

## Modelo y simulación del sistema de potencia híbrido en régimen aislado para la ciudad de Moa

**Andy Pupo Torres**

[aptores@electronica.ismm.edu.cu](mailto:aptores@electronica.ismm.edu.cu)

**Ángel José de la Cruz Rodríguez**

Complejo Agroindustrial Azucarera Antonio Guiteras

**Yordan Guerrero Rojas**

[yguerreror@ismm.edu.cu](mailto:yguerreror@ismm.edu.cu)

**Gabriela Romero Reyes**

[yguerrerorojas@gmail.com](mailto:yguerrerorojas@gmail.com)

Universidad de Moa

**Resumen:** Se analizaron escenarios mostrando el comportamiento de variables eléctricas fundamentales para garantizar una adecuada calidad de la energía a los clientes mediante la simulación en Matlab. La herramienta desarrollada parte de los datos reales de los elementos del sistema eléctrico de Moa y la adecuación de modelos del Simulink. Dada la configuración de los circuitos de distribución es posible formar el sistema híbrido de Moa con una capacidad de 20,23 MW.

**Palabras clave:** circuito de distribución; red aislada; modelación; calidad de la energía.

## Model and simulation of the hybrid power system in isolated regime for the city of Moa

**Abstract:** Scenarios were analyzed showing the behavior of fundamental electrical variables to guarantee an adequate quality of energy to customers through simulation in Matlab. The developed tool is based on the real data of the elements of the Moa electrical system and the adaptation of Simulink models. It is possible to form the Moa hybrid system with a capacity of 20.23 MW, conditions given by the configuration of the distribution circuits.

**Keywords:** distribution circuit; isolated network; modeling; power quality.

## Introducción

El aprovisionamiento de energía en las condiciones actuales requiere de una solución diferente a las tradicionales formas de electrificación (Lagunas *et al.*, 2004). Las dimensiones de las redes convencionales pueden reducirse en micro redes, donde el uso de las energías renovables, resulta atractivo por sus aportes como una vía para reducir el consumo de combustible fósil y el impacto positivo en el medio ambiente.

El empleo de las fuentes renovables de energía conectadas directamente a la red o con almacenamiento, ha conllevado a una descentralización de la producción de electricidad, dando paso a la Generación Distribuida (GD). La energía eólica, plantas solares y de biomasa, mini hidroeléctricas y celdas de combustible, son ejemplos de la consolidación de las fuentes renovables de energía dentro de los sistemas de potencia distribuidos (González, 2008). La combinación de dos o más de estas fuentes da lugar a los Sistemas Híbridos de Generación de Electricidad (SHGE). Estos sistemas pueden ser parte o no de grandes redes de electricidad centralizadas. Los generadores diesel pueden ser portables, modulares y tienen una alta relación potencia por peso, lo que los hace una fuente ideal para estos sistemas híbridos de potencia, sobre todo en redes aisladas con potencial eólico o solar. Con vistas a reducir el uso del costoso combustible diesel, los sistemas híbridos siempre incluyen otra fuente de potencia como el viento, el sol o el agua.

Para maximizar el uso de las fuentes renovables el tamaño y operación de los componentes del sistema híbrido de generación necesita corresponderse con la carga y los recursos renovables disponibles. Esto como mejor se logra es utilizando modelos computarizados (Manwell *et al.* 2006). Para maximizar el uso de estas fuentes renovables combinadas en forma de un sistema híbrido de generación se pueden crear las micro-redes, cuyo análisis se puede lograr con el uso de modelos computarizados.

## Bases para el estudio

El municipio Moa cuenta con una Central Eléctrica Fuel, generadores diesel de emergencia, una pequeña central hidroeléctrica de 2 MW y potencial para la generación eólica. Todas estas fuentes pueden estar sincronizadas entre ellas, operando aisladas del Sistema Electroenergético Nacional como un Sistema Híbrido de Generación de Electricidad (SHGE). Bajo estas condiciones aparecen anomalías durante la asimilación de demanda residencial, respuesta ante fallas y la sincronización que

suceden sin ser estudiados por la carencia de herramientas que determinen el comportamiento de la micro-red de Moa alimentada con el sistema híbrido local. En Guerrero 2012 se crea un modelo de simulación para el estudio de esta micro-red pero no considera la presencia de una Central Fuel, lo que conlleva al desconocimiento del comportamiento del microsistema bajo estas nuevas condiciones.

