



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

34



Caracterización del nivel de gestión energética en la organización.....	1
Nuevos materiales en la fabricación de tanques termoacumuladores para calentadores solares de agua	11
Aspectos técnicos, climáticos, logísticos y de otros tipos que son relevantes para el desarrollo sostenible de los futuros parques eólicos en Cuba	18
Modelo matemático para estimar el consumo de energía eléctrica en instalaciones de la educación superior	41
Introducción de sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) en el alumbrado público de las ciudades	51

Caracterización del nivel de gestión energética en la organización

Characterization of the level of energy management in the organization

Por Alejandro González García y Sergio Corp Linares***

** Máster en Gerencia de Ciencia y la Innovación, Especialista del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), Profesor del Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba. ** Doctor en Ciencias Técnicas, Especialista del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), Profesor del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba e-mail: alex@cubaenergia.cu y sergio@cubaenergia.cu*

Resumen

En el trabajo se presenta los principales elementos metodológicos que permiten caracterizar el nivel de gestión energética en una organización, basado en el enfoque gerencial de la gestión del conocimiento en energía. Su aplicación puede extenderse, también, a otros contextos: comunidad, municipio, provincia y nación.

Palabras clave: nivel de gestión energética, gestión del conocimiento en energía, análisis estructural, análisis de tendencias, análisis causal

Abstract

The paper presents the main methodological elements that allow characterizing the level of energy management in an organization, based on the managerial approach of knowledge management in energy. Its application can also be extended to other contexts: community, municipality, province and nation.

Key words: energy management level, knowledge management in energy, structural analysis, trend analysis, causal analysis

Introducción

La Gestión Energética o Administración de Energía, como subsistema de gestión, abarca las actividades de administración y aseguramiento de la función gerencial que le confieren a la organización la aptitud para satisfacer eficientemente sus necesidades energéticas [Borroto y Monteagudo, 2002].

Sobre el nivel de gestión energética alcanzado en la organización, Borroto [2009] reconoce que resulta necesario caracterizarlo, tanto al inicio de la implementación de un sistema de gestión energética para establecer el punto de partida o línea base, como periódicamente, para evaluar los avances que se logran y las insuficiencias que persisten en el proceso. Apunta, además, que ello se puede realizar utilizando diversos métodos y herramientas, las cuales evalúan comúnmente seis aspectos claves de la gestión energética: Política Energética, Organización, Información y Comunicación, Monitoreo y Control, Divulgación y Capacitación e Inversiones.

Desde nuestro punto de vista, la organización debe dedicar significativos esfuerzos a caracterizar el comportamiento de la gestión energética como proceso, siempre desde una mirada sistémica que le permita determinar: qué variables energéticas lo describen, cómo se relacionan entre ellas y cuáles resultan esenciales a la evolución del proceso, pues sobre estas se han de priorizar las acciones para el cumplimiento de sus objetivos, además de incluir la medición en el tiempo de cada una de las variables energéticas para determinar su estado y el análisis de las causas que conllevan al mismo.

Por ello, la caracterización del nivel de gestión energética debe sustentarse en la gestión del conocimiento en energía, definida como el proceso de identificación, adquisición, creación, conservación, diseminación y uso del conocimiento en energía, para soportar los cambios que procuren la institucionalización de la gestión energética en la organización (Fig. 1). El conocimiento en energía es considerado, en este contexto, a través de sus dos componentes fundamentales: tácito (alojado en la mente de los especialistas y demás personas que en la organización aparecen directa o indirectamente relacionados con la gestión energética) y explícito (registrado en la documentación sobre el desempeño energético histórico de la organización y de carácter corporativo).



Fig. 1. Modelo para la institucionalización de la gestión energética en la organización.

En esta propuesta, también, la caracterización del nivel de gestión energética se realiza, en lo fundamental, en las fases de diagnóstico y evaluación del proceso.

Análisis estructural del proceso de gestión energética

El análisis estructural como herramienta de estructuración de ideas en grupos de trabajo, ofrece la posibilidad de describir un sistema con la ayuda de una matriz, poniendo en relación todos sus elementos constitutivos [Godet, 2001]. Estudiando esta relación, el método permite hacer aparecer las variables claves o esenciales a la evolución del sistema, sobre las que hay que actuar en tanto dinamizan el comportamiento del mismo para el cumplimiento de sus objetivos.

En nuestro caso, el análisis estructural comprende las fases siguientes:

Fase 1: Listado de las variables energéticas

Se enumera el conjunto de variables energéticas que caracterizan al proceso de gestión energética como sistema de estudio, e incluye tanto las variables internas como las externas o del entorno. La explicación detallada de las variables energéticas es indispensable, toda vez que facilita el seguimiento del análisis y la localización de relaciones entre dichas variables.

En el curso de esta fase conviene ser lo más exhaustivo posible, y no excluir a priori ninguna pista de investigación. Además de las reuniones de reflexión colectiva y las tormentas de ideas, es aconsejable alimentar el listado de variables energéticas mediante conversaciones libres con personas que sean actores del proceso de gestión energética.

En el marco de una investigación preliminar realizada [González y Corp, 2011], se obtuvo la propuesta de un listado de 32 variables (Tabla 1), las cuales se derivaron a partir de su asociación con los problemas para la gestión energética descritos en la literatura consultada sobre la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía.

Tabla 1. Lista de variables energéticas

1. Sostenibilidad energética (V1)
2. Desempeño energético (V2)
3. Compromiso de la dirección (V3)
4. Política energética (V4)
5. Institucionalización de la gestión energética (V5)
6. Estructura organizativa para la gestión energética (V6)
7. Comunicación energética (V7)
8. Sistema de gestión energética (V8)
9. Planificación energética (V9)
10. Personal clave para la eficiencia energética (V10)
11. Competencia energética (V11)
12. Conciencia energética (V12)
13. Motivación para la eficiencia energética (V13)
14. Educación energética (V14)
15. Participación en la gestión energética (V15)
16. Focalización de puestos claves (V16)
17. Sistema de información energética (V17)
18. Control de costos energéticos (V18)
19. Disponibilidad de instrumentación de medición (V19)
20. Revisiones energéticas (V20)
21. Pertinencia del banco de problemas energéticos (V21)
22. Inversiones en eficiencia energética (V22)
23. Nivel de gestión energética (V23)
24. Marco institucional y legislativo para la eficiencia energética (V24)
25. Perfeccionamiento empresarial e institucional (V25)
26. Financiamiento para la eficiencia energética (V26)
27. Motivación social por el ahorro de energía (V27)
28. Cambio tecnológico (V28)
29. Capacidad técnica de la ingeniería local para la eficiencia energética (V29)
30. Programas educativos para la eficiencia energética (V30)
31. Cooperación institucional para la eficiencia energética (V31)
32. Estándar para la implementación del sistema de gestión energética (V32)

De las variables energéticas, son internas al proceso de la V1 a la V23, y externas de la V24 a la V32. La presencia de un número significativo de las variables energéticas internas ha sido corroborada en la norma ISO 50001: 2011 *Sistemas de gestión de la energía*.

Requisitos con orientación para su uso [International Standard Organization, 2011].

Fase 2: Descripción de relaciones entre variables energéticas

Facilita la comprensión sistémica de la gestión energética como proceso, partiendo de la premisa de que bajo un prisma de sistema, una variable existe únicamente por su tejido relacional con las otras variables.

Consiste en el llenado de la relación entre las variables energéticas en una matriz relacional (Fig. 2). Se asigna el valor 1 si existe influencia directa de la variable *i* sobre *j*, y 0 si no existe.

	1: V1	2: V2	3: V3	4: V4	5: V5	6: V6	7: V7	8: V8	9: V9	10: V10	11: V11	12: V12	13: V13	14: V14	15: V15	16: V16	17: V17	18: V18	19: V19	20: V20	21: V21	22: V22	23: V23	24: V24	25: V25	26: V26	27: V27	28: V28	29: V29	30: V30	31: V31	32: V32
1: V1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2: V2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3: V3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4: V4	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5: V5	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6: V6	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7: V7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8: V8	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9: V9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10: V10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11: V11	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12: V12	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13: V13	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14: V14	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15: V15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16: V16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17: V17	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18: V18	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19: V19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20: V20	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21: V21	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22: V22	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23: V23	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24: V24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25: V25	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26: V26	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27: V27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28: V28	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29: V29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30: V30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31: V31	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32: V32	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 2. Vista de una matriz relacional de influencias directas entre variables energéticas.

Esta fase de relleno de la matriz sirve para plantearse a propósito de *n* variables, *n**x**n*-1 preguntas, algunas de las cuales hubieran caído en el olvido a falta de una reflexión sistemática y exhaustiva. Este procedimiento de interrogación hace posible no solo evitar errores, sino también ordenar y

clasificar ideas, dando lugar a la creación de un lenguaje común en el seno del grupo; de la misma manera, ello permite redefinir las variables y en consecuencia, afinar el análisis del sistema.

Fase 3: Identificación de las variables claves

La identificación de las variables claves se logra, en primer lugar, mediante una clasificación directa (de realización fácil) y, posteriormente, por una clasificación indirecta.

En la clasificación directa (derivada de la matriz relacional), los impactos en línea indican la importancia de la influencia de una variable sobre las restantes, y para el conjunto significa el nivel de motricidad directa. El total en columna indica el grado de dependencia de una variable (nivel de dependencia directa).

En la clasificación indirecta, se descubren las variables ocultas gracias a la multiplicación matricial aplicada a la clasificación directa, a través del programa MICMAC (Fig. 3). Este programa permite estudiar la difusión de impactos por los caminos y los bucles de retroacción, y como consecuencia se obtiene la jerarquización de las variables: por orden de influencia, teniendo en cuenta el número de caminos y bucles de longitud 1, 2,...n salidos de cada variable; y por orden de dependencia, teniendo en cuenta el número de caminos y bucles de longitud 1, 2,... n llegados a cada variable.

The screenshot shows the MICMAC software interface. The main window is titled 'Micmac - energetica'. It features a menu bar (Fichero, Edición, Visualiza, Datos, Resultados, Seguimiento del taller, Ventana) and a toolbar. On the left, there is a navigation pane with options like 'Acceso al módulo de ayuda', 'Descripción de los participantes en el estudio', 'Toma de datos', 'Variables', 'Parámetros de cálculo', 'Matriz de Influencias Directas (MID)', and 'Matriz de Influencias Directas Potenciales (IP)'. The central area displays a 'Lista de variables' table with columns for 'Nº', 'Título largo', 'Título corto', 'Descripción', and 'Tema'. Below this, there is a 'Matriz de Influencias Directas (MID)' window showing a grid of 0s and 1s representing the relationships between variables V1 through V17.

Nº	Título largo	Título corto	Descripción	Tema
1	Sostenibilidad energética	V1		
2	Desempeño energético	V2		
3	Compromiso de la dirección	V3		
4	Política energética	V4		
5	Institucionalización de la gesti...	V5		
6	Estructura organizativa para l...	V6		
7	Comunicación energética	V7		
8	Sistema de gestión energética	V8		
9	Planificación energética	V9		
10	Personal clave para la eficien...	V10		
11	Competencia energética	V11		
12	Conciencia energética	V12		
13	Motivación para la eficiencia ...	V13		
14	Educación energética	V14		
15	Participación en la gestión en...	V15		
16	Focalización de Puestos clav...	V16		
17	Sistema de información enero...	V17		

	1: V1	2: V2	3: V3	4: V4	5: V5	6: V6	7: V7	8: V8	9: V9	10: V10	11: V11	12: V12	13: V13	14: V14	15: V15	16: V16	17: V17	18:	19:	20:
1: V1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2: V2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
3: V3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4: V4	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5: V5	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
6: V6	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
7: V7	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
8: V8	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9: V9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10: V10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fig. 3. Vista de los datos de entrada (lista de variables energéticas y matriz relacional de influencia directa) en el programa MICMAC.

Los resultados, en términos de influencia y dependencia de cada variable energética, se representan sobre un plano (Fig. 4), en el cual las variables energéticas claves resultan las más motrices y poco dependientes, apareciendo ubicadas en el sector superior izquierdo; y es sobre ellas que se han de priorizar las acciones articuladas en un programa de gestión energética orientado a la elevación de la eficiencia energética (como componente del desempeño energético de la organización) de cara al logro de su sostenibilidad energética.

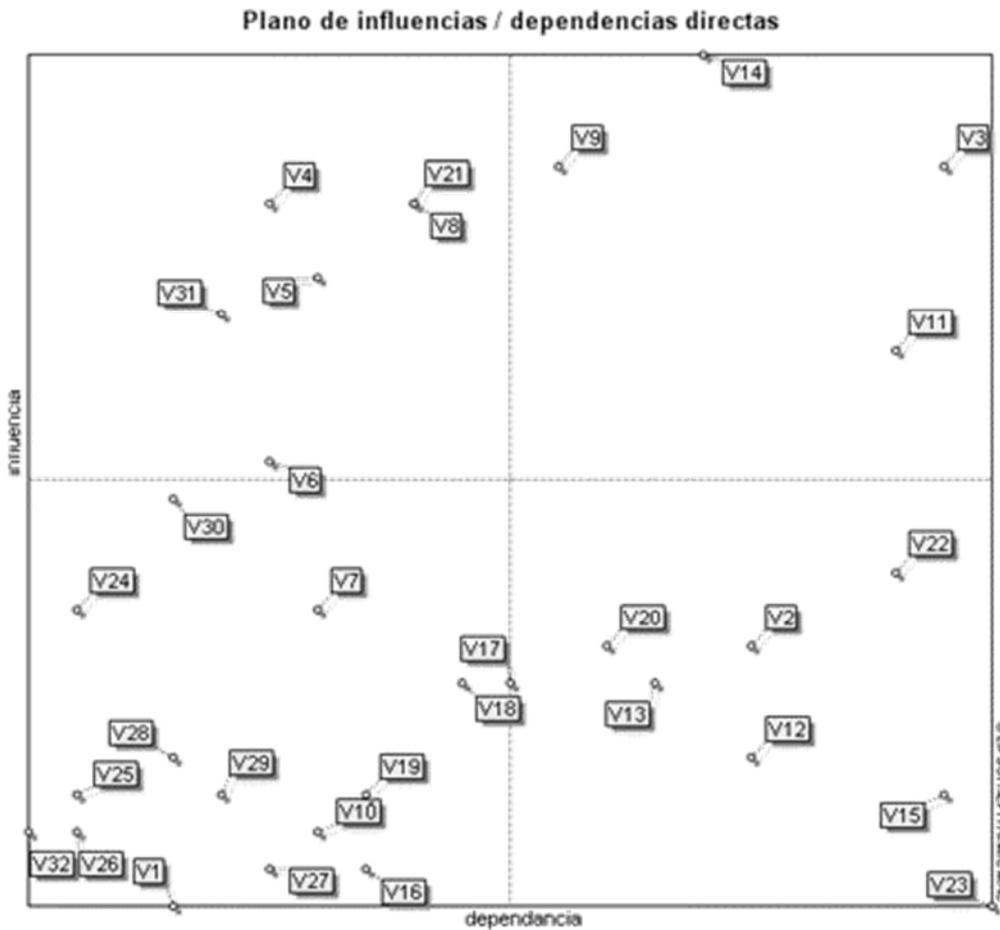


Fig. 4. Plano de influencia-dependencia de las variables energéticas en el programa MICMAC.

Análisis de tendencias del proceso de gestión energética

El análisis de tendencias comprende la medición en el tiempo de cada una de las variables energéticas, pudiendo tomar los valores: Alto (3), Medio (2), Bajo (1) y Nulo (0), según sea su comportamiento en correspondencia con lo expuesto en la Matriz de Gestión Energética (Tabla 2).

En este estudio se asumen como valores válidos para el nivel Medio de desempeño de cada una de las variables energéticas, las recomendaciones establecidas en la norma ISO 50001: 2011. Puede que, en otros casos, resulte pertinente su homologación con un nivel Alto de desempeño, lo cual requeriría de una recomposición del resto de los niveles en la Matriz.

En el caso de la variable *nivel de gestión energética* su comportamiento queda determinado, de una manera simplificada, a partir del promedio de los valores alcanzados por las variables que la afectan directamente.

