonas pre-montañas, debido a la abundancia de vegetación y otros obstáculos existentes. También dada la carencia de mediciones de los parámetros del viento para la selección de la turbina eólica, se considera el valor máximo del índice de turbulencia de referencia que admite la norma IEC 61 400-1 ($I_{ref} = 0,16$). En la cima se debe instalar una turbina eólica Clase IA [11]. Teniendo en cuenta el diámetro de rotor necesario y la clase de la turbina eólica, se confeccionó una base de datos compuesta por 17 modelos de estos equipos.

Adicionalmente, se obtuvo la producción energética de cada máquina aplicando las ecuaciones 7-10. En la Tabla 4 se presentan las turbinas eólicas que componen la base de datos con su respectiva producción energética.

Con respecto al bloque económico, en este se calcularon los indicadores económicos para cada opción de turbina eólica: VAN, TIR, TRI y LEC. Para el cálculo del VAN se consideró: TIR: 12%; Costo aproximado de producción de la electricidad en una termoeléctrica: 0,23 USD/kWh (de acuerdo con informaciones ofrecidas del Ministerio de Energía y Minas de Cuba); Tiempo de vida útil de la turbina eólica: 20 años; Gastos anuales: 3% de la inversión inicial (para labores de operación y mantenimiento); Energía consumida anualmente por cada bomba que se encuentran instalada: 135 050 kWh/año (trabajan de manera independiente 10 horas al día); Ingresos anuales: 31 061,5 USD/año (costo de la energía que se deja de producir en una termoeléctrica). En la Tabla 5 se presentan los indicadores correspondientes a las turbinas eólicas cuyo tiempo de recuperación de la inversión es menor o igual a 8 años.

Tabla 4. Características de las turbinas eólicas y su producción energética

No.	Turbina eólica	Diámetro de rotor (m)	Potencia nominal (kW)	Producción energética (kWh/año)
1	Nordex N27/150	27	150	779 800
2	Nordex N27/250	27	250	667 900
3	WESPA 200/29	29	200	647 200
4	Nordex N29	29	250	985 400
5	Vestas V29/225	29	225	815 200
6	Norwin 29-Stall-225	29	225	660 900
7	Aeronautica 29-225	29	225	1 367 100
8	Fuhrländer FL 250/30	30	250	780 200
9	NEPC	29,8	200	598 300
10	Aeronáutica 30/250	30	250	630 700
11	Bonus B30-150	30	150	397 700
12	WESPA 200/31	31	200	703 300
13	NedWind	31	250	670 800
14	Aeronautica 33-225	33	225	1 570 600
15	Norwin 29-STALL-200	29	200	676 900
16	WES 250	30	250	634 700
17	Wind Technik Nord	30	250	610 600

Tabla 5. Turbinas eólicas que satisfacen la restricción y sus indicadores económicos

Opción	Turbina eólica	Inversión (USD)	VAN (USD)	TRI (años)	LEC (USD/kWh)	TIR (%)
1	Nordex N27/150	376 228	379 718,13	6,1	0,13	16
9	NEPC	485 959,2	355 128,72	7,8	0,23	11
11	Bonus B30-150	376 599,2	379 634,47	6,1	0,26	16
12	WESPA 200 - 31	486 083	355 101,08	7,8	0,19	11
15	Norwin 29-STALL-200	485 835,4	355 156,36	7,8	0,20	11

Para el bloque matemático se aplica el mismo procedimiento descrito en la Figura 2. El valor de la función Z es el resultado de la mayor diferencia entre los indicadores de eficiencia económica y sus valores deseados. De acuerdo con la cantidad de opciones generadas (Tabla 5) y las ecuaciones 2 y 3, los valores deseados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores deseados de los indicadores de eficiencia económica

Indicador de eficiencia	Valor deseado	Valor
VAN	$VAN^d = VAN_{máx.}$	379 718,13 (opción 1)
TIR	$TIR^d = TIR_{máx.}$	16 % (opciones 1 y 11)
TRI	$TRI^d = TRI_{mín.}$	6,1 años (opciones 1 y 11)
LEC	$LEC^d = LEC_{mín.}$	0,10 USD/kWh (opción 14)

En la Tabla 7 se presentan los resultados referentes al cálculo de las desviaciones, al valor de la función Z (ecuación 1) y al ordenamiento de las opciones de turbinas eólicas generadas (mostradas en la Tabla 5).