### **Modelación y simulación de aplicaciones híbridas**

Cada territorio adapta las tecnologías a sus potenciales. En vista a extraer el mayor porcentaje de beneficios de estos sistemas se potencia el uso de softwares de simulación que se encargan de reducir la experimentación por el método de prueba y error. Existen varios autores que han creado modelos útiles para este fin. Gavanidou *et al.* (1993) Proponen un modelo probabilístico de simulación de sistemas híbridos Eólico-Diesel (sin baterías) basado en el uso de datos estadísticos de las cargas y de la velocidad del viento. Se calcula la producción anual de energía eléctrica de los aerogeneradores, el coste anual del gas oil, la probabilidad de pérdida de carga y la energía no suministrada, proponiendo un máximo de penetración eólica (por ciento de energía suministrada por los aerogeneradores) para que el sistema cubra la demanda esperada. No utilizan Matlab ni hidroenergía. La simulación está dirigida a dar protagonismo a la eoloenergía sin un análisis para diferentes por cientos de carga y generación diesel.

El lenguaje de modelación de sistemas híbridos, se diseña para soportar las definiciones dadas por (Ashari & Nayar, 1999). Estos sistemas se pueden expresar informalmente como una interconexión arbitraria de componentes que son instancias arbitrarias de sistemas continuos y discretos en el tiempo (Taylor, 1994). Existen distintos softwares creados que son utilizados globalmente y actualizados a versiones cada vez más cercanas a los requerimientos reales de experimentación. Hytech, Hibrid, Hibrid 2, Homer son herramientas automática para analizar, simular y verificar la implementación de los sistemas híbridos. Esencialmente se destinan para sistemas sin acceso a los datos de configuración al detalle de cada una de los componentes del sistema, a diferencia del Matlab, que permite la edición de los parámetros incluso de excitación de los generadores.

Dumitru & Gligor (2010) desarrollan un sistema híbrido en bloques del Simulink de Matlab diseñado para una aplicación con almacenamiento de energía, régimen aislado

y con cargas de baja potencia. El modelo utilizado emplea generación solar, eólica e hídrica, además de un banco de baterías, como se muestra en la figura 1.

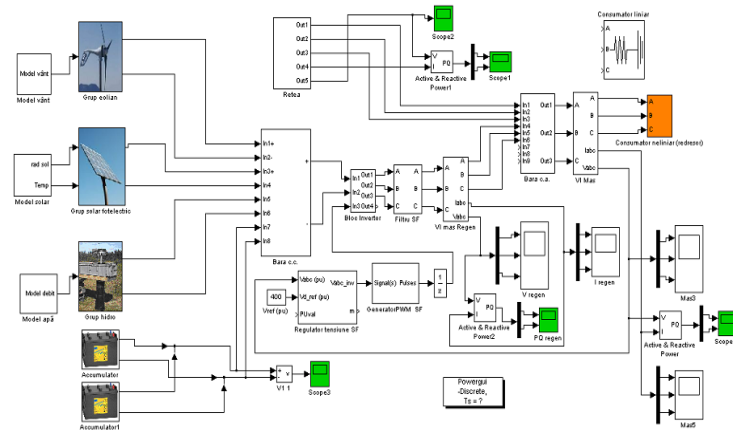


Figura 1. Modelo de simulación en Matlab/Simulink de un sistema híbrido basado en energías renovables (Dragoş & Gligor, 2010).

Para modelar estos sistemas se han desarrollado otras herramientas sin embargo, el Matlab permite acceder a cada elemento de las máquinas, redes y cargas eléctricas para su configuración, es un programa que está en constante actualización de todas sus librerías obteniendo resultados muy cercanos a los reales.

### Caracterización del sistema de distribución de Moa

El suministro de energía eléctrica es centralizado y proviene de la subestación de Cueto (a una distancia de 125 km), con un nivel de tensión de 220 kV hasta la subestación ubicada en Punta Gorda.

De la subestación de Punta Gorda se alimenta la subestación Moa 220 kV en la parte noroeste del municipio, a esta última se conecta la Central Eléctrica Moa formada por 10 Grupos Electrónicos Fuel Oil, con una capacidad instalada de 184 MW. La instalación alimenta 7 subestaciones de distribución por más de 87,465 km de líneas eléctricas con más de 78 358 consumidores entre los que se destacan las empresas productoras de níquel de Moa.