Tabla 1. Valores de algunas de las variables energéticas (internas y externas) presentes en la Matriz de Gestión Energética

Variable	Valor			
	3-Alto	2-Medio	1-Bajo	0-Nulo
Sostenibilidad energética	La organización realiza un manejo adecuado de las capacidades para satisfacer sus necesidades energéticas actuales, sin poner en riesgo la satisfacción futura de dichas necesidades. Implica: predominio de las fuentes renovables de energía en su matriz energética, uso de tecnologías energéticas eficientes, e institucionalización definitiva del proceso de gestión energética.	La organización logra la satisfacción de las necesidades de energía actuales, sin poner en riesgo la satisfacción futura de dichas necesidades. Promueve la introducción gradual de fuentes renovables de energía y de tecnologías energéticas eficientes en sus procesos, así como la implementación de un Sistema de Gestión Energética (SGEn) avanzado.	La organización alcanza a satisfacer sus necesidades de energía actuales. La presencia de combustibles fósiles predomina en su matriz energética, y se realizan inversiones en ahorro y conservación de la energía.	La organización no alcanza a satisfacer sus necesidades de energía actuales.
Institucionalización de la gestión energética	La organización alcanza la formalización definitiva del proceso de gestión energética y su certificación a partir del cumplimiento de los requisitos de las normas ISO 9001:2008 e ISO 50001:2011. Las lecciones aprendidas, derivadas de la sistematización del proceso de gestión energética, retroalimentan y mejoran la práctica.	La organización prioriza la formalización del proceso de gestión energética, lo cual requiere: designación del responsable del proceso, constitución del equipo de trabajo, elaboración del mapa de proceso, establecimiento de objetivos básicos y metas del proceso, establecimiento de indicadores de medición del proceso, diagnóstico del proceso, implantación del proceso, evaluación del proceso, y mejoramiento continuo del proceso.	La gestión energética ocupa un lugar secundario en las prioridades de la organización. No está formalizada como proceso.	La organización no realiza sistemáticamente actividades vinculadas a la gestión energética.

Variable	Valor			
	3-Alto		3-Alto	
Capacidad técnica de la ingeniería local para la eficiencia energética	Experiencia de la ingeniería local en la transferencia de tecnologías energéticas eficientes y tecnologías basadas en el uso de las fuentes renovables de energía, así como en la implementación de SGEs avanzados.	Movilizada la capacidad técnica de la ingeniería local para la realización de proyectos demostrativos de eficiencia energética en el territorio.	Adecuada capacidad técnica de la ingeniería local para la eficiencia energética.	Limitada capacidad técnica de la ingeniería local para la eficiencia energética.

Análisis causal del proceso de gestión energética

Una vez caracterizado el estado de cada una de las variables energéticas y conociendo de antemano la estructura de la red de relaciones entre ellas, se procede a analizar las causas que están incidiendo en el proceso de gestión energética.

Así, por ejemplo, si se quiere conocer si el estado actual de la *sostenibilidad energética* de la organización pudiera ser provocado por el *nivel de gestión energética* que se logra, habría que verificar si esta última tiene influencia sobre la primera, mediante el análisis de la red de relaciones (Fig. 2). De dicho análisis podría desprenderse, al menos, que:

- No existe una influencia directa, ni indirecta entre estas variables.
- Existe una influencia directa de la segunda sobre la primera. Entonces, un estado problemático en la primera podría estar siendo resultado de un estado problemático asociado a la segunda.
- Existe una influencia directa de la segunda sobre la primera; sin embargo, un estado problemático en la primera podría no ser derivado, absolutamente, de un estado problemático de la segunda. Ello pudiera explicarse por la predominancia de la influencia de otras variables energéticas sobre la primera.
- Existe una relación de influencia indirecta de la segunda sobre la primera, a través de otras variables energéticas. Entonces el análisis causal resultaría más complejo, ya que debe ser verificado el estado actual de cada variable energética intermedia y su posible influencia sobre el estado actual de la primera.

Aún cuando son necesarios tales tipos de análisis complejos de influencia entre variables energéticas, lo más procedente es privilegiar una mirada sistémica del proceso de gestión energética.

Conclusiones

La aplicación práctica de esta propuesta metodológica (que comprende el análisis estructural, de tendencias y causal de la gestión energética) para la caracterización del nivel de gestión energética alcanzado en la organización, facilitaría:

- La comprensión sistémica de la gestión energética como proceso.
- La verificación del cumplimiento, en el proceso de gestión energética, de los requisitos establecidos por la norma ISO 50001: 2011 *Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso*.
- El trabajo creativo en grupo, requerido también para el análisis y mejora continua de los demás procesos de la organización, asentándose una cultura para identificar, adquirir, crear, compartir y usar el conocimiento organizacional.

De igual modo, su aplicación podría extenderse a la gestión energética en una comunidad, municipio, provincia o nación.

Bibliografía

- BORROTO, A. Gestión Energética Empresarial. Asignatura de la Especialización en Gerencia Energética. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riombamba, Ecuador, 2009.
- BORROTO, A. Y J. P MONTEAGUDO. Gestión y Economía Energética. Cienfuegos: Ed. Universo Sur, 2002. ISBN 959-257-114-7.
- GODET, M. Creating Futures Scenario Planning as a Strategic Management Tool. Manual de prospective stratégique, Tome 2; Editions Dunod 2001; Editions Economica, 2001.
- GONZÁLEZ, A. Y S. CORP. La caracterización del nivel de gestión energética de la organización. Boletín GConocimiento, Volumen 2; Número 8; Agosto 2011. ISSN 2219-6927. 2011.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 50001: 2011 Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso. 2011.

Nuevos materiales en la fabricación de tanques termoacumuladores para calentadores solares de agua

New materials in the manufacture of thermal storage tanks for solar water heaters

Por Antonio González Prieto y Carlos Daiyan Lugo Buchillón**

** Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA),
La Habana, Cuba.e-mail: tonycubaenergia.cu*

Resumen

Con el uso de los nuevos materiales en la fabricación de tanques termoacumuladores para sistemas solares de calentamiento de agua, del tipo termosifónico e individual, tanto para colectores solares planos de tubo y aleta, como para colectores de tubos al vacío, se encuentra la solución a una de las limitaciones fundamentales que tiene la generalización de los calentadores solares, en el sector residencial. Se trata de la sustitución de los aceros inoxidable por polímeros y copolímeros, presentando resultados en las pruebas fisicoquímica y bacteriológica del agua, con una calidad apta para el consumo humano. Durante el trabajo se compararon y evaluaron indicadores de los dos equipos, como el costo, superficie de captación, costo por metro cuadrado, temperatura de entrada y salida del agua, capacidad de entrega de agua caliente y costo por litro de agua caliente entregado.

Palabras clave: calentadores solares, tanques termoacumuladores, ahorro, vida útil

Abstract

The use of new materials in the manufacturing of storage tanks for solar water heating systems of thermosiphonic technology, both for flat solar collectors of tube and fin, and for evacuated tube collectors, is the solution to one of the main limitations of the generalization of solar heaters in the residential sector. The point is the substitution of the stainless steel parts by polymers and copolymers, with good results in the physicochemical and bacteriological tests of the water, with a suitable quality for human consumption. During the research that led to the current paper, indicators of the two equipments were compared and evaluated, such as cost, catchment area, cost per square meter, inlet and outlet water temperature, hot water delivery capacity and cost per liter of hot water delivered.

Keywords: solar heaters, thermal storage tanks, saving, lifespan

Introducción

Un calentador solar de agua es un equipo que calienta agua con la energía de la radiación solar. Un buen calentador equipo con un adecuado mantenimiento puede durar más de 20 años. Los calentadores solares sustituyen, en primer lugar, la importación de combustibles y las costosas instalaciones para producir la electricidad que se emplea en la generación del calor.



Fig1. Calentador solar.

Los beneficios del uso de los calentadores solares de agua se clasifican en económicos y ambientales.

Económicos: Con estos calentadores se puede satisfacer la mayoría de la demanda de agua caliente.

Ambientales: Su uso mejora el entorno ambiental y disminuye la emisión de gases de efecto invernadero.

Se estima que, como mínimo, cada familia de cuatro personas de un nivel medio de vida, en las condiciones climáticas de Cuba, necesite al menos un calentador solar de un metro cuadrado de superficie de captación.

Las partes de un calentador solar son: el colector, absorbedor que capta la energía del sol; el termotanque, donde se almacena el agua caliente, y la estructura que soporta esos dispositivos.

Los tanques termoacumuladores, o comúnmente llamados termos, están formados por tres partes fundamentales:

1. Tanque interior, que está en contacto directo con el agua a calentar.
2. Aislamiento térmico, que permite evitar las pérdidas térmicas del agua una vez que alcanzan altas temperaturas.
3. Tanque exterior, es el que protege del intemperismo al aislamiento térmico, pues este último no es resistente a los rayos ultravioletas, el agua y la humedad.



Fig. 2. Tanque termoacumulador.

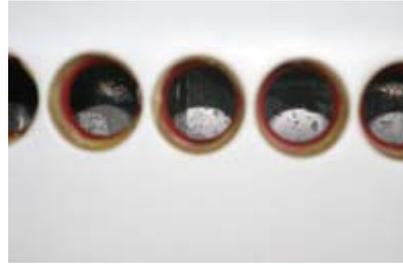


Fig. 3. Aislamiento térmico.

Los actuales precios de los metales, y en específico del acero, así como su tendencia al crecimiento constante, es la causa que nos lleva a proponer la innovación siguiente.

Con los nuevos materiales en la fabricación de tanques termoacumuladores para sistemas solares de calentamiento de agua, del tipo termosifónico e individual, tanto para colectores solares planos de tubos y aletas, como para colectores de tubos al vacío, se encuentra la solución a una de las limitaciones fundamentales que tiene la generalización de los calentadores solares, en el sector residencial.

Objetivo

Disminuir los costos de los equipos, aumentar su vida útil y disminuir los períodos de amortización de las inversiones, mediante la introducción de polietilenos de media intensidad lineal, o copolímeros, así como de mezclas de los mismos, en la fabricación de tanques termoacumuladores, para calentadores solares de agua de sistemas termosifónicos individuales, tanto para colectores planos, como para colectores solares de tubos al vacío.

Lo novedoso es el uso por primera vez de plásticos para estos fines, con un costo muy inferior, alrededor de 50%, y una vida útil muy superior, más del doble de la tradicional, lo que incide en los períodos de amortización de las inversiones de una forma muy positiva, con una reducción de alrededor de 40%.

Desarrollo

Primeramente se realizó un estudio de mercado para valorar las posibilidades potenciales de uso del calentador.

La fuente energética es prácticamente ilimitada con respecto a las necesidades, ya que la misma existirá mientras siga la vida en el planeta. La demanda de calentadores solares en el país es ilimitada, mucho mayor que las capacidades anuales de fabricación.

Experimentos realizados confirman que estamos ante a una tecnología madura, de muy rápida recuperación, concentrándose su uso en instalaciones hoteleras y de turismo, hospitales y similares, hogares de ancianos y maternos, residencias estudiantiles universitarias, cocinas centralizadas y centros de elaboración de alimentos, instalaciones porcinas, ordeños mecánicos, centros de recría, círculos infantiles y las viviendas.

Luego se realizó la fabricación de un prototipo de tanque termoplástico de forma rústica, para ser evaluado comparativamente con el calentador de TV Chino Linuo Paradigma.

A continuación se ilustran las etapas constructivas del prototipo (fig. 4).



Fig. 4. Etapas constructivas del prototipo.

Resultados de las evaluaciones de los equipos

En las tres tablas siguientes se muestran los resultados comparativos obtenidos para el período de 157 días de evaluación, comprendido entre el 1ro. de diciembre de 2008 y el 31 de mayo de 2009, entre el prototipo de CUBAENERGÍA y el calentador de TV Chino Linuo Paradigma.

Tabla 1. Valores acumulados Período de mediciones: 157 días (1ro. de diciembre de 2008 a 31 de mayo de 2009)

Indicadores	U/M	CUBAENERGÍA	Chino
Costo del equipo	CUC	80,00	166,00
Superficie de captación	m ²	1,20	1,20
Costo/m ² calent.	CUC	75,00	138,33
Temp. de entrada de agua	°C	25	25
Radiación promedio	kWh/m ² día	4,8	4.8
Litros de agua a 40 °C/equipo	L/día	159	160
Litros de agua a 40 °C/m ²	L/día	132	133
Eficiencia	%	49	49
Costo/L 40 °C	CUC	0,50	1,04

Tabla 2. Valoración económica y aporte social

Parte del calentador	Chino	Tanque plástico
Descripción	CUC	CUC
Estructura soporte	16,00	16,00
Tubos al vacío	28,00	28,00
Tanque termo	122,00	36,00
Total	166,00	80,00

Tabla 3. Vida útil

Tipo de calentador	Vida útil (años)
Calentador chino	15
Calentador tanque plástico	30
Diferencia	15

Para el caso específico de la vivienda cubana, donde existen más de tres millones de núcleos familiares, si se instalaran calentadores solares en al menos un millón de viviendas, y cada equipo instalado desplazase del consumo, como mínimo, 1 kWh de electricidad al día, se ahorraría un millón de kWh al día, y si tuviésemos en cuenta la disminución de la demanda en el horario pico, el país dejaría de hacer por algunos años inversiones en la generación de electricidad debido al crecimiento normal del consumo en el sector doméstico.

Si tenemos en cuenta que en Cuba 90% de la población tiene como combustible doméstico la electricidad, podemos estimar la potencialidad de ahorro solamente en el sector doméstico.

Conclusiones

La presente propuesta es positiva y se relaciona con la rama energética, mediante el uso de las fuentes renovables de energía, y en específico con la energía solar, debido a la disminución considerable de los costos con la aplicación de materiales plásticos en la fabricación de los tanques termoacumuladores, obtenidos por roto moldeo o por extrusión, con polímeros, copolímeros o mezclas de los mismos, en dependencia de las temperaturas de trabajo de los equipos.

Con el cambio del material del tanque, el costo del equipo se reduce a la mitad, lo que significa un considerable ahorro al país en la producción de estos calentadores.

Recomendaciones

Se conoce el uso de los tanques termos desde que existen calentadores solares de agua de los tipos de colector plano de tubo y aleta, y de colector de tubos al vacío. Siempre ha sido un requisito indispensable almacenar el agua caliente, y ello fue resuelto siempre con el uso de los metales, lo cual limitaba la vida útil de los equipos, sobre todo en clima tropical, y

aumentaban sus costos con el uso de recubrimientos, resinas y la vitrificación.

Por lo cual, recomendamos:

4. Reconocer los elementos expuestos en este trabajo, con el objetivo de hacer series cero de producciones, dados los resultados obtenidos en el estudio realizado.
5. La generalización de esta innovación debe pasar por todos los procesos de asimilación de nuevas producciones y nuevos equipos, como prueba de tropicalización, estudios de eficiencia térmica, durabilidad y pruebas hidráulicas para los distintos modelos a fabricar.

Bibliografía

BÉRRIZ L, ÁLVAREZ M. *Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares*. Editorial: CUBASOLAR, 2008.

GONZÁLEZ A.R., LÓPEZ O. Y LUGO C.D. «Nuevos materiales en la fabricación de tanques termoacumuladores para sistemas solares de calentamiento de agua». CUBAENERGÍA. Ponencia presentada en el XVII Fórum a nivel Provincial, 2009.

ISO 9459-2:1995, Solar heating-- Domestic water heating systems-- Part 2: *Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems*, 1995.

JANSON, LARS-ERIC. *Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal*, VBB/SWECO International, Suecia. 1999.

Purified Water, Official Monographs, USP-23. «Purified Water. Official Monographs USP-24». The United States Pharmacopeia the National Formulary, 1995. The United States Pharmacopeia the National Formulary, 1998.