Tabla 7. Desviaciones, valores de la función Z y ordenamiento de las opciones generadas

Opción	Turbina eólica	ΔVAN	ΔTRI	ΔLEC	ΔTIR	Z
1	Nordex N27/150	0	0	0,3	0	0,3
12	WESPA 200 - 31	-0,06483	0,2787	0,9	-0,3125	0,9
15	Norwin 29-STALL-200	-0,06468	0,2787	1	-0,3125	1
9	NEPC	-0,064757	0,2787	1,3	-0,3125	1,3
11	Bonus B30-150	-0.0002203	0	1,6	0	1,6

Como se observa en la Tabla 7 el máximo valor de las desviaciones en cada combinación, corresponde al resultado de la función Z. Estos valores de la función Z se ordenan de menor a mayor. La opción que ha quedado en primer lugar, es la óptima (opción 1, ver Tabla 7).

4. Conclusiones

El objetivo del trabajo fue desarrollar un modelo matemático dirigido al dimensionamiento y selección de las opciones de turbinas eólicas más factibles entre las existentes en el mercado, considerando criterios técnico-energéticos y económicos, demostrándose que el MDSTEBA es capaz seleccionar las opciones de turbinas eólicas más factibles económicamente. Esto se pudo corroborar a través de la evaluación en el complejo *Las Terrazas*, el cual se utilizó como caso de estudio, obteniéndose un total de 17 opciones; de ellas 5 resultaron ser las más factibles desde el punto de vista económico. Adicionalmente, se demostró que el MDSTEBA define además las dimensiones óptimas del equipamiento a seleccionar. De acuerdo al MDSTEBA, la turbina eólica más idónea desde el punto de vista técnico-energético y económico, que se debe instalar en la loma *El Salón* es la Nordex N27/150 (opción 1), pues reúne los requisitos en cuanto a diámetro de rotor y clase de viento y es la turbina eólica que presenta mayor resultado del Valor Actual Neto, mayor Tasa Interna de Retorno y menor Tiempo de Recuperación de la Inversión, cumpliéndose así el objetivo para el cual fue diseñado el modelo matemático.

Referencias

1. Zeng, B., et al., *A multi-level approach to active distribution system planning for efficient renewable energy harvesting in a deregulated environment*. Energy, 2016. **96**: p. 614-624.
2. Ming, Y. et al., *Multi-objective optimization using no dominated sorting genetic algorithm-II for allocation of energy conservation and renewable energy facilities in a campus*. Energy and Buildings, 2016. **122**: p. 120-130.
3. Zografidou, E., et al., *Optimal design of the renewable energy map of Greece using weighted goal-programming and data envelopment analysis*. Computers & Operations Research, 2016. **166**: p. 313-326.
4. Wang, R. et al., *An efficient multi-objective model and algorithm for sizing a standalone hybrid renewable energy system*. Energy, 2017. **141**: p. 2288-2299.
5. Li, L., et al., *A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems*. Computers and Chemical Engineering, 2018. **115**: p. 213-225.
6. Bracco, S. et al., *Energy planning of sustainable districts: Towards the exploitation of small size intermittent renewables in urban areas*. Applied Energy, 2018. **228**: p. 2288-2297.
7. Abdelkader, A. et al., *Multi-objective genetic algorithm based sizing optimization of a standalone wind/PV power supply system with enhanced battery/supercapacitor hybrid energy storage*. Energy, 2018. **163**: p. 351-363.

8. Moreno, C., et al., *Doce preguntas y respuestas sobre Energía Eólica*, 2017. Vol.2. Editorial Cubasolar: La Habana.
9. Arzola, J., *Sistemas de Ingeniería*, 2012. Editorial Félix Varela: La Habana.
10. Manwell, J.F., et al., *Wind energy explained. Theory, design and application* 2011. 2da Edición.
11. Medrano, J.A., et al., *Estudio de prefactibilidad técnica del aprovechamiento del viento como recurso energético en zonas pre-montañas*. Ingeniería Energética, 2019. **40**(3): p. 223-233.
12. Medrano, J.A., et al., *Influencia de la turbulencia en la producción energética un aerogenerador instalado en Santa Cruz del Norte*. Ingeniería Energética, 2018. **40**(1): p. 53-62.
13. Martheyn, G.A., et al., *Diseño de un prototipo de turbina eólica clase híbrido para bajas corrientes de aire*. Revista Cubana de Ingeniería, 2017. **8**(1): p. 30-37.
14. Moreno, C., et al., *Doce preguntas y respuesta sobre Energía Eólica*, 2017. Vol.1. Editorial Cubasolar: La Habana.

Conflicto de intereses

El presente trabajo no entra en conflicto de intereses con ningún trabajo previamente publicado, persona o institución.

Contribución de los autores

Conrado R. Moreno Figueredo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8996-3205>

Participó en el diseño de la investigación y en la escritura del manuscrito

José Augusto Medrano Hernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-3748>

Participó en el diseño de la investigación, en búsqueda de información acerca del tema y revisión del manuscrito.

José Arzola Ruiz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-2245>

Participó en la concepción y formulación del modelo matemático.

Arnold Janssens. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4950-4704>

Participó en la concepción y formulación del modelo matemático.