Las subestaciones Moa Nueva, Vivienda Checa y Puerto Moa son las encargadas de la distribución hacia los 12 circuitos residenciales urbanos, los que junto a los clientes pequeños estatales y las dos empresas niquelíferas en el transcurso de los años han incrementado la demanda en el municipio. Para la Central Fuel Oil de Moa ha sido un

reto saber cómo suplir esta demanda de una forma eficiente sin tener altos gastos de combustible cuando se está aislado del sistema ya que la generación de esta gran central en este modo es muy superior y si se conocen estos picos de demanda se pueden desconectar algunos generadores de forma tal que se pueda economizar combustible fósil y reducir la emisión de gases a la atmósfera manteniendo un equilibrio en cuanto a generación vs demanda.

Las curvas de la figura 2 representan la demanda total del municipio que cuenta con todos los circuitos residenciales, estatales y las dos fábricas de níquel Pedro Sotó Alba y Ernesto Che Guevara, observándose en esta que durante los meses de invierno alcanza valores más elevados que en los meses de primavera con una demanda de hasta 42, 905 MW.

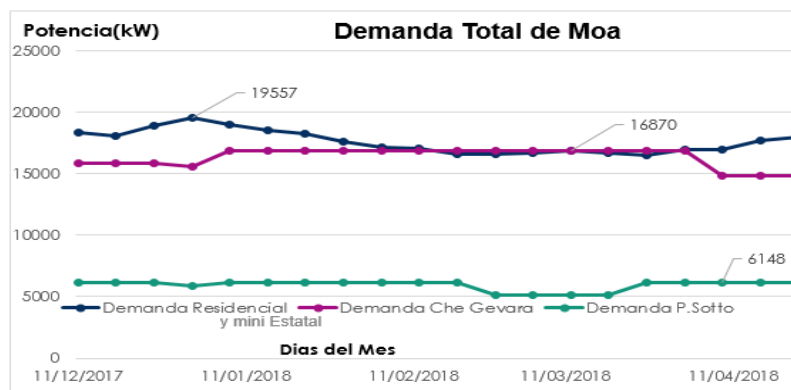


Figura 2. Comportamiento de la demanda residencial y estatal. Diciembre 2017/Abril 2018.

Esta demanda es muy inferior a la que podría existir si las empresas de níquel Pedro Sotó Alba y Ernesto Che Guevara no contaran con generación propia demandaran toda su energía de la red nacional.

Además de la CTE Moa el municipio cuenta con otra fuente de generación, la Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Mundo.

### Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Mundo

La Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Mundo cuenta con 2 MW de capacidad instalada, esta planta generadora de electricidad se encuentra a 44 m por debajo del dique de salida de la presa del mismo nombre, la que tiene una capacidad nominal de 141 millones de m<sup>3</sup> y se mantiene relativamente constante a través del año, lo que asegura el recurso hídrico para que las turbinas trabajen de forma continua. Esto es

debido al magnífico régimen de lluvias que prevalece en la región montañosa donde se encuentra. La instalación cuenta con dos turbinas de caudal de  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  cada una, para un chorro total de  $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La tensión de los generadores es de  $6,3 \text{ kV}$  la que posteriormente se eleva a  $13,8 \text{ kV}$  en la subestación de salida con un transformador de  $2\ 500 \text{ kVA}$ . Esta central se conecta con el circuito residencial seis, del reparto Rolando Monterrey.

### Potencial eólico

Partiendo del análisis autorizado y tratamiento de los registros de velocidad y dirección del viento se determina el potencial eólico del territorio confeccionando la rosa de los vientos y una distribución de Weibull como las que se muestran en la figura 3, donde se aprecia el predominio del viento estenordeste hasta el noreste. Con la aplicación de las herramientas estadísticas del Excel y Statistic se obtienen para la estación Unidad Militar los valores correspondientes de desviación estándar, mediana, moda, entre otros parámetros útiles para el estudio estadístico, obteniéndose una velocidad media de  $6.04 \text{ m/s}$  y un potencial de  $23.04 \text{ MW}$  en el área estudiada.

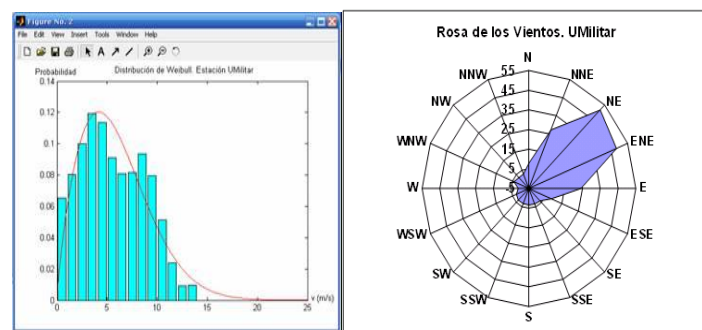


Figura 3. Distribución de Weibull y Rosa de los vientos estación UMilitar de Moa (Guerrero, 2012).