Aspectos técnicos, climáticos, logísticos y de otros tipos que son relevantes para el desarrollo sostenible de los futuros parques eólicos en Cuba

Technical, climatic, logistic and other aspects that are relevant for the sustainable development of future wind farms in Cuba

Por Ing. Guillermo Leiva Viamonte e Ing. Adonis Pérez Lorenzo***

** Jefe del Grupo Ingeniería, UEB Energías Renovables, INEL, Unión Eléctrica, MINBAS, Cuba.*

*** Jefe de Operación del Parque Eólico Demostrativo Isla de Turiguanó, Empresa Eléctrica Ciego de Ávila, Unión Eléctrica, MINBAS, Cuba.
e-mail: leiva@inel.une.cu*

Resumen

Los aerogeneradores que integrarán los futuros parques eólicos cubanos y la penetración de potencia eólica en el Sistema Eléctroenergético Nacional (SEN) deberán evaluarse considerando características climáticas, cualidades técnicas de la red eléctrica y condiciones logísticas que impondrán exigencias específicas a los aerogeneradores y demás equipos tecnológicos y auxiliares, debido a que los avances en la industria eólica han surgido y madurado principalmente en Europa o en países con alto desarrollo y climas muy distintos al nuestro. Este trabajo presenta varias consideraciones específicas sobre temas muy sensibles, como son la debilidad del sistema eléctrico cubano, vulnerable a cortes de sus líneas de transmisión, con voltaje inestable en extremos de red, sin poder intercambiar energía con sistemas vecinos y con nuevas condiciones creadas por la instalación progresiva de cientos de MW en grupos electrógenos, principalmente de fuel oil; las limitaciones de izaje en los puertos y para los montajes tecnológicos, de medios de transporte de gran capacidad, del estado técnico de carreteras y vías férreas, de los gálibos bajo los puentes y componentes de gran peso y tamaño de los aerogeneradores; el severo ambiente de trabajo, con elevada corrosión y contaminación que impone el clima tropical húmedo y altas concentraciones de aerosoles marinos, a lo que se suman los riesgos asociados a los huracanes de gran intensidad, los rayos de tormentas locales severas y las inundaciones costeras.

Palabras clave: Aerogeneradores, velocidad variable, clases de diseño, generación distribuida, logística, requisitos de contratación

Abstract

The wind turbines that will integrate the future Cuban wind farms and the penetration of wind power in the National Electric Energy System (SEN) should be evaluated considering climatic characteristics, technical attributes of the electrical network and logistical conditions that will impose specific demands on wind turbines and other technological and auxiliary equipment, because the advances in the wind industry have emerged and matured mainly in Europe or in countries with high level of development and very different climates to ours. This paper presents several specific considerations on very sensitive issues, such as: the weakness of the Cuban electric system vulnerable to cuts in its transmission lines with unstable voltage at network ends, without being able to exchange energy with neighboring systems and with new conditions created by the progressive installation of hundreds of MW in generators, mainly fuel oil-fired. On the other hand there are limitations of pulling up power in the ports and for technological assemblies, lack of high-capacity means of transport. Besides, we have to consider the technical conditions of roads and railways, the galibos under the bridges and wind turbines heavy components of great size in addition to the severe working environment, characterized by high corrosion and pollution due to the humid tropical climate and high concentrations of marine aerosols, as well as the risks associated with high intensity hurricanes, severe local storm surges and coastal flooding.

Keywords: Wind turbines, variable speed, design classes, distributed generation, logistic, hiring requirements

Introducción

Los futuros parques eólicos cubanos deberán desarrollarse considerando características climáticas, cualidades técnicas de la red eléctrica y condiciones logísticas, que impondrán exigencias específicas a los aerogeneradores y demás equipos tecnológicos, porque los desarrollos en la industria eólica mundial han surgido y madurado principalmente en Europa o en países con alto desarrollo y climas muy distintos al de Cuba. Este trabajo expone algunos factores específicos a considerar en el diseño de nuestros parques eólicos y la selección de sus aerogeneradores, siendo relevantes:

- El Sistema Eléctroenergético Nacional (SEN) cubano es débil, vulnerable a cortes de líneas, con voltaje inestable en extremos de red y sin posibles intercambios de energía con sistemas vecinos. La penetración eólica y las tecnologías de los aerogeneradores se determinarán para su capacidad de transferencia de potencia reactiva, estabilidad de frecuencia, tensión y potencia de regulación,

- considerando las nuevas condiciones a partir de la instalación de cientos de MW en grupos electrógenos, principalmente de fuel oil.
- Se deberán identificar las limitaciones de los puertos, capacidades de transportación, estado técnico de carreteras, vías férreas y gálibos bajo los puentes y componentes mayores de los aerogeneradores. Gran importancia tendrá adquirir grúas de alta capacidad para izar los aerogeneradores, o evaluar su costo de arrendamiento.
 - En el clima tropical húmedo de Cuba con influencia marítima, el régimen general del viento es dominado por la prolongada influencia durante el año del anticiclón del Atlántico, modificado por las condiciones físico-geográficas locales. Las velocidades extremas ocurren por influencia de huracanes de gran intensidad, cuya frecuencia se ha caracterizado para cada región del país, pero deberán precisarse sus riesgos para las zonas específicas con mayor potencial eólico, lo que condicionará la clase de aerogeneradores a usar para asegurar su durabilidad.
 - Será importante evaluar, además, el efecto del complejo temperatura-humedad y los aerosoles salinos en las costas, que intensifican la corrosión de los metales y los fallos en el aislamiento eléctrico y componentes electrónicos; la frecuencia de rayos durante tormentas severas que pueden causar averías en los aerogeneradores; evaluar la distancia y cota a la que se ubicarán los parques eólicos en el litoral para evitar afectaciones por penetraciones del mar, riesgo que seguramente se incrementará como resultado de los cambios climáticos.

Características importantes de la estructura de generación y las redes del Sistema Electroenergético Cubano próximas a zonas de interés eólico prospectivo

El futuro desarrollo eólico en Cuba ocurrirá en un Sistema Electroenergético Nacional en profunda transformación de su matriz de generación y distribución, desde un esquema centralizado hacia uno basado en generación distribuida. Hasta el 2005, 85% de la generación eléctrica se realizó por centrales termoeléctricas de tecnologías obsoletas ubicadas cerca de centros de cargas importantes, que funcionaron con muy baja disponibilidad, alto consumo específico de crudo nacional con alto azufre y notables emisiones contaminantes, enlazadas por líneas de transmisión de 220 kV y 110 kV a lo largo de la Isla, muy vulnerables a cortes por eventos meteorológicos extremos.

En 2005 el estado decidió iniciar la Revolución Energética, introduciendo aceleradamente la generación distribuida, instalándose hasta el 2007 casi

2 000 MW de grupos electrógenos diésel con consumo 35% menor al del SEN centralizado, y que cubrirán progresivamente demandas pico o averías. Se instalarán hasta 1 200 MW de grupos electrógenos de fuel oil, combustible más barato, que operarán en régimen base y cubrirán 35% de la demanda nacional. Centrales termoeléctricas modernizadas cubrirán cerca de 50% con alta disponibilidad y bajo consumo, y los ciclos combinados con gas aportarán hasta 10%.

La instalación de baterías de fuel oil cerca de las capitales provinciales e importantes objetivos económicos, de nuevas subestaciones de distribución que en condiciones excepcionales pueden reconectarse para crear redes autónomas, y las inversiones para rehabilitar las redes ofrecen al SEN más fiabilidad y flexibilidad, pero originan nuevos comportamientos de la potencia de regulación (MW por Hz) en las redes de distribución y transmisión, que ocasionalmente afectan la estabilidad del sistema y exigen complejas y costosas medidas técnicas de corrección.

La asimetría de consumos eléctricos, muy concentrados hacia Occidente, no cambiará en breve por razones económicas, demográficas y socio-culturales, manteniéndose grandes transferencias de energía por las líneas de transmisión, que disminuirán progresivamente al completarse las nuevas capacidades de generación distribuida.

En este dinámico contexto nace el Programa Eólico basado en el viento, una fuente primaria intermitente que puede sustituir grandes consumos de combustibles, pero cuyo mayor potencial se halla en la región oriental, con menores demandas eléctricas, por lo que gran parte de la electricidad que genere la eólica deberá exportarse por las líneas de transmisión hacia las regiones deficitarias, afectándose con ello su costo de generación y su aprovechamiento neto.

Cualidades de las distintas tecnologías eólicas, en relación con su capacidad para interactuar con las redes eléctricas. Ventajas y desventajas por cada tipo

Las variaciones turbulentas de la velocidad del viento en la escala temporal de segundos a fracciones de segundos, hacen fluctuar la potencia, frecuencia y tensión de salida de las turbinas eólicas, lo que puede mitigarse usando tecnologías apropiadas; sin ellas podrían ocurrir severas perturbaciones en las redes si el sistema al que se conectan es «débil» (con alta relación X/R: redes predominantemente resistivas), que es el caso de enlaces débiles, líneas eléctricas saturadas o en mal estado, y sistemas aislados con alta potencia eólica instalada, no previstos para ese servicio, lo que es común en nuestras zonas con mejor recurso eólico, muy alejadas de las redes más fortalecidas.

La capacidad de distintos esquemas tecnológicos de aerogeneradores para generar corriente compatible con las exigencias de estabilidad de voltaje y frecuencia de la red, controlar la potencia reactiva, sobrepasar huecos de tensión y participar positivamente en su recuperación, son aspectos fundamentales en su selección. Deben considerarse las características siguientes de la generación eólica para integrarla a las redes:

- La potencia de salida de los aerogeneradores es variable y de carácter aleatorio. La eólica no se puede despachar como la generación convencional, sino solo pronosticar patrones de generación diaria, semanal y mensual a partir de estudios previos de cortos a medianos plazos, y de pronósticos meteorológicos para muy cortos plazos.
- El alto gradiente de la potencia que entrega un parque eólico impedirá introducir bruscamente la generación eólica en algunas redes, pues causaría inestabilidad al funcionamiento de la regulación primaria y secundaria del control «potencia-frecuencia» de las centrales convencionales conectadas al sistema.
- La regulación de potencia y tensión a la salida de muchos aerogeneradores es menos precisa que en generadores convencionales y difiere según su tecnología. Los de velocidad fija solo limitan la potencia y compensan la potencia reactiva para mantener el $\cos\phi$ próximo a 1, sin regular tensión; los de velocidad variable regulan potencia y tensión de salida al incorporar controles dinámicos de frecuencia, potencia activa y potencia reactiva en el inversor de salida.
- Por ello, la eólica no participa en el control de potencia-frecuencia-tensión del SEN, según las normativas del Sector Eléctrico, aunque muchos aerogeneradores de tecnología actual pueden controlar esos parámetros, e inclusive formar redes eléctricas aisladas.
- En redes eléctricas débiles, o con alta penetración eólica, puede afectarse la calidad de la energía si se excede la tolerancia de variación de tensión y frecuencia en los sistemas eléctricos ($\pm 5\%$ de la tensión nominal y $\pm 1\%$ de la frecuencia nominal) y por gran consumo de potencia reactiva que causa un bajo factor de potencia.
- Los puntos de conexión común entre el parque y la red tienen que ser fuertes, es decir, con una alta potencia de cortocircuito.
- La generación eólica depende de una generación base eficiente, con alta calidad de la energía y redes en buen estado para lograr alta disponibilidad, más ahorro de combustible y más tiempo de vida de los aerogeneradores y demás componentes.

Hasta fines de los años 90, las tecnologías convencionales con generadores asincrónicos de velocidad de rotación fija, tanto con limitación de potencia por pérdida aerodinámica (*stall regulated*), como con control de potencia por cambio de paso (*pitch regulated*), tienen como debilidad implícita que su protección contra embalamiento del rotor eólico se basa en la rápida reacción de su control a pequeñas fluctuaciones de voltaje y frecuencia de la red, para asegurar su desconexión eléctrica y frenado inmediatos.

Este comportamiento puede ocasionar la desconexión masiva de gran potencia eólica, que en condiciones de muy alta penetración eólica puede causar el colapso del sistema eléctrico local, regional o incluso nacional, lo que puede presentarse durante tormentas locales que impongan en muy corto plazo vientos con velocidad superior a la de seguridad de las máquinas, en eventos de descargas de las líneas por impacto de rayos, cortocircuitos en las redes, huecos de tensión, accidentes de tránsito, y otras causas.

Variantes de la tecnología de velocidad variable son altamente compatibles y ventajosas para las redes eléctricas. La velocidad variable básicamente se refiere a la capacidad del rotor eólico y el tren de potencia para girar a velocidad creciente, al aumentar la velocidad del viento en el rango de carga parcial (entre la velocidad de inicio y la de potencia nominal) y viceversa. Cuando los sistemas de control y acondicionamiento de potencia son bien diseñados y funcionan correctamente, se consiguen varias ventajas notables:

- El rotor eólico actúa como un volante de inercia amortiguando los impactos de grandes fluctuaciones instantáneas de la velocidad del viento, reduciendo los esfuerzos sobre los mecanismos y estructura de la propia máquina.
- El rotor trabaja en puntos de operación próximos a la condición de máximos CP y CL (eficiencia aerodinámica y coeficiente de sustentación) de los perfiles de las palas.
- El convertidor (generalmente electrónico) que debe emplearse tiene la capacidad de acondicionar la corriente a la frecuencia y el voltaje variable que produce el generador, para hacerla compatible con los más estrictos parámetros de la red.
- Muchos modelos incluyen una protección adicional contra pozos de tensión en la red, acoplada al convertidor y que asegura que el generador «no vea» la brusca caída de voltaje, desconectándose de la red durante varios cientos de milisegundos; al restablecerse los parámetros de la red, el generador vuelve a conectarse a ella participando activa y positivamente en su plena recuperación.

Criterios para integrar potencia eólica en los sistemas eléctricos de Cuba

En Cuba hay 5 subsistemas eléctricos a los que se pudieran interconectar parques eólicos:

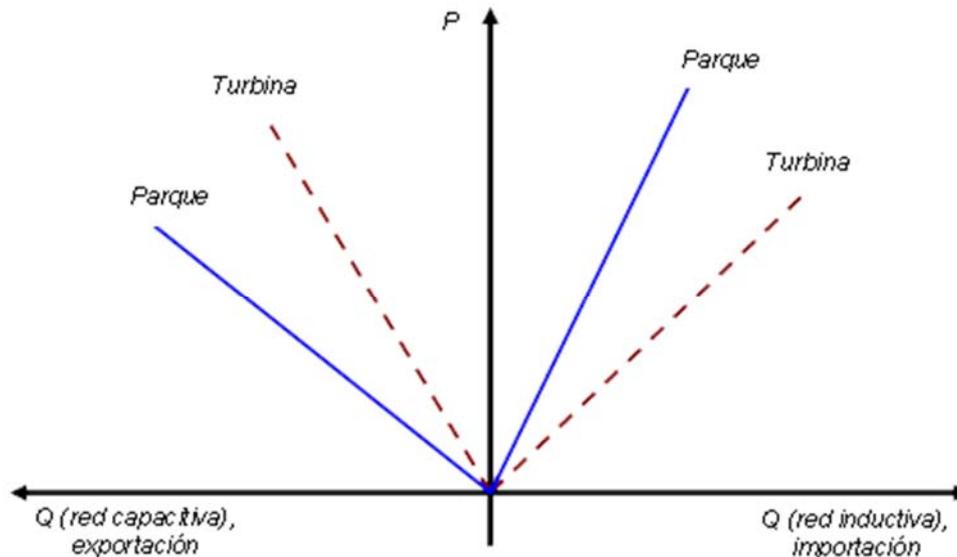
(1) de transmisión a 220 y 110 kV; (2) de subtransmisión a 33 kV; (3) de distribución primaria a 13 kV; (4) sistemas con generación distribuida que pueden aislarse del SEN; y (5) los sistemas aislados del SEN [NC 62-05 y Pérez, 2006]. Es común a todos que su diseño no preveía integrar parques eólicos y, por tanto, su comportamiento puede afectarse por 2 variables principales:

- La potencia eólica a instalar ($P_{eólica}$) y
- La fortaleza de la red, expresada por el cociente $P_{CC} / P_{eólica}$ entre la Potencia de Cortocircuito del sistema (P_{CC}) en el punto de conexión común, y la potencia eólica a instalar ($P_{eólica}$).

Particularmente, los sistemas de distribución primaria a 13 kV, que comúnmente se hallan más próximos a las zonas de mejor recurso eólico (zonas costeras o remotas), son topológicamente radiales, muchos con longitud mayor de 25 km, y por tanto forman enlaces muy débiles con la subtransmisión a 33 kV.

El análisis de impacto de la penetración eólica debe hacerse para el comportamiento estático (régimen permanente) y dinámico (régimen transitorio), junto a un flujo de potencia activa y reactiva.

Como hay sistemas de subtransmisión y de distribución primaria con parques eólicos ya conectados (Parque Eólico Demostrativo de Turiguanó en Morón, Los Canarreos en la Isla de la Juventud y Gibara 1 en Holguín), una forma simple para establecer las características de importación-exportación de potencia reactiva de un parque a partir de valores aproximados de datos de los aerogeneradores, es la característica en «V», como la mostrada en la figura 1.



*Fig. 1. Característica en «V» de un parque eólico.
Fuente: Adonis Pérez Lorenzo*

Se aprecia que la capacidad de regulación del factor de potencia del parque eólico es:

- Inferior a la de cada turbina cuando se desea exportar potencia reactiva a la red.
- Superior cuando se trata de importar potencia reactiva.

Esto permite establecer márgenes de regulación para los parques existentes o nuevos.

Para conectar un parque eólico a la red deben cumplirse condiciones administrativas y técnicas establecidas en normativas que no varían mucho de uno a otro país [Rodríguez, 2003]. Entre las condiciones administrativas, el promotor de un parque eólico debe aportar a la Empresa Eléctrica Provincial donde se emplazará el parque eólico: el número, la potencia y el tipo de generador de aerogeneradores a usar; los datos para calcular las corrientes de cortocircuitos (I_{cc}) y la potencia máxima que entregará ($P_{eólica}$).

En las normativas se indica explícitamente que el funcionamiento del parque eólico no debe producir alteraciones a la red ni funcionar en isla, se fija la potencia máxima individual de los generadores que se pueden conectar a la red de alta tensión, y que en ningún caso podrá usarse más de la mitad de la capacidad de salida de la subestación correspondiente a la línea de alta tensión a la que se conecta el parque.

A modo de referencia, cuando se emplean turbinas de velocidad fija (comúnmente generadores asíncronos) se exige:

- Factor de potencia superior a 0,86.
- No es posible conectarlo más de tres (3) veces por minuto.
- La caída de tensión en el P_{CC} no puede ser superior a 2%.
- La potencia de cortocircuito en el P_{CC} será 20 veces mayor que la $P_{eólica}$ nominal del parque eólico.
- La conexión del generador no debe sobrepasar 10% de deslizamiento de su rotor, cuando su potencia nominal sea menor o igual a 1 000 kVA, o de 5% con potencia nominal superior a 1 000 kVA. Cuando se emplean turbinas de velocidad variable (con generadores sincrónicos o asíncrónicos de doble alimentación), se exige:
 - Factor de potencia entre 0,8 (inductivo o capacitivo) y 1.
 - Los aerogeneradores deberán contar con un equipo de sincronización, que cumpla con las condiciones para la sincronización de generadores sincrónicos (por ejemplo, las establecidas por la OM del 5 de septiembre de 1985, de España).

Por lo ya descrito, es deseable para el SEN que los futuros desarrollos de parques eólicos se realicen con turbinas eólicas de velocidad variable, bien probadas y maduras, con dispositivos para rebasar pozos de tensión de la red. En la práctica comercial será cada vez más difícil adquirir aerogeneradores de velocidad fija (ya sean *stall*, *active stall* o *pitch*), en las gamas de mediana a gran potencia nominal, pues ya hoy están confinados a la gama de potencias inferiores a 1 300 kW, y más posiblemente, menores de 750 kW.

Otros aspectos técnicos de gran interés, como criterios para el diseño de las redes internas de los parques eólicos, el dimensionado y selección de los transformadores de los aerogeneradores, requerimientos para subestaciones de enlace a la red, comportamiento de las distorsiones de onda y armónicos a la salida de convertidores para máquinas de velocidad variable, y sobre la importancia del pronóstico meteorológico de corto plazo, pueden hallarse en las referencias bibliográficas.

Aspectos logísticos

Exigencias para los medios de transporte e izaje principales y auxiliares de grandes componentes de aerogeneradores

Los aerogeneradores de mediana-gran potencia (con potencia nominal unitaria mayor de 750 kW y menor de 2 000 kW), que podrán ser los de

más interés para los parques eólicos que se instalen en el mediano plazo en Cuba, se caracterizan comúnmente por:

- La instalación de las góndolas a más de 55 m de altura y posiblemente por encima de los 70 m, para aprovechar ventajosamente el perfil vertical de velocidad del viento.
- Los grandes pesos y dimensiones de sus componentes principales.
- Góndolas de más de 24 ton, llegando a exceder las 70 t, según su tecnología.
- Tramos de torres de 24 m a más de 30 m de largo, diámetro máximo que puede llegar a 5 m y con un peso superior a 30 ton en algunos tramos inferiores.
- Palas de rotor con largos desde 26 hasta más de 40 m.

Ello definirá las cualidades de los medios de transporte e izaje para manipular y montar los componentes principales de los aerogeneradores, que no existen en Cuba hoy.

La mayor grúa disponible en Cuba, operada por la Empresa CUBIZA, es de 150 t sobre camión, con pluma de celosía, máxima altura libre bajo gancho menor de 80 m y más de 30 años de servicio, cuya capacidad es limitada para izar elementos de aerogeneradores de mediana potencia. Tras rehabilitarse y comprobarse rigurosamente su estado técnico, fue la grúa principal usada para montar el Parque Eólico Gibara-1, izando las 6 turbinas eólicas con eje del rotor a 55 m de altura y góndolas de 24 ton de peso; para montar cada torre y los rotores ensamblados totalmente a nivel de suelo, se usó una grúa auxiliar de 70 ton. Esas grúas también se usarán para montar el Parque Eólico Gibara-2, con aerogeneradores de peso y altura de instalación algo menores.

No existe en el país ninguna grúa que cumpla los parámetros que requiere el montaje de aerogeneradores mayores. Como referencia general, se requerirá al menos una grúa con capacidad de izaje para alcanzar alturas libres bajo gancho que excederán de 90 m, con un radio efectivo superior a 15 m para izar cargas que van desde 25 hasta posiblemente más de 70 t.

Los transportes para palas que excedan 25 m de largo, para tramos de torres mayores de 24 m con diámetro mayor de 4 m, y para góndolas con altura de transportación sobre rastra superior a 4 m, deberán ser capaces de desplazarse por vías con curvas cerradas con radio de giro menor de 25 m, con capacidad portante menor de 12 ton por eje, y puentes con gálibos reducidos (holgura entre cargas y estructuras de los puentes) y altura menor de 4,7 m, requiriéndose tráiler extensibles, algunos del tipo cuello de ganso con bastidor bajo, de varios ejes, con ejes orientables o giratorios.

Accesibilidad y limitaciones de las infraestructuras de transportación y transmisión eléctrica en las regiones de mayor interés para desarrollos eólicos en Cuba

Las regiones de más interés para desarrollos eólicos futuros tienen distintas condiciones de accesibilidad y de estado técnico de las infraestructuras eléctricas. A continuación se analizan 4 regiones con un potencial eólico estimado de 900 MW con altos rendimientos:

- *Franja costera Norte de Camagüey.* Se estima un potencial superior a 200 MW eólicos. Sus infraestructuras actuales son ventajosas pues tiene un excelente acceso portuario en Nuevitas, carreteras en buen estado técnico, sin limitaciones de gálibo, radios de giro o capacidad de carga; de Nuevitas salen líneas de transmisión eléctrica a 110 y 220 kV, y hay subestaciones de alto voltaje en Camalote al Este y en Uvero al Oeste. Al Norte de Esmeralda y Sola (de Playa Jigüey a Playa Piloto), y al Este de Punta de Ganado, deberán construirse infraestructuras eléctricas directamente hasta las zonas de desarrollo eólico según las características de los proyectos a ejecutar.
- *Noreste de Las Tunas hasta Gibara, en el Norte de Holguín.* Se estima un potencial cercano a 250 MW eólicos. Tiene acceso marítimo por Puerto Carúpano con enlace ferroviario, pero el Ferrocarril Central hasta Holguín tiene algunas limitaciones de gálibo, impidiendo pasar tramos inferiores de torres (los de más diámetro) de aerogeneradores de 1 500 kW o mayor, con altura de instalación mayor de 70 m. Tiene pocas carreteras con parámetros adecuados para desplazar componentes de gran peso, requiriendo reparar caminos y construir tramos de terraplenes compactados. Las infraestructuras eléctricas del Norte de Las Tunas son insuficientes para asimilar los desarrollos eólicos futuros. En Gibara, las capacidades en subestaciones y líneas de transmisión a 110 kV requerirán expandirse antes de alcanzar los 80 MW.
- *Región de Banes-Cabo Lucrecia, al Norte de Holguín.* Se estima un potencial cercano a 250 MW eólicos. Carece de acceso marítimo directo. Banes posee enlace ferroviario, pero con limitaciones. Las carreteras desde los puertos de Carúpano y Moa no permiten mover componentes de gran peso y longitud; tampoco pueden moverse grandes cargas a través de la ciudad de Banes por sus reducidos radios de giro, por lo que se prevé recibir el equipamiento por Carúpano o Moa, trasbordarlo a patanas y construir un atraque cerca de Cabo Lucrecia. También deberán repararse caminos, construir tramos nuevos y un pequeño puente. No hay infraestructuras eléctricas en la costa al Este de Banes y deberá construirse una subestación y 20 km de líneas de transmisión, enlazándolas al

circuito de 110 kV de la Subestación La Canela, próxima a Playa Guardalavaca. En esta región, las importantes obras inducidas de infraestructura requeridas condicionarán la escala para la cual el desarrollo eólico será viable.

- *Región de Maisí, extremo este de Guantánamo.* Se estima un potencial que posiblemente excederá los 200 MW eólicos. Es la región de interés eólico más compleja por no disponer de acceso marítimo ni ferroviario, las carreteras de Guantánamo o Baracoa tienen curvas y pendientes severas que impedirán el acceso terrestre de equipos tecnológicos y medios de construcción, y la infraestructura eléctrica es insuficiente para asimilar cualquier desarrollo eólico. Se requerirá construir un atraque para patanas en Boca de Ovando; deberá recibirse el equipamiento preferiblemente por el Puerto de Moa y trasbordarlo a patanas; construir algunos tramos de caminos, ampliar y mejorar los existentes; construir una subestación principal y una línea de alto voltaje (110 ó 220 kV) desde las zonas de desarrollo eólico hasta el poblado La Máquina, y de éste por un trayecto a estudiar hasta Baracoa, cruzando el río Yumurí, para enlazarse al doble circuito de transmisión Punta Gorda-Baracoa. También en esta región las importantes obras inducidas de infraestructura que se requerirán condicionarán la escala a partir de la cual los desarrollos eólicos serán viables.

Aspectos relevantes a definir en la contratación de los parques eólicos

Para asegurar altos rendimientos, fiabilidad, sostenibilidad técnica y económica de los parques eólicos durante su vida útil, es imprescindible lograr en su contratación garantías de calidad, de prestaciones y de aseguramiento de suministros específicos.

Para una contratación exitosa (con las implicaciones a largo plazo de las decisiones y acuerdos de esa etapa), es clave la adecuada selección y preparación de los especialistas técnicos que serán contrapartes de los suministradores, responsabilizados para asistir a directivos y especialistas comerciales en la toma de decisiones sobre cada aspecto contractual que incidirá en la operación del parque eólico durante su larga vida esperada.

A continuación se comentan brevemente algunos aspectos imprescindibles en las negociaciones y definiciones contractuales. Detalles específicos se identifican y describen con precisión en el Procedimiento correspondiente que se elabora.

- *Precisar en el contrato los cambios tecnológicos* que realiza el fabricante al aerogenerador ofertado, para asegurar su incorporación a las máquinas a adquirir.

- *Garantías de las curvas de potencia de los aerogeneradores y otras.* Las curvas de potencia, de comportamiento de coeficientes de potencia, sustentación y arrastre de los perfiles de palas, deben ser «curvas garantizadas» con desviación menor de -5% de sus valores nominales. El contrato precisará los métodos de medición de parámetros, correcciones previstas y compensaciones monetarias a las que se comprometerá el suministrador ante incumplimientos no corregibles.
- *Garantías de disponibilidad de aerogeneradores, el parque eólico y la red.* Para cualquier modalidad sobre la responsabilidad de la operación del parque eólico durante el período de garantía y después, se acordarán garantías sobre la disponibilidad técnica de cada aerogenerador y del parque, definiéndose el valor nominal a exigir, nunca menor de 95% u 8 322 horas al año, y preferiblemente 97% u 8 497 horas al año, según las condiciones locales específicas.
- La disponibilidad técnica de la red de evacuación, o red exterior, será objeto de compromiso contractual entre el proveedor del servicio de explotación del parque y la empresa eléctrica territorial, siendo la base para calcular las pérdidas de generación del parque y cualquier compensación que se acuerde referida a ellas. Debe ser al menos de 95% u 8 322 horas al año, prefiriéndose un valor mínimo igual a la del parque eólico, dependiendo ello de condiciones locales específicas.
- *Acceso a los ajustes de parámetros en los autómatas y tarjetas de control de los aerogeneradores y parques eólicos.* En la práctica operacional de los 3 parques eólicos existentes en Cuba tras eventos como rayos, salida de servicio por amenaza ciclónica o avería de tarjetas de control por fallo propio, han ocurrido aleatoriamente en algunos aerogeneradores desajustes de los parámetros de funcionamiento fijados por el suministrador en los autómatas programables de sus sistemas de control, «cajas negras» a las que el personal de operación no puede acceder con independencia de su adiestramiento y conocimientos. Estos desajustes que surgen ajenos a errores de operación, pueden paralizar la unidad o todo el parque por períodos significativos, afectando su disponibilidad técnica y efectividad económica. Es importante acordar en el contrato la transferencia de información que permita acceder a la lógica de control y efectuar las correcciones requeridas, a un operario designado especialmente, bajo estrictos términos de confidencialidad según proceda.
- *Repuestos, insumos consumibles, herramientas especiales y equipos de protección individuales.* Los repuestos a contratar deben corresponder a las estadísticas del fabricante sobre fallos de sus

sistemas y componentes, complementadas por informaciones de otras fuentes, considerando las condiciones específicas que impone el clima de Cuba y que pueden modificar su durabilidad. Es importante acordar inventarios mínimos considerando las gestiones, distancia y tiempo que separan a nuestros parques eólicos de los proveedores, y la especificidad de muchos componentes electrónicos y otros muy sensibles, vulnerables y específicos que no pueden sustituirse por similares de otra procedencia.

Respecto a los insumos consumibles (grasas, lubricantes, fluidos hidráulicos, juntas de sellado, elementos de estanqueidad de circuitos hidráulicos, y otros), se debe identificar su posible obtención de proveedores radicados en el país, o el uso de productos similares disponibles en nuestro mercado, para los que debe comprobarse por laboratorios certificados su compatibilidad con los originalmente especificados por el suministrador tecnológico, y obtener la aprobación para su uso.

En el contrato debe acordarse el suministro de las herramientas, instrumentos especiales y útiles específicos de cada tecnología para el montaje, operación y mantenimiento. Omitir su adquisición, lejos de suponer un ahorro monetario puede implicar notables pérdidas de producción en el futuro.

Sobre la prevención de los riesgos laborales, en los contratos se especificarán e incluirán los equipos de protección individuales (EPI's), debidamente certificados (por la CE, p. ej.) que se tienen que utilizar.

- *Inspección del equipamiento en fábrica y adiestramiento del personal en la operación, el mantenimiento y la prevención de riesgos laborales.* De gran importancia para asegurar la calidad del montaje, la puesta en marcha y la futura operación de nuestros parques eólicos serán la inspección por especialistas nacionales de los distintos procesos de fabricación de componentes principales y el ensamblaje de los aerogeneradores en talleres previo a su embarque hacia el puerto de destino; así como el adiestramiento de los operadores y operarios en las tareas de montaje, puesta en marcha, operación y mantenimiento preventivo y correctivo. El alcance de estas actividades se ha incluido en los Procedimientos de Contratación, Operación y Mantenimiento que se elaboran.

Por la importancia que posee la prevención de los riesgos laborales, en el contrato se debe incluir la formación de los operadores y operarios en la

«prevención de riesgos laborales» (PRL), y el uso adecuado de los equipos de protección individual.

También el contrato debe prever que durante el montaje y puesta en marcha del parque los asesores técnicos del fabricante entrenen a los operadores y operarios, y que siempre haya al menos un operador u operario nacional con un asesor del fabricante, absorbiendo toda la experiencia e información.

Características relevantes del recurso eólico cubano

Distribución regional comprobada. Ventajas de zonas cercanas a la costa norte

Casi 3 años de prospección en 32 zonas con 82 estaciones de medición, han permitido una caracterización representativa del potencial eólico en zonas costeras de Cuba. Las mediciones de 18 estaciones próximas a la costa Norte de la Región Centro-Oriental de Guantánamo a Camagüey, demuestran que el recurso energético es muy alto y estable durante todo el año en zonas llanas de vegetación baja, con notables variaciones de velocidad del viento entre 10 a 30 m de alto, disminuyendo de 30 a 50 m.