### Modelos de los elementos del sistema híbrido

Para el desarrollo del trabajo se emplea la simulación partiendo de modelos que responden a las condiciones reales de los dispositivos que conforman el sistema híbrido. Del Toolbox SimPowerSystem de la herramienta Simulink del Matlab, se utilizan cada uno de los modelos raíces existentes y se adaptan a los reales ubicados en el sistema de distribución de Moa, se simulan por separado y luego se interconectan. Cada uno de los componentes está acompañado por bloques de

medición y visualizadores de Matlab para voltaje, factor de potencia, potencia activa, reactiva y formas de ondas.

**Modelo de la CTE Moa**

Para crear el modelo de un grupo electrógeno se parte del bloque del generador sincrónico de SimPowerSystem de simulink: Synchronous Generator SI Fundamental y se combina con el bloque del motor de combustión del toolbox SimMechanics, también de simulink. Con ambos se crea el subsistema (Grupo electrógeno) de la figura 4. Por las características idénticas de estas máquinas configurando los parámetros internos de una se tienen los de las 9 restantes, de ser necesaria alguna modificación es posible realizarla accediendo al bloque que se desea.

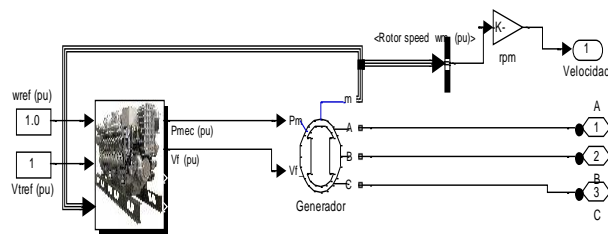


Figura 4. Modelo de la máquina sincrónica y el motor de combustión. Grupo electrógeno.

La velocidad y la excitación de referencia se prefijan mediante los bloques de constantes a un valor unitario por unidad (pu), correspondiente a los parámetros nominales.

**Modelo de la pequeña central hidroeléctrica**

El modelo de la pequeña central hidroeléctrica está constituido por dos unidades generadoras de 1 MW cada una.

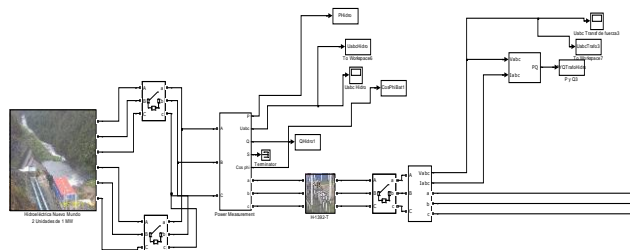


Figura 5. Modelo de las dos unidades de la PCHE enmascaradas y su trafo de salida (Guerrero, 2012).



### Modelo del parque eólico

El modelo del parque se forma a partir de generadores asincrónicos conectados a su transformador elevador para su posterior conexión a barra. En el modelo de la turbina eólica la velocidad del viento se introduce con valores dentro del rango de velocidades registradas en la estación anemométrica estudiada. Se declara además el tiempo de transición de una velocidad a otra, así como el límite de velocidad o velocidad de corte (25 m/s).

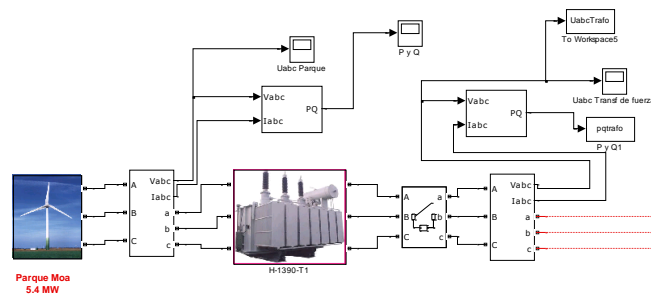


Figura 6. Modelo del parque eólico y su transformador de fuerza (Guerrero, 2012).

### Cargas

La conexión de las tres subestaciones principales que alimentan los 12 circuitos residenciales se realiza a la barra de 34,5 kV. Se crean los modelos a partir de la interconexión de los trafos de distribución y sus circuitos residenciales asociados.

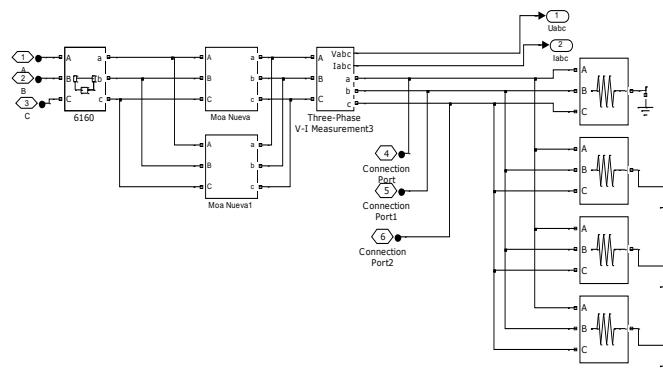


Figura 7. Modelo de subestación Moa Nueva con transformadores en paralelo (Guerrero, 2012).

### Modelo del sistema híbrido

El sistema híbrido está compuesto por diez grupos electrógenos Fuel que forman la CTE Moa, las dos unidades de la pequeña central hidroeléctrica Nuevo Mundo y un parque eólico cuya instalación es posible, además de los principales grupos

electrógenos de emergencia que funcionan en el territorio. Los diez grupos electrógenos se combinan para formar un subsistema que representa a la CTE Moa, las dos unidades de la pequeña central hidroeléctrica se unen en el subsistema pequeña central hidroeléctrica, y el parque eólico.

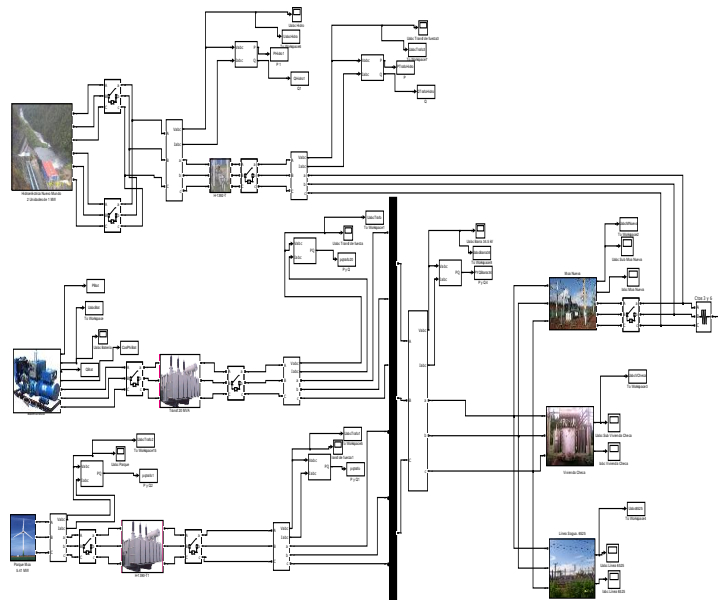


Figura 8. Modelo de sistema híbrido Fuel-diesel-hídrico-eólico.

### Simulación del sistema híbrido

Ha sucedido que durante el funcionamiento aislado por causas determinadas, ya sincronizados los sistemas de generación, se dificulta la entrega de energía a largas distancias, existen pequeñas variaciones bruscas en la carga que provocan disparos en el microsistema. Las causas de este comportamiento pueden estar dadas por la entrada de las subestaciones de distribución, la falta de reserva rodante y la conexión de carga industrial imprevista. Para ello se realiza una simulación con varias corridas para corroborar estas situaciones. En este trabajo se considera el total de las máquinas disponibles y la plena generación de la pequeña central hidroeléctrica Nuevo Mundo y el parque eólico de 5,4 MW al 50% de su capacidad para una velocidad de 6,04 m/s (velocidad promedio en la estación anemométrica estudiada).

### CTE en vacío

Siguiendo el procedimiento establecido para el funcionamiento en régimen isla, se inicia la operación de la instalación con una máquina y se van sincronizando automáticamente las demás, una vez sincronizadas entre sí todas las unidades

disponibles se cierra el totalizador de la barra de 13,8 kV que alimenta al transformador de 70 MVA, el que se encarga de entregar los 120 kV a la barra dos de la subestación Moa 110 kV, esta se encuentra aislada del sistema por medio de la apertura de los interruptores de las dos líneas 220 kV provenientes de la subestación Punta Gorda. Esta subestación está en vistas a desaparecer al ya existir Moa 110 kV. El proceso real demora alrededor de ocho minutos.