Al extrapolar sus valores a 70 m, las diferencias en la velocidad y energía serán aún significativas según el diámetro del rotor de los aerogeneradores considerados, por lo que sin exceder esa altura pudieran lograrse altos rendimientos energéticos y reducir costos de inversión. Pero no hay mediciones representativas por encima de 50 m de altura cerca de zonas de interés eólico, lo que impide estimar fiablemente el comportamiento del perfil vertical de la velocidad del viento a alturas mayores.

Las mediciones de 5 estaciones ubicadas en zonas cercanas a la costa Norte desde Sola al Oeste de Camagüey, hasta Caibarién al centro de Villa Clara, indican que hacia el Oeste la intensidad y persistencia de los vientos en la costa Norte declinan, posiblemente por la mayor distancia al anticiclón del Atlántico, ya que las aguas interiores someras y cálidas que separan los cayos del Archipiélago Sabana-Camagüey de la Isla Grande afectan la organización de las brisas marinas, y por otros factores locales.

Las mediciones de 8 estaciones cercanas a la costa Norte desde Corralillo al Oeste de Villa Clara, hasta Quiebra Hacha al Oeste de La Habana, revelan la intensificación estacional de los vientos por los frentes fríos del período poco lluvioso, aunque como promedio anual las velocidades y energía no alcanzan los valores de la Región Centro-Oriental.

Estos comportamientos regionales diferenciados del recurso eólico pueden apreciarse en la figura 2 [Leiva, 2009], que expone los resultados de

simular el funcionamiento de parques eólicos de 30 MW en 20 zonas a lo largo o cerca de la costa Norte.

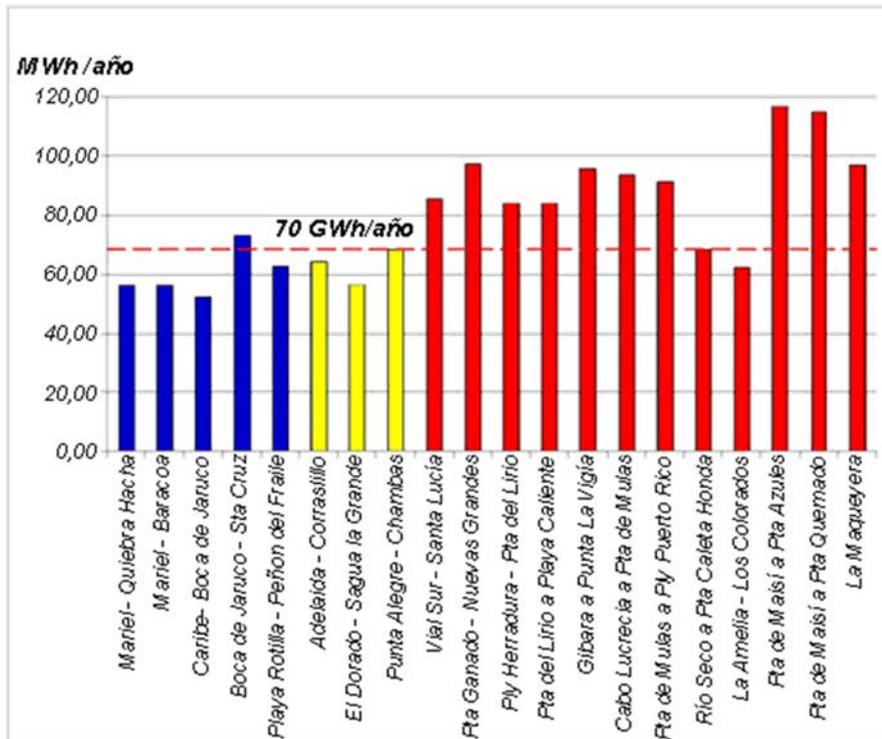


Fig. 2. Generación anual de 30 MW en cada zona (MWh/año).

La velocidad del viento y el potencial eólico decaen notablemente en Pinar del Río, por la orientación desfavorable y lejanía de la provincia con respecto al anticiclón del Atlántico, porque sus montañas actúan como barreras a los vientos estacionales del Norte y Noreste, y los frentes fríos influyen durante plazos muy cortos en su desplazamiento hacia el Este. Esto ha sido evaluado por 3 estaciones de prospección eólica.

En la costa Sur las mediciones de 7 estaciones de prospección en Guantánamo, 2 en la Isla de la Juventud y por las Estaciones Meteorológicas de Referencia en Punta Tabacal, Santiago de Cuba, y El Brinco, cerca de Playa Girón al Sur de Matanzas, indican que el recurso eólico parece ser pobre, con posibles excepciones locales limitadas en extensión y persistencia. Confirman esa tendencia los resultados de operación del Parque Eólico Los Canarreos en la Isla de la Juventud, donde los vientos del Noreste y Este se refuerzan por breves períodos al incidir los frentes fríos del período poco lluvioso, y cuando ocurren los fuertes vientos del Sureste, llamados de Cuaremas, también entre febrero y abril.

El recurso eólico en las regiones montañosas

Su estudio se ha dificultado porque la compleja orografía, densidad y altura de la vegetación, el pobre desarrollo de viales y la dispersión de la población, dificultan la accesibilidad. Sólo se realizaron mediciones de prospección en la Sierra de Nipe (Pinares de Mayarí) y Alturas de Moa, ambas en Holguín, y en la Sierra de Cajálbana, Pinar del Río; 9 estaciones instaladas en estas zonas, excepto una de Moa, dieron resultados sin interés para fines energéticos. Las mediciones de las Estaciones Meteorológicas de Referencia de Punta Tabacal (estación costera sobre una elevación al Sur de la Sierra Maestra) y Guanito (Pinar del Río), son poco representativas por estar rodeadas de montañas y bosques. Por todo ello, el estudio de los vientos en las montañas es un tema por desarrollar aún.

El recurso eólico en llanuras interiores. Efectos locales que afectan al viento

La velocidad del viento predominante proveniente del mar desde el Noreste, se atenúa notablemente al entrar en tierra hacia las llanuras interiores, al interactuar con cambios de rugosidad superficial por las características de los suelos y la vegetación, la presencia de accidentes naturales como bahías y otros reservorios de aguas cálidas, u obstáculos como elevaciones, que causan mayor cizalladura, disminuyendo sensiblemente el recurso energético a las alturas de interés práctico para generar electricidad a gran escala.

Hacia las llanuras interiores se forma el llamado cinturón o eje convectivo de la Isla, desplazado hacia la costa Sur, donde hay mayor frecuencia de tormentas eléctricas por la convección debida al calentamiento diurno, con rayos y turbulencias peligrosos para los aerogeneradores por afectar su rendimiento y estabilidad mecánica. Estos factores deben considerarse para determinar la distancia máxima de la costa económicamente viable para emplazar los parques eólicos, y la altura de los rotores.

Mediciones hasta 50 m de altura en 23 estaciones cerca de zonas costeras con buen potencial eólico, pero ubicadas a más de 3 km de la costa o detrás de las bahías de Nipe, Nuevitas, Puerto Padre y Malagueta, y de las aguas someras y cálidas entre la Isla Grande y el Archipiélago Sabana-Camagüey, registran velocidades promedio y densidades de potencia inferiores, y variaciones del perfil vertical más notables que en la costa, por lo que un potencial energético de interés en zonas interiores debe hallarse posiblemente muy por encima de 70 m, encareciendo las inversiones. Estas tendencias parecen confirmadas por mediciones a varios niveles hasta a 100 m de altura de varias Estaciones Meteorológicas de Referencia, algunas ubicadas entre 3 y 5 km de la costa norte (Santa Cruz

del Norte y Caibarién), y otras mucho más al interior del territorio (Jagüey Grande, Ciego de Ávila, Camagüey y Las Tunas).

Huracanes y otros riesgos naturales

Afectaciones por huracanes

Las probabilidades de afectación por huracanes de todas las categorías para cada región de Cuba, han sido estimadas por el Instituto de Meteorología del CITMA [INSMET, 2006], en un riguroso estudio basado en las estadísticas de 207 años de los huracanes que han afectado al país. También se han caracterizado las velocidades extremas registradas y su probabilidad de ocurrencia durante huracanes u otros eventos meteorológicos [INSMET, 1990], demostrándose que las mayores velocidades absolutas y sus mayores probabilidades se estiman para la Región I, al Oeste del meridiano 80° (provincias occidentales, más Villa Clara y Sancti Spíritus), decreciendo notablemente de Oeste a Este, para la Región II (provincias desde Ciego de Ávila hasta partes de Las Tunas y Granma) y la Región III (restantes provincias orientales).

Los riesgos de sufrir la influencia o afectación directa de huracanes de gran intensidad se deben considerar al proyectar un parque eólico según las probabilidades de ocurrencia previstas para cada región, y la estimación de su velocidad extrema será relevante para seleccionar la Clase de aerogeneradores a instalar según establece la norma IEC 61400-1 Edición 3 (2005), a fin de usar máquinas cuya resistencia corresponda al riesgo probable, por la importancia de lograr un alto rendimiento energético durante toda su vida, y que dependerá mucho de la óptima selección del diámetro de rotor de cada aerogenerador.

Por ello deberán analizarse rigurosamente por la ingeniería cubana y del suministrador las características técnicas de las máquinas a usar en las condiciones de cada emplazamiento (velocidad promedio anual, intensidad de turbulencia, y otras), y en particular la resistencia a cargas límites y a vuelco en la condición de máquina detenida y viento extremo a la altura del cubo del rotor, provocado por el huracán de gran intensidad más probable en la región.

Tabla 1. Valoración preliminar de las clases de aerogeneradores requeridos para cada región según su resistencia de diseño (según la Norma IEC 61400-1 Edición 3 (2005) [Leiva, 2009]

Regiones	Zonas	Velocidad extrema pronosticada en la región con recurrencia de 50 años a 50 m de altura (INSMET)	Clases de aerogeneradores requeridos según su velocidad extrema de diseño (racha de 3 segundos a la altura del buje con recurrencia de 50 años)	
			m/s	V extrema, m/s
Occidental	Todas las zonas	64,7	70	Clase I a
				Clase S (especial)
	Hasta Corralillo		70	Clase I a
Central		64,7		Clase S (especial)
	Sagua a Chambas	42,9	57,5	Clase II-a
Oriental	Sola a Nuevitas	42,9	52	Clase III-b
	Las Tunas a Maisí	35,6	52	Clase III-b

Nótese la marcada diferencia entre la condición de «influencia de un huracán» en una región, y la «afectación directa por un huracán», lo que debe considerarse al evaluar la información estadística disponible para seleccionar la clase de aerogeneradores para cada emplazamiento. En todo caso el parque eólico se diseñará y acondicionará para resistir estos eventos, y contará con instrucciones precisas de medidas a aplicar para preservar su integridad física de ser impactado directamente por un huracán intenso.

Surgencia y penetraciones de mar

En varias regiones costeras de Cuba, al aproximarse o incidir directamente huracanes y otros eventos meteorológicos extremos, puede ocurrir un aumento anormal del nivel del mar y penetrar hacia zonas interiores. El

nivel de las aguas dependerá de la trayectoria y proximidad de la tormenta, la intensidad de sus vientos, altura de las olas, topografía de la costa y batimetría.

Las marejadas ciclónicas son muy peligrosas si ocurren con marea alta, al combinarse ambos efectos. Las zonas bajas y de topografía llana corren gran riesgo durante una inundación por marejada ciclónica. Las destrucciones provocadas por las olas ciclónicas son muy notables al impactar directamente a estructuras fijas, mientras los impactos indirectos pueden causar inundaciones y socavar cimientos. Este riesgo deberá evaluarse durante la microlocalización y la elaboración de los proyectos de ingeniería para cada futuro parque eólico, por especialistas de entidades calificadas.

Las marejadas del huracán Ike que azotó varias provincias en septiembre de 2008, causaron daños directos al Centro de Control del Parque Eólico Gibara-1, separado más de 100 m del litoral, al impactarlo las olas y penetrar las aguas en la edificación. Los vientos en rachas con velocidad superior a 250 km por hora no dañaron a sus turbinas de Clase I, pero derribaron la línea eléctrica de evacuación. Esas experiencias se aplican ya a los proyectos del Parque Eólico Gibara-2, a punto de construirse.

Riesgos de descargas eléctricas atmosféricas

Las tormentas locales severas son fenómenos de corta duración formados en plazos breves, difíciles de pronosticar y que pueden producir rayos. No son muy comunes en las costas y más frecuentes hacia el interior del territorio; también pueden formarse en el mar trombas marinas e incidir estas en zonas costeras de Cuba.

Las tormentas han sido estudiadas por especialistas del Instituto de Meteorología del CITMA, caracterizándose su distribución espacial y frecuencia, revelando que en la temporada de más actividad en toda Cuba hay un mínimo de probabilidad de ocurrencia en Punta Lucrecia (Holguín), Maisí (Guantánamo) y Nuevitas (Camagüey).

Los daños que pueden causar los rayos en los aerogeneradores y otros equipos de un parque eólico han sido muy estudiados internacionalmente y hay soluciones de protección que no son objeto de este trabajo, pero se hace constar la importancia de que la Ingeniería prevea el uso de los medios y soluciones más convenientes para una protección efectiva, ya que además de las referencias internacionales de impactos de rayos en aerogeneradores, en Cuba hay 3 experiencias directas en parques eólicos que están en operación:

- Agosto de 1999. Parque Eólico Demostrativo de la Isla Turiguanó, en la costa norte de la provincia de Ciego de Ávila, con

2 aerogeneradores tripalas de 225 kW a 32,5 m de altura. Daños por rayos al freno aerodinámico de una pala, a componentes electrónicos de la Unidad No. 1, a la línea eléctrica de evacuación e incendio por cortocircuito del armario del interruptor principal del Centro de Control.

- Julio de 2000. Parque Eólico de la Isla Turiguanó. Daños por rayos al freno aerodinámico de una pala y la tarjeta principal del control de la Unidad No. 2.
- Junio de 2007. Parque Eólico de la Isla de la Juventud con 6 aerogeneradores bipalas de 275 kW a 55 m de altura. Daño en la línea eléctrica de enlace entre máquinas y en componentes electrónicos de 2 unidades y del Centro de Control.

Riesgos de anegación o inundación

Cuando el agua ocupa una zona de modo no habitual, se produce una anegación, riada o inundación. Ese aporte extraordinario puede ocurrir en forma circulante o estancada; anegación es la acumulación de agua sin formarse corrientes, y la riada es un caudal circulante con fuerte corriente causado al desbordarse un río o presa.

Por la litología de muchas zonas costeras con interés eólico de Cuba donde se manifiestan procesos cárscicos en superficie, hay una estrecha relación entre la cubierta vegetal de los suelos y las características del escurrimiento o drenaje, que puede ser sub superficial o básicamente subterráneo, desarticulándose en este caso el drenaje superficial, lo que reduce la posibilidad de que ocurran riadas. Sin embargo, localmente pueden ocurrir anegaciones de corta duración que deben considerarse en la microlocalización de los futuros parques eólicos al diseñar los cimientos de los aerogeneradores, el centro de control, las estaciones de transformadores y los caminos, para evitar que se interrumpa la accesibilidad u ocurran daños al equipamiento.

Corrosión y daños por deposiciones salinas

Dado el previsible emplazamiento de muchos de los futuros parques eólicos cubanos próximos a la costa norte, la presencia de aerosoles con alto contenido de sales y su efecto corrosivo intensificado al interactuar con el complejo humedad-temperatura, son aspectos relevantes para especificar los requisitos del equipamiento tecnológico.

Estudios del CNIC, el CIPEL y otras instituciones, caracterizan espacialmente este fenómeno en general, y se iniciarán investigaciones específicas en Gibara, de gran interés para el futuro desarrollo eólico por ser representativas de condiciones de agresividad muy severas. Las

experiencias de los parques eólicos de Gibara-1, Turiguanó y Los Canarreos revelan que los métodos estándar de protección superficial aplicados al equipamiento eólico producido en Europa, no siempre son suficientes para algunas de las condiciones presentes en nuestro medio.

Los vientos y el oleaje persistentes sobre costas acantiladas y la alta salinidad marina, como en Gibara, Cabo Lucrecia y Punta de Maisí, pueden causar la penetración de aerosoles salinos en equipos y armarios. Gibara-1 ya ha sufrido averías en equipos electrónicos por deposiciones salinas y hay oxidación superficial en torres y tornillería de aerogeneradores. Se deben analizar rigurosamente los esquemas de pintado, usar filtros en puertas y tomas de ventilación que retengan los aerosoles que arrastran el aire, deshumidificadores y recubrimientos especiales sobre tarjetas y otros componentes electrónicos.

Afectaciones notables a la estabilidad de la generación de los parques eólicos pueden ocurrir por fallos de los aisladores de las líneas eléctricas aéreas al depositarse sales y polvo que causan *flash-over* o arcos eléctricos perimetrales, y disparos de protecciones, interrumpiendo las líneas y sacando de servicio a los aerogeneradores. Tales fenómenos ya manifestados en Gibara-1 prueban que es imprescindible seleccionar adecuadamente los aisladores a emplear y someterlos a lavados periódicos con intervalos de tiempo cortos entre mantenimientos.

Los huracanes y todos los riesgos naturales referidos anteriormente se deben tener en cuenta al confeccionar los «Planes de Emergencias» de cada parque eólico, adecuándolos a los riesgos que se puedan presentar en ellos, para reducir los daños a los componentes de las turbinas eólicas, al parque en general y al hombre.

Bibliografía

INSMET. Probabilidad de afectación por huracanes en cada provincia de Cuba. Informe abreviado. Mayo de 2006.

INSMET. Zonificación de Cuba relativa a la velocidad máxima del viento. Vega, 1990.

LEIVA VIAMONTE, G., et al. Caracterización de actividades principales del Programa Eólico Cubano 2005 a 2009. Actualización de abril de 2009. Elaborado para la Presentación de la UEB Energías Renovables de INEL al Grupo Central Nacional de Energías Renovables. La Habana, abril de 2009. NC 62-05. «Tensiones nominales y sus desviaciones permisibles». Vigente desde '79-10. 10 p.

PÉREZ LORENZO, ADONIS. «Elementos para el análisis de la integración eólica en las redes de subtransmisión con generación distribuida». Parque

Eólico Demostrativo de Turiguanó, Centro de Formación en Energía Eólica de Ciego de Ávila. Artículo: 2006, 10 p.

RODRÍGUEZ AMENEDO, JOSÉ LUIS. «Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica». José Luis Rodríguez Amenedo, Santiago Arnaltes Gómez, Juan Carlos Burgo Díaz, Madrid: Ed. Rueda SL, 2003. 447 p.

Modelo matemático para estimar el consumo de energía eléctrica en instalaciones de la educación superior

Mathematical model to estimate the consumption of electrical energy in higher education facilities

Por Ing. Diuber Sicilia Camacho, Dr. Mario Herrera Prat*,
Ing. Miguel Pelayo García Fernández*
y Lic. Ángel Espinosa Nápoles** * Ministerio de Educación Superior, Cuba.
** Instituto de Meteorología de Cuba, Cuba.
e-mail: sicilia@reduniv.edu.cu, herrera@reduniv.edu.cu,
pelayo@reduniv.edu.cu y angel.espinosa@insmet.cu*

Resumen

El presente estudio se realizó con el fin de aportar una herramienta que mejore los actuales métodos de planificación energética en instalaciones del Ministerio de Educación Superior (MES). En el mismo se determinan modelos matemáticos para estimar el consumo de energía eléctrica en edificios de residencia de becas y administración. Como variables en los modelos se tuvieron en cuenta el consumo de electricidad, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la sensación térmica y el nivel ocupacional. Se realizó una identificación inicial mediante modelación paramétrica y series históricas de las variables, y se procesaron los datos empleando los métodos de regresión lineal múltiple y de correlación. El procesamiento de los datos se hizo mediante el software estadístico Minitab 14. En el estudio se realiza la validación práctica del modelo en las instalaciones seleccionadas en el 2011, y se obtuvo una adecuación del modelo entre 5 y 6% de desviación, lo que permite utilizar el mismo como modelo de referencia en la estimación de los consumos energéticos de esas instalaciones.

Palabras clave: energía eléctrica, clima y modelos matemáticos

Abstract

The present study was carried out in order to contribute with a tool addressed to improve the current methods of energy planning in facilities of the Ministry of Higher Education (MES). The study mathematical determined models to estimate the consumption of electricity in buildings of students' residence and administration buildings. The variables taken into account in the models were the consumption of electricity, temperature, humidity, wind speed, windchill and occupational level. An initial identification was made by parametric modeling and historical series of the variables, and the data were processed using the multiple linear regression and correlation methods. The data processing was done through the statistical software Minitab 14. In the

study the practical validation of the model was carried out in the facilities selected in 2011, and an adaptation of the model between 5 and 6% deviation was obtained, which will be used as a reference model in the estimation of the energy consumption of those facilities.

Keywords: electrical energy, weather and mathematical models

Introducción

Introducción

En la sociedad moderna la disponibilidad de energía está fuertemente ligada al nivel de bienestar, a la salud y duración de vida de los seres humanos. Actualmente, 80% de la producción de energía en el mundo se obtiene mediante los combustibles fósiles, principalmente carbón, gas natural y petróleo. La situación energética mundial sufre hoy una crisis producto del agotamiento progresivo de las reservas de combustibles fósiles, acentuada por el accidente nuclear en Japón. Todo esto ha provocado un impacto global en los precios de los combustibles, por un lado, en el costo de esta energía, y por otro, por el daño a la salud humana y al medio ambiente.

Estas realidades obligan a trabajar para lograr la mayor eficiencia energética posible y el control del uso de los portadores energéticos. Enmarcada en este contexto, Cuba ha proyectado una revolución energética buscando ahorro y eficiencia en el uso de los portadores. El primer paso para lograr el ahorro de portadores energéticos, es su planificación. El presente trabajo tiene como objetivo lograr modelos de estimación que ayuden a caracterizar el consumo energético en instalaciones universitarias.

Para el estudio se seleccionó una residencia estudiantil perteneciente a la Universidad Agraria de La Habana, situada en la provincia de Mayabeque, y el edificio administrativo del Ministerio de Educación Superior, ubicado en La Habana. Para obtener el modelo se realizó un estudio de la series históricas de consumo de energía eléctrica y los factores con mayor incidencia en las variaciones de los consumos; se seleccionaron como factores, en primer lugar el clima, que es de los más importantes a tener en cuenta para el análisis del consumo de la energía eléctrica en los países tropicales, y por otro lado, el nivel ocupacional de cada servicio. La elaboración de los modelos se hizo a través de herramientas estadísticas procesadas en el software estadístico Minitab 14.

En los modelos resultantes se evidenciaron diferencias en los comportamientos de los mismos en general, debido a que un servicio es de

residencia y el otro es administrativo. Por otro lado, se concluyó que las variables climáticas tienen una influencia similar en los modelos. Se realizó una validación puntual para los meses de enero y febrero de 2011, y se obtuvo una estimación con errores entre 5 y 6%.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión del comportamiento diario de los registros de consumo de energía eléctrica del 2010; y de los meses de enero y febrero de 2011. El modelo se concibe a partir de factores climáticos y de las cargas ocupacionales en las instalaciones. Para las variables climáticas analizadas se escogieron los valores medios mensuales de la temperatura ambiente (máxima, mínima, media máxima y media mínima), la velocidad del viento y la humedad relativa; la variable de carga ocupacional está dada por la cantidad de personas que utilizan el servicio.

Para introducir los datos en el programa Minitab 14 se tomaron los códigos siguientes que identifican a los variables (en la tabla 1 se presentan estos y las unidades físicas de cada variable):

Tabla 1. Codificación de las variables

Identificación	Variables	Unidad de medida
Y	Consumo de energía eléctrica	MWh
X ₁	Temperatura máxima media	°C
X ₂	Humedad relativa	%
X ₃	Carga ocupacional	%
X ₄	Velocidad del viento	km/h
X ₅	Temperatura mínima media	°C

En el estudio se analizan dos tipos de servicios, un servicio administrativo que corresponde al Ministerio de Educación Superior, y una instalación de residencia estudiantil en la Universidad Agraria de Mayabeque. El modelo tendrá como variable respuesta el consumo de energía eléctrica en función con los factores que se muestran en la tabla 1. Los datos de las variables climáticas que se utilizaron en la obtención del modelo matemático,

pertenecen a las estaciones meteorológicas de Casablanca y Tapaste, que coinciden geográficamente con los territorios donde se encuentran ubicados los servicios estudiados. En el caso del edificio administrativo se tomaron los valores medios por meses de la temperatura máxima, pues la mayor parte del consumo de energía eléctrica se produce durante la jornada laboral, comprendida entre las 8:30 a.m. hasta las 5:00 p.m.; en el caso del servicio de residencia estudiantil, se agregó la temperatura mínima media, pues en este tipo de establecimiento el mayor consumo de energía eléctrica se registra durante la noche y la madrugada.

Método estadístico

El análisis de datos para la obtención del modelo se resuelve por los métodos estadísticos de correlación y regresión lineal múltiple. En este caso se aplicó la Dócima de la Regresión Múltiple. Este método se desarrolla mediante el programa de computación Minitab 14.

Por este método es posible tener diferentes variables que, tomadas conjuntamente, pueden servir como base satisfactoria de la estimación de la variable que se desea, realizado mediante funciones lineales. Con este fin se representan por Y, X_1, X_2, \dots, X_k , las variables disponibles y se considera el problema de estimar Y por medio de una función lineal de las variables restantes. Si se designa Y como variable, su estimación se obtiene mediante la expresión:

$$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots C_kX_k$$

Donde las coeficientes C son determinados por el método de los mínimos cuadrados. El problema consiste en encontrar el conjunto de los coeficientes C que minimice la suma del cuadrado de los residuos [Johnson, 1998].

El programa Minitab 14 ofrece diversos resultados al procesar la información, por lo que es necesario presentar un método de su utilización para demostrar que el modelo matemático obtenido representa al modelo estudiado.

La metodología se establece sobre la base de la comprobación de dos requisitos fundamentales: la independencia de las variables y la normalidad de los residuales. Además, se analizan datos como el coeficiente de determinación, el error típico de estimación y el análisis de la varianza, siendo este último un poderoso método estadístico para la comparación de medias de diferentes niveles de uno o más factores, a partir de la descomposición o análisis de la variabilidad total en diferentes fuentes, de

manera que se pueda estudiar el efecto que tienen los factores sobre la variable objeto de estudio [Johnson, 1998].

Metodología del análisis estadístico

Coefficiente de determinación de la regresión: Determina el grado de ajuste del modelo, aceptándose como resultados en estos estudios valores mayores de 0,8 [Mendenhall, 1994].

Evaluación de la normalidad de los residuales: Se realiza a partir de la prueba *Anderson Darling* referido a los residuales.

Evaluación de la independencia de los residuos: Esta se puede demostrar mediante la prueba de *Rachas* de los residuos [Walpole, 1999].

Evaluación matemática: Se realiza mediante el análisis de la varianza que se presenta en la tabla ANOVA, la cual analiza el p-valor y *la dócima de Fischer*, a partir de la comparación de la suma de los cuadrados del factor, la suma de los cuadrados del error y los cuadrados medios de estos.

Dócima de la regresión múltiple: Permite analizar el aporte conjunto o global de un grupo de *b* variables independientes para la estimación del valor esperado de *Y*; en este caso, la variable dependiente a estudiar es el consumo de energía eléctrica. Este análisis se realiza mediante la prueba de hipótesis [Hoel, 1968].

Análisis de los resultados

En el análisis realizado en el edificio administrativo, se obtuvo el modelo para estimar el consumo en función de los factores estudiados, que se representa en la ecuación siguiente:

$$Y = -0,882 + 0,0055 X_1 + 0,0124 X_2 + 0,820 X_3 - 0,0121 X_4$$

Los resultados del análisis de varianza para el modelo correspondiente al edificio administrativo, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de la varianza para el modelo 1

Recurso	DF	SS	MS	F	P
Regresión	4	0,219490	0,054872	7,36	0,012
Error residual	7	0,052164	0,007452		
Total	11	0,271654			
R – Sq = 80,8%					

Se observó que la suma de los cuadrados de la regresión tiene un valor de 0,219490, el cual es mayor que la suma de los cuadrados del error 0,052164, que es la parte no explicada por el modelo. En el análisis de la Dócima de Regresión Múltiple se observa que el p-value (0,012) es menor que el nivel de significación $\alpha(0,05)$, por lo que se rechaza H_0 y el modelo es adecuado para estimar el valor esperado del consumo de energía eléctrica en el edificio administrativo.

En el análisis realizado en la residencia estudiantil se obtuvo como pronóstico el modelo siguiente:

$$Y = 20,1 - 0,136X_2 + 0,0162X_3 - 0,870X_4 + 0,342X_5$$

Los resultados del análisis de varianza para el modelo correspondiente a la residencia estudiantil se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis de la varianza del modelo 2

Recurso	DF	SS	MS	F	P
Regresión	4	98,645	24,661	5,12	0,030
Error residual	7	33,707	4,815		
Total	11	132,352			
R – Sq = 74,5%					

Se observó que la suma de los cuadrados de la regresión tiene un valor de 98,645, el cual es mayor que la suma de los cuadrados del error 33,707, que es la parte no explicada por el modelo. En el análisis de la Dócima de Regresión múltiple se observa que el p-value (0,030) es menor que el nivel de significación $\alpha(0,05)$, por lo que se rechaza H_0 y el modelo es adecuado para estimar el valor esperado del consumo de energía eléctrica en la residencia estudiantil.

En ambos modelos se realizó la prueba de normalidad *Anderson-Darling* a los residuos, donde se obtuvieron valores de p-value 0,829 y 0,779, respectivamente, los cuales son mayores que el nivel de significación fijado a (0,05), por tanto se acepta H_0 , por lo que los residuos siguen una distribución normal. Se efectuaron las pruebas de *rachas* a los residuos de ambos modelos para verificar la independencia de los mismos, los valores p-value de los modelos fueron de 0,071 y 0,079, respectivamente, los cuales son mayores que $\alpha(0,05)$, por tanto se acepta a H_0 , por lo que los

residuos son independientes. Con estas pruebas realizadas a los residuos se verificó el cumplimiento de los requisitos de las décimas de la regresión y, por tanto, se demostró que las mismas son válidas.

Al analizar los modelos 1 y 2 se constató que presentan un coeficiente de determinación de la regresión de 80,8 y 74,5%, respectivamente, que representa el nivel de ajuste (R-Sq) de cada modelo, el cual indica que estos eliminan 80,8 y 74,5% de los errores que se cometerían si en su lugar utilizáramos el consumo promedio. En este tipo de estudio donde se pronostica consumo de energía eléctrica, este valor de ajuste se considera satisfactorio. En trabajos similares, otros autores han obtenido modelos matemáticos con ajuste de 66% [Montelier, 2006], que han servido como herramientas para estimar los consumos energéticos en estos servicios.

Es importante señalar que el hecho de que el conjunto de variables haga un aporte significativo para la estimación del valor de consumo de energía eléctrica a través de los modelos, no significa que todas las variables sean necesarias, en cuyo caso se pudieran aplicar otros métodos estadísticos para analizar el aporte individual de cada variable al modelo.

Análisis físico del modelo 1

El modelo 1 corresponde con el estudio realizado en el servicio administrativo.

$$Y = -0,882 + 0,0055 X_1 + 0,0124 X_2 + 0,820 X_3 - 0,0121 X_4$$

Al analizar los factores del modelo, se tiene: el factor X_1 (temperatura máxima media) se presenta con signo positivo y un coeficiente de 0,0055, lo que indica que el aumento de la temperatura media máxima contribuye al aumento del consumo de energía eléctrica; este resultado es esperado, pues el consumo de energía en la carga de climatización varía de esta forma debido a la sensación térmica que recibe el equipo.

- El factor X_2 (humedad relativa) tiene un coeficiente de 0,0124; esta variable se comporta similar a la temperatura pues la humedad indica la cantidad de vapor de agua en el aire [McMichael y Kovats, 1999], el cual depende en parte de la temperatura, ya que el aire caliente contiene más humedad que el frío [Labeyrie, 1988]. Al igual que la variable anterior, está asociada al consumo de los equipos de climatización.
- El factor X_4 (velocidad del viento) presenta un coeficiente negativo de 0,0121. Al aumentar el valor de esta variable se obtiene una disminución en el consumo energético del servicio. Esto se debe a que al aumentar la velocidad del viento la transmisión de calor aumenta, lo que trae consigo que en los locales climatizados

disminuye la temperatura y disminuya el consumo energético de los mismos, que es una parte importante del consumo en los edificios administrativos.

- Por último, se analizó el factor más potente del modelo, representado por el nivel de ocupación del edificio X_3 con un coeficiente de 0,820. Como es de esperar, al aumentar el número de trabajadores hay un aumento en el consumo de energía eléctrica, lo que caracteriza un edificio administrativo donde 90% del personal trabaja utilizando computadoras en locales climatizados.

Análisis físico del modelo 2

El modelo 2 corresponde al estudio realizado a la residencia estudiantil.

$$Y = 20,1 - 0,136X_2 + 0,0162X_3 - 0,870X_4 + 0,342X_5$$

Al analizar los factores que presenta el modelo, se tiene el factor X_2 (humedad relativa), que se presenta con signo negativo con un valor 0,136. Con respecto a los demás, se considera no muy fuerte, y el signo negativo indica que un aumento de la humedad en el rango estudiado produce una disminución de consumo de energía eléctrica, debido a que la humedad con temperaturas bajas aumenta la sensación de frío.

- El factor X_3 (carga ocupacional), que en este caso son los estudiantes becados, presenta signo positivo con un valor 0,0162, lo que indica que es el factor de menos peso en el modelo. Parece contradictorio que tenga la menor influencia en los resultados, pero esto lo explica el hecho que, al disminuir el nivel ocupacional de la instalación en el rango estudiado, ello no necesariamente implica que disminuya proporcionalmente en los edificios el nivel de consumo de energía eléctrica.
- El factor X_4 (velocidad del viento) presenta signo negativo con un coeficiente de 0,870; al aumentar la velocidad del viento el consumo de energía eléctrica disminuye, y esto se debe a que al aumentar el valor de este factor la sensación térmica en las personas disminuye.
- El factor X_5 (temperatura mínima media) presenta signo positivo con un coeficiente de 0,342, este factor es el más potente en este modelo, porque está asociado a la mayor variación de la respuesta de este; el aumento de la temperatura trae consigo un aumento en el consumo de energía debido al uso de equipos de ventilación, buscando el confort térmico en las habitaciones.

Validación de los modelos

Para evaluar el nivel de ajuste de los modelos, se tomaron los datos de los consumos reales de enero y febrero de 2011, así como los valores de las variables climáticas correspondientes a estos meses. A continuación se muestra en las tablas 4 y 5 el nivel de ajuste alcanzado por los modelos matemáticos.

Tabla 4. Porcentaje de error del modelo 2

	Residencia estudiantil		
	Consumo real	Consumo calculado	% de error
Enero	21,26	19,89	6,48
Febrero	19,29	20,38	5,60

Tabla 5. Porcentaje de error del modelo 1

	Edificio administrativo MES		
	Consumo real	Consumo calculado	% de error
Enero	25,54	24,00	6,02
Febrero	22,26	20,83	6,42

Los resultados evidencian que en ambos servicios el error de estimación de los modelos concebidos varía entre 5 y 6%, el cual es un nivel de error aceptado para las características deseadas de precisión de estimación y confiabilidad estadística.

Conclusiones

1. Se obtuvieron los modelos matemáticos para la estimación del consumo de energía eléctrica: uno para la instalación de la residencia estudiantil de la Universidad Agraria de La Habana, y un segundo para el edificio administrativo del Ministerio de Educación Superior:

$$Y = 20,1 - 0,136X_2 + 0,0162X_3 - 0,870X_4 + 0,342X_5$$

$$Y = -0,882 + 0,0055X_1 + 0,0124X_2 + 0,820X_3 - 0,0121X_4$$

2. En ambos modelos el aumento de la temperatura produce un incremento de consumo de energía eléctrica en cada servicio.
3. La humedad presenta un comportamiento diferente en cada modelo: en el modelo de servicio administrativo está asociada a un aumento del consumo, y en el servicio de residencia está asociado a una disminución del consumo.
4. El factor nivel ocupacional es el que más peso presenta en el modelo matemático del servicio administrativo, y en el modelo del servicio de residencia este factor es de menos peso.
5. En la validación se obtuvieron resultados en la estimación con errores entre 5 y 6%.

Bibliografía

- HOEL, G. *Introducción a la estadística matemática*. La Habana: Edición Revolucionaria. Instituto Cubano del Libro, 1968. p. 265.
- JOHNSON, D. (1998). *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. México: International Thompson Editores, 1998. p. 56.
- LABEYRIE, J. *El hombre y el clima*. Barcelona: Gedisa, 1988. p. 245.
- MCMICHAEL, A. J. Y S. KOVATS. «El tiempo, el clima y la salud», en *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial*, E.U, 1999. Vol. 48, No. 1, p. 16-21.
- MENDENHALL, W. (1994). *Estadística matemática con aplicaciones*. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1994. p. 36-45.
- MONTELIER, H. S. «*Influencia de las principales variables climatológicas en la operación de los sistemas de climatización por agua helada*». 4to. Taller de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2006.
- WALPOLE, R. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1999. p. 86.

Introducción de sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) en el alumbrado público de las ciudades

Introduction of autonomous photovoltaic systems (SF) in the public lighting of cities

Por María Rodríguez Gámez, Antonio Vázquez Pérez*,
Miguel Castro Fernández* y J. Luis Isaac Pinos*
* CIPEL, CUJAE, La Habana, Cuba.
e-mail: maria@electronica.cujae.edu.cu,
mcastro@electronics.cujae.edu.cu, isaac@oc.une.cu*

Resumen

Los sistemas de alumbrado público representan para todas las ciudades un punto clave en la calidad de vida de los ciudadanos, brindando seguridad tanto peatonal como vial. Para el país, el mejoramiento y mantenimiento de este servicio es un proceso estratégico, dado que implícita imagen y credibilidad, siendo de gran importancia para la iluminación perimetral de objetivos sensibles, como pueden ser grandes depósitos, almacenes, fábricas, hospitales, escuelas y otros, jugando un rol determinante en la seguridad de estos emplazamientos. El sistema de iluminación pública en avenidas principales y sectores residenciales, así como de objetivos importantes, en los últimos años ha estado integrado mayormente por luminarias de tecnologías de vapor de mercurio o de sodio, considerando que estas ofrecían un mejor rendimiento que los sistemas tradicionales mixtos e incandescentes, pero que dependen para su funcionamiento de energía eléctrica generada con combustibles fósiles, y a pesar de las mejoras tecnológicas experimentadas en estos sistemas, aún presentan altos consumo de energía. En el trabajo se analiza el potencial solar existente en las ciudades principales de Cuba, demostrando que pueden instalarse luminarias solares con estos propósitos, y de esta forma aminorar la generación de energía para la iluminación pública. Se muestra el valor de la radiación solar incidente, así como las posibilidades de introducción de estos sistemas a partir del estudio sobre las exigencias del ordenamiento territorial y la determinación de la viabilidad para su introducción. Se realizó el análisis sobre la factibilidad de instalación de estos sistemas en las ciudades que presentan amenazas de desastres naturales y donde los sistemas fotovoltaicos autónomos, por sus características, pudieran garantizar el servicio ininterrumpidamente, aun cuando colapsara el sistema convencional. Se muestran algunos cálculos relacionados con los resultados que pudieran lograrse, mediante la diversificación del sistema del alumbrado público en las principales ciudades del país.

Palabras clave: Alumbrado público, radiación solar, luminarias solares

Abstract

Public lighting systems represent for all cities a key point in the standard of living of citizens, providing both pedestrian and road safety. For the country, the improvement and maintenance of this service is an strategic process, given that implicit image and credibility, being of great importance for perimeter illumination of sensitive objectives, such as warehouses, factories, hospitals, schools and others, playing a decisive role in the security of these sites. The system of public lighting in main avenues and residential sectors, as well as important objectives, in recent years has been mostly integrated by mercury or sodium vapor technology lamps, considering that these offered a better performance than traditional mixed systems and incandescent, but that depend for their operation on electric energy generated with fossil fuels, and despite the technological improvements experienced in these systems, they still have high energy consumption. The current paper analyzes the solar potential existing in the main cities of Cuba, demonstrating that solar technology can be installed for these purposes, in order to reduce electricity consumption for public lighting. The value of the incident solar radiation is shown, as well as the possibilities of introducing these systems from the study on the requirements of the territorial ordering and the determination of the viability for its introduction. A feasibility study of installation of these systems was carried out in cities that present natural disaster threats and where autonomous photovoltaic systems, due to their characteristics, could guarantee uninterrupted service, even when the conventional system had collapsed. Some calculations related to the results that could be achieved are shown, through the diversification of the public lighting system in the main cities of the country.

Keywords: Public lighting systems, solar radiation, solar lamps

Introducción

El primer intento para el alumbrado de un edificio público se realiza en La Habana en 1816, y 28 años más tarde, el 3 de julio de 1844, se registra la firma de un contrato del ayuntamiento de la ciudad con la compañía de alumbrado de gas para calles, parques y edificios públicos, firmado para 26 años de duración. En 1889 se instala, en el Parque Central de La Habana, el primer sistema de alumbrado público que funcionaba con electricidad, mediante un sistema híbrido de corriente directa y alterna; en ese propio año se inaugura el servicio de alumbrado público en Cárdenas, en 1890 en las ciudades de Matanzas y Camagüey, y en los años finales del siglo XIX se extienden a Cienfuegos, Sagua la Grande, Pinar del Río, Santa Clara, Regla, Caibarién y Santiago de Cuba [Gómez, 2001].

Durante la primera mitad del siglo XX, y mediante multimillonarios contratos con compañías eléctricas norteamericanas, se extiende el sistema de alumbrado público a las principales ciudades y pueblos.

Con el triunfo revolucionario el 1.º de enero de 1959, el servicio eléctrico se amplía a todo lo largo y ancho del país, y con este desarrollo se amplía el alumbrado público, que hoy llega a todos los asentamientos poblacionales, aunque sobre la base de la utilización del petróleo para generar la energía eléctrica.

Los sistemas solares fotovoltaicos no han tenido un desarrollo tan vertiginoso en el tiempo como los sistemas convencionales. En 1839 el físico francés A. E. Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, y no fue hasta 1883 que se construyó la primera celda fotovoltaica, que alcanzó una eficiencia menor con un porcentaje menor que uno, y era de selenio cubierta por una capa muy delgada de oro. Las primeras aplicaciones de las celdas solares fueron en satélites y naves espaciales, y el Vanguard 1 fue el primer satélite que las usó [Arrastía, 2009].

Durante años estos sistemas fueron destinados, primero, como fuente de electricidad en los satélites y naves espaciales y otras aplicaciones en sitios aislados, así como para la electrificación de viviendas y comunidades alejadas de la red eléctrica, donde el costo de la electrificación con los sistemas convencionales era muy elevado. Estas aplicaciones fueron facilitando el perfeccionamiento de las tecnologías.

A partir de la década de los setentas, comenzó un proceso de industrialización de estos sistemas, como alternativa en la producción de electricidad, frente a las fuentes convencionales de energía, y ya en el siglo XXI sus costos de producción llegan a ser competitivos y se extiende su empleo a otras aplicaciones como los sistemas conectados a red [Arrastía, 2009].

El desarrollo alcanzado por las nuevas tecnologías relacionadas con los sistemas fotovoltaicos autónomos, ha conseguido sacar a estos sistemas, del destinamiento cósmico y de lugares intrincados e inaccesibles, ampliando el campo de sus aplicaciones en funciones más cotidianas del quehacer social, ocupando una atractiva posición en la competencia del mercado con respecto a algunas tecnologías convencionales conocidas, como es el caso de las luminarias destinadas al alumbrado público en las ciudades y la iluminación perimetral de objetivos importantes.

Hoy se fabrican en diferentes países farolas solares, y se prevé que estas aumentarán para el 2018 y 2036 [solares..., 2007]. Las diferentes características que presentan, las hacen económicas e interesantes, partiendo de que el Sol es su única fuente de energía y que satisface los

requerimientos de iluminancia en calles, estacionamientos, plazas, parques, muelles, áreas perimetrales, presentando aproximadamente 20 años de vida útil, con un cambio de batería y otras ventajas como el encendido y apagado automáticos, sin requerir de cableado, y la generación de electricidad se produce in situ [Laguna, 2011].

Estos sistemas resultan una excelente alternativa ecológica para iluminación en zonas urbanas y rurales, tales como parques, plazas públicas, calles, áreas verdes, jardines, autopistas, estacionamientos, canchas deportivas y de espectáculos. El sistema de operación está basado en la generación eléctrica por medio de la energía solar (módulos solares), para ser almacenados en un banco de baterías y usarse durante la noche, cuando la lámpara se enciende de manera automática.

Para evaluar la posibilidad de establecer los sistemas de luminarias solares, se valoran diferentes criterios, en los que el potencial solar juega un papel importante, pues de su calidad depende el nivel de eficiencia de los sistemas, así como otros factores, como son las características físicas del lugar de instalación, los peligros de desastres naturales que amenazan el territorio y los resultados económicos que se alcanzan, pues con ello se reduce el consumo de petróleo y se aminoran sensiblemente otros gastos asociados a impactos medioambientales.

La incorporación de los sistemas fotovoltaicos autónomos en el alumbrado público de las ciudades y asentamientos poblacionales, así como en las áreas perimetrales de objetivos importantes, representa un paso en las pretensiones por lograr la diversificación del sistema electroenergético cubano, dirigido a ir logrando una matriz energética más sostenible.

Desarrollo

Partiendo de que existen antecedentes de estudios para alumbrado público solar [público..., 2009], realizados por las necesidades de iluminación, considerándose los diversos factores que influyen en los niveles de iluminación, las características físicas del lugar de instalación y el costo comparativo entre luminarias solares y convencionales, el nivel de iluminación promedio es 30 luxes, lo que depende del modelo, la altura de montaje y el tipo de luminaria empleada.

Esta información ayuda a pensar en que las condiciones reales están dadas para diversificar el sistema de alumbrado público de las ciudades y las zonas perimetrales de los objetivos importantes.

Los datos como base de partida han sido tomados de la cartografía existente de la Isla de Cuba a escala 1:250 000, donde se muestran el potencial solar de cada territorio.

Para este estudio se utilizó el mapa de radiación solar publicado por SWERA [SWERA, 2001], a una resolución de 10 km, elaborado mediante el modelo SUNY, y el mapa del recurso solar a una resolución de 40 km mediante el uso del modelo CSR (*Climatological Solar Radiation*) del NREL. En la figura 1 se muestra el mapa de radiación solar en el plano inclinado que incide en el territorio nacional, y la ubicación de las principales ciudades donde se concentra la mayor demanda de energía para el alumbrado público y la iluminación perimetral de los objetivos importantes.

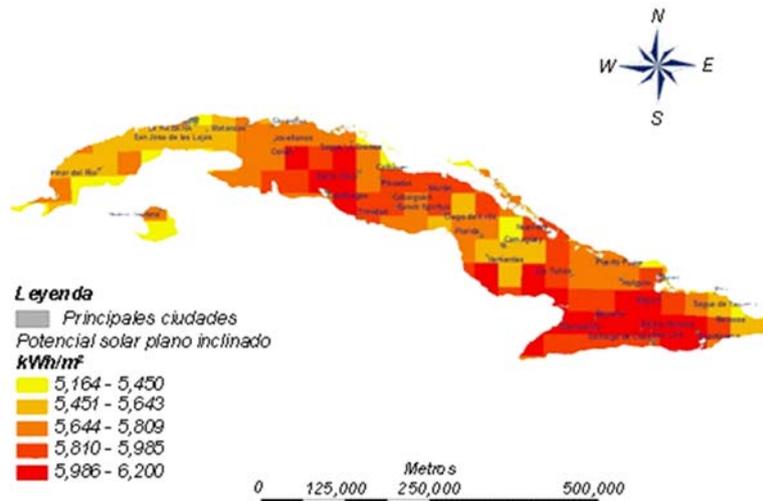
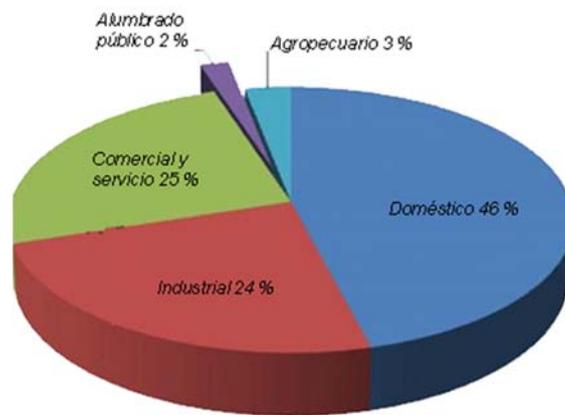


Fig. 1. Potencial solar en el plano inclinado y ciudades más importantes del país. Fuente: Elaboración propia.

Para poder realizar el estudio se tomó información referente al consumo de la energía generada en el país mostrados en la figura 2, en el 2009 [UNE, 2009].

Para el estudio se tomaron dos ciudades que presentan alto riesgo de impacto de desastres naturales: la ciudad de Santiago de Cuba por un sismo de gran intensidad y el municipio especial Isla de la Juventud por fenómenos hidrometeorológicos extremos. En estos territorios se analiza la utilización de las luminarias solares con el propósito agregado de garantizar el servicio de iluminación pública en situaciones de desastres, en caso de colapso del sistema eléctrico tradicional.



*Fig. 2. Destino de la generación de energía que se genera en el país.
Fuente: Elaboración propia (datos del despacho nacional).*

Valoración de los resultados

En el país, la demanda anual de electricidad del alumbrado público representa aproximadamente 2% del total, y 3,7% de la demanda del sector estatal. Considerando que en los momentos actuales 99,9% de la generación de electricidad se obtiene por la combustión del petróleo, como promedio diario esta actividad consume aproximadamente 51,5 MWh, con un consumo de 19,64 toneladas de combustible [UNE, 2009 y Turrini, et al., 2010]. Este consumo supone que anualmente se emiten a la atmósfera 31 821,11 toneladas de gases contaminantes. Estos datos pueden presentar valores superiores, si fuera posible calcular el consumo de energía del alumbrado perimetral de los objetivos importantes.

Existen otros gastos económicos asociados al manejo operacional del combustible, los lubricantes y de residuales, que implican la asignación de cuantiosos recursos.

Durante el estudio se elaboró un mapa con las principales ciudades y el potencial solar que incide en su territorio, demostrando la viabilidad de la introducción de las luminarias solares en las avenidas, perímetros de los centros sociales y económicos, etc., como forma de reducir la generación de energía por combustibles convencionales, mostrado en la figura 3.

Una cuestión que no debe soslayarse está relacionada con el objetivo social propuesto para la inversión, quedando planteada por definición que la introducción de las luminarias solares fotovoltaicas representa un alivio a la generación eléctrica convencional, a la vez que constituye una alternativa diversificadora del sistema con un importante valor de sostenibilidad medioambiental, aunque existen otros aspectos que en el orden territorial merecen análisis y que pueden significar prioridades.

El trabajo puede asumir la perspectiva de ciudades y zonas pobladas que presentan riesgos de desastres naturales y donde los sistemas fotovoltaicos autónomos, por sus características pueden ofrecer estabilidad al servicio de alumbrado público en condiciones y situaciones que los sistemas convencionales no pueden responder, como es el caso de las ciudades y pueblos del sur oriental cubano con peligro de ocurrencia de un sismo de gran intensidad, y las del occidente, con peligro de azote de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

El empleo de los sistemas fotovoltaicos pudiera tener aplicaciones en parques, jardines y plazas públicas, paseos, zonas residenciales, universidades, empresas, centros comerciales, estacionamientos, patios de maniobras y otras obras de interés.

El sistema de operación que se propone está basado en la generación eléctrica por medio de la energía solar (luminarias solares), para ser almacenada en un banco de baterías y usarse durante la noche, cuando la lámpara se enciende de manera automática. La solución propuesta requiere la ejecución de estudios integrales de factibilidad, en los que, entre otras, deberán realizarse las evaluaciones siguientes:

- Situación particular y detallada que presenta el sistema de alumbrado público y de iluminación perimetral de los objetivos importantes del territorio.
- Estudio del potencial solar y las exigencias del ordenamiento territorial, en base a los objetivos e intereses del desarrollo energético del territorio.
- Evaluación del potencial del alumbrado público solar [público..., 2009], para cada necesidad de iluminación.
- Evaluación de los niveles de iluminación.
- Estudio de las características del lugar de instalación. Debe estar libre de sombras prácticamente todo el día, ubicación de edificios, estructuras o condiciones climatológicas que impidan una buena insolación. Existen condiciones particulares a tomar en consideración como pueden ser temperaturas extremas, ambientes marinos o fuertes vientos.

- Análisis de factibilidad económica. Considerar los ahorros que la tecnología representa frente a los métodos tradicionales. Estos ahorros no solo se reflejan en el pago de consumo de energía eléctrica por concepto de iluminación exterior, que es nulo, sino que a la hora de realizar un trabajo de alumbrado público deben considerarse los costos, como tendido eléctrico convencional, zanjeado, reparación de asfalto, concreto, banquetas, etc., transformadores, medidores, líneas eléctricas, etc., y realizar cálculos sobre los costos de las externalidades asociadas a la generación eléctrica convencional, que se ahorran con los sistemas fotovoltaicos autónomos.
- Análisis de los riesgos de desastres naturales a los que está sometido el territorio. Este aspecto, por su importancia, se detalla más adelante.

Fundamento de la introducción

La propuesta está fundamentada en la visión diversificadora del sistema eléctrico tradicional, donde se puedan combinar los sistemas convencionales con los sistemas fotovoltaicos autónomos, en una proporción aproximada de 50% cada uno, es decir, intercalados en un mismo sistema. Esta alternativa de introducción de las renovables puede representar las ventajas siguientes para el país:

- Se incorpora tecnología de vanguardia en el sistema de iluminación pública, que ofrece más del doble de eficiencia que los sistemas tradicionales, reduciendo sensiblemente los costos por concepto de mantenimiento [Adapta, 2010].
- Se reduce el cableado, se incorpora la generación local independiente para cada lámpara y disminuye la vulnerabilidad del sistema [Adapta, 2010].
- Ofrecen una mayor vitalidad del servicio de alumbrado público; en caso de interrupciones provocadas por desastres, accidentes o limitaciones con el abastecimiento de combustibles, se asegura la actividad a 50%.
- Ante situaciones complejas de consumo eléctrico, garantiza la aplicación opcional de limitación del régimen del servicio de alumbrado público, aplicando alternativas adecuadas de ahorro y racionalidad sin afectar totalmente el servicio.
- Se reducen los costos asociados al manejo de residuales contaminantes del medio ambiente.
- Contribuyen al fomento de la cultura medioambiental en la población, propiciando su aceptación y confianza para la solución de determinadas demandas energéticas de la sociedad.

De aplicarse totalmente en el país la alternativa propuesta, representa liberar del consumo 7 168,6 toneladas de combustible anualmente, incrementando la disponibilidad de recursos económicos del territorio [Pérez y Rodríguez, 2010], dejando de emitir a la atmósfera 31 821,11 toneladas de gases contaminantes [Pérez y Rodríguez, 2010, y Alves, Chacón y Toledo, 2009].

Particularmente, algunos sistemas que se comercializan en la actualidad ofrecen autonomía para 4 días, sistemas de encendido y apagado con 10 programas, resisten vientos de hasta 150 km/h, garantizan la operación con rangos de temperatura entre $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$, y humedad 0% a 100%, mantenimiento cada 10 años y una vida útil probada en más de 10 años [solares..., 2010].

En la figura 4 se puede apreciar el esquema operacional del estos sistemas.

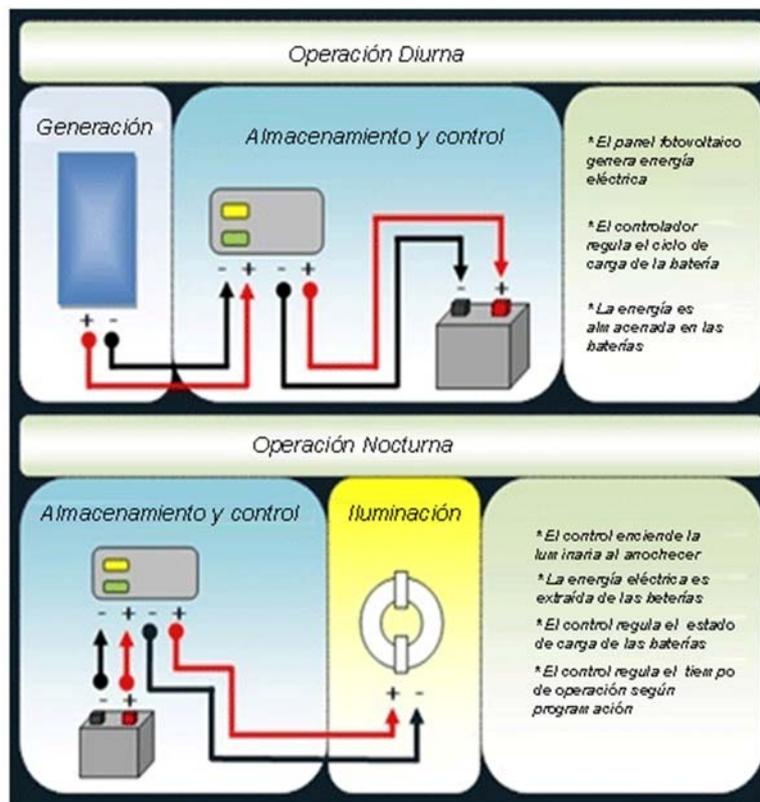


Fig. 4. Esquema operacional del sistema.
Fuente: Elaborado por [Adapta, 2010].

La Disciplina de Riesgos de Desastres Naturales debe ser tratada con rigurosidad, pues entre las estructuras socioeconómicas que se encuentran

más expuestas a estos fenómenos, son los elementos de la infraestructura eléctrica, y entre ellos, los de sistemas renovables, los más amenazados.

A partir de junio y hasta noviembre, los organismos tropicales se forman casi siempre en el Mar Caribe Occidental, y por lo general se mueven en trayectorias próximas al Norte-Noreste, por lo que son un peligro potencial para Cuba y en especial para la región occidental de nuestro país [Rodríguez, et al., 2010].

Las intensas lluvias pueden producirse por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos, como las ondas y bajas tropicales. Las depresiones, tormentas tropicales y los huracanes siempre vienen acompañados de intensas lluvias, prevaleciendo durante varios días torrenciales aguaceros, y continuando con lluvias intensas acompañadas de tormentas eléctricas [Rodríguez, et al., 2010]. Estos fenómenos suelen provocar frecuentes averías en el sistema de alumbrado público de las ciudades.

En los últimos años, la región occidental del país ha sido víctima de violentos fenómenos hidrometeorológicos extremos. En el 2008 azotaron a Cuba dos huracanes con comportamientos diferentes, pero que trajeron como consecuencia grandes destrucciones en todos los sectores de la sociedad, entre ellos la infraestructura del Sistema Electroenergético Nacional. Estos fenómenos destruyeron o dañaron gran parte de la infraestructura eléctrica existente, afectando el servicio eléctrico, la economía y la población por varios días.

En el 2010, y tomando como experiencia las consecuencias del impacto de estos fenómenos que afectaron el occidente del país en el 2008, se realizó un estudio sobre las consecuencias del impacto de un evento de esta naturaleza en la infraestructura eléctrica, información gestionada con la ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG), calculándose el estimado de los daños y pérdidas, así como las acciones a realizar para la protección de las fuerzas y medios ante el impacto del evento meteorológico [Rodríguez, et al., 2010].

El panel fotovoltaico es el principal componente del sistema, elemento captador mediante el cual se realiza la conversión de la energía de la radiación solar en eléctrica [Ramos, et al., 1996]. Por lo general, los módulos tienen forma plana, son livianos y los que se comercializan en el país tienen dimensiones aproximadas de 1,20 m², cualidades que los hacen fáciles de manejar y transportar, lo que posibilita su rápido montaje con la utilización de poca mano de obra y tiempos de realización muy breves; similares ventajas ofrecen para su desmonte, no requieren de combustibles y lubricantes para su funcionamiento y la reposición de componentes y piezas de repuestos es mínima.

Generalmente, los trabajos de mantenimiento se limitan a la limpieza de la superficie de los paneles para quitar polvo y otras suciedades que puedan dificultar la capacidad de captación de la radiación solar por las células fotovoltaicas [Ramos, et al., 1996].

Estas cualidades hacen que los sistemas fotovoltaicos autónomos sean menos vulnerables que las luminarias convencionales ante el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, pues con adecuadas medidas de protección que pueden cumplirse con rapidez y con una elevada economía de fuerzas y medios, se logra protegerlos y una vez terminado el peligro proceder a su montaje garantizando de inmediato el servicio para el que están destinados, aun cuando el sistema de líneas eléctricas haya colapsado.

El carácter modular y su autonomía operacional, los convierten en sistemas energéticos poco vulnerables ante un sismo de gran intensidad, pudiendo garantizar ininterrumpidamente el alumbrado público desde el mismo momento de ocurrencia del desastre, constituyendo una fuente local de energía eléctrica alternativa durante los trabajos de salvamento y reparación urgente de averías, desde los primeros momentos del sismo.

Los resultados del análisis recomiendan priorizar el estudio de implementación de estos sistemas en las zonas con alto riesgo sísmico.

Conclusiones

El potencial solar que incide en el territorio nacional es óptimo para ser aprovechado en interés de implementar los sistemas fotovoltaicos autónomos, como alternativa viable de diversificación sostenible del sistema de alumbrado público de las ciudades y núcleos poblacionales, así como la iluminación perimetral de objetivos importantes.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos destinados para alumbrado público de las ciudades y núcleos poblacionales, así como la iluminación perimetral de objetivos importantes, ofrecen menos vulnerabilidad que los sistemas tradicionales, ante la ocurrencia de los peligros de desastres más frecuentes a los que está sometido el territorio nacional, pudiendo aplicarse medidas de protección de los mismos con rapidez y una elevada economía de fuerzas y medios.

Los estudios realizados demuestran la economía y vitalidad de estos sistemas para situaciones extremas, por lo que se recomienda priorizar la utilización de los mismos en las zonas del país que presentan un mayor riesgo de desastres naturales.

Bibliografía

- ADAPTA, G. *Lámparas de alumbrado público con LEDs*. ADAPTA ECO GENERACIONSA DE CV, 2010. ADAPTA ECO GENERACION (juan@grupoadapta.com.mx).
- ALVES, R.; F. CHACÓN Y H. TOLEDO. *Estudio técnico-económico de factibilidad de generación fotovoltaica en Venezuela*. II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica, 2009.
- ARRASTÍA, M. A. *Importantes objetivos sociales cubanos utilizan sistemas fotovoltaicos*. *Juventud Rebelde*, 2009.
- GÓMEZ, A. *120 años de electricidad en Cuba: una ventana técnica hasta el siglo xx, desde la mirada futurista de Martí*. Resumen de la 15 Convención de Ingeniería y Arquitectura, 2001. Reporte bibliográfico.
- LAGUNA, G. A. *Lámparas de alumbrado público con LEDs*. ADAPTA ECO GENERACIONSA DE CV, 2011. Catalogo Alumbrado PúblicoLED.
- PÉREZ, I. Y MARÍA RODRIGUEZ. *Gestión de la información de la generación distribuida en Cuba con un Sistema de Información Geográfico*. GConocimiento, Energía para el desarrollo, 2010. 1 No 11. ISSN 2219-6927.
- publico.html, I.s.a., *Alumbrado público solar*. Luminarias Solares, 2009.
- RAMOS, R., et al. *PVSoft. Herramienta virtual sobre sistemas solares fotovoltaicos*. Academia de Ciencias de Cuba, 1996.
- RODRÍGUEZ, M., et al. *Aplicación del Sistema de Información Geográfica (SIG) al estudio del impacto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, en la infraestructura eléctrica de la Isla de la Juventud (Caso de estudio)*. VIII Congreso Internacional sobre Desastres. La Habana, Cuba, 2010.
- solares.html. *Sistemas fotovoltaicos autónomos para alumbrado público*. SolCan Soluciones Ambientales, S.L.L, 2010. Información legal.
- SWERA-Project. *Data for Solar and Wind Renewable Energy*. 2001(1/03/2007). 2001.
- TURRINI, ENRICO; ALEJANDRO MONTESINOS, AMADO CALZADILLA, et al. *Solarización territorial. Vía para el logro del desarrollo sostenible*. La Habana: Ed. CUBASOLAR, 2010. ISBN 978-959-7113-39-3. p. 76.
- UNE, D.d.c. *Informe del Despacho Nacional de Carga*. 2009.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

M.Sc. Manuel Álvarez González.

EDITOR JEFE:

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

EDITORA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

M.Sc. Manuel Fernández Rondón.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. David Pérez Martín.

Dr. César Cisnero Ramírez



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>