En la figura 9 se muestra el comportamiento de la tensión en la barra de 13,8 kV de una máquina una vez sincronizadas todas las unidades de la CTE operando en vacío. La comparación del resultado de la simulación con el comportamiento real de la instalación valida al modelo de esta instalación.

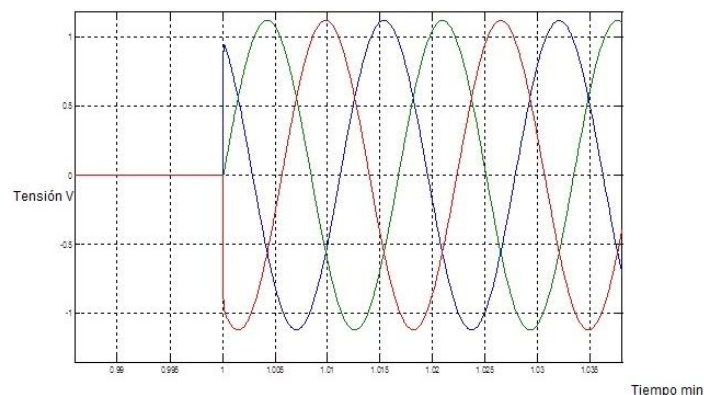


Figura 9. Simulación del comportamiento de la tensión en una máquina durante la marcha en vacío.

La operación con la carga residencial asociada está estrechamente vinculada al porcentaje de explotación de la instalación. Ha quedado demostrado que al 75 % de capacidad se satisface la demanda residencial de Moa y es posible ampliar el micro sistema hasta Sagua de Tánamo, lo que conlleva que el funcionamiento del micro sistema se analice considerando las máquinas al 85 %. La simulación al 100 % es única por ser este porcentaje limitado al funcionamiento con la red o en situaciones excepcionales que exijan la ampliación del micro sistema a regiones más distantes como Banes o Mayarí, llegar a distancias superiores como la ciudad de Holguín conlleva a la presencia de una potencia reactiva por el efecto capacitivo de las largas líneas que no es posible asimilar por las máquinas de la CTE provocando disparos en el micro sistema.

## SHGE aislado con carga residencial

Una vez establecida la demanda que se alimentará se procede al cierre de los interruptores en las subestaciones distribuidoras. La carga a conectar debe respetar la presencia de la reserva rodante que va quedando en el sistema. En la figura 10 se muestra como los niveles de tensión para la capacidad instalada en el SHGE cuando opera al 75 %, no se mantiene en los niveles de nominales ante la conexión de la carga residencial, es apreciable la caída de tensión de 6,5 kV al conectarse la carga residencial de Moa cuando deberían existir 13,8 kV.

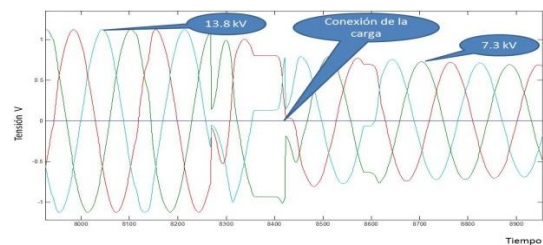


Figura 10. Caída de tensión en máquina ante la conexión de las subestaciones residenciales.

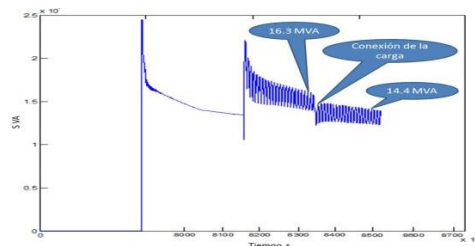


Figura 11. Comportamiento de la potencia aparente con carga residencial.

En la figura 11 se muestra el comportamiento de la potencia aparente en los momentos de conexión de las cargas con la CTE al 85%. La entrada de las fuentes renovables de energía produce una reducción del consumo de combustible fósil de la CE siendo de gran impacto para la conservación del medio ambiente en la región con un aire bastante contaminado por la producción minera.

Además de la simulación del modelo de la Central Fuel se cuenta con la simulación de la pequeña central hidroeléctrica de forma aislada.

## Pequeña Central Hidroeléctrica en vacío

En la figura 12 se aprecia que a los 960 s ocurre la entrada o sincronización de la segunda unidad de la pequeña central hidroeléctrica, la sincronización se realiza con el

sistema por solo contar la instalación con un panel de sincronización. La tensión durante la marcha en vacío se mantiene en los valores nominales (6,3 kV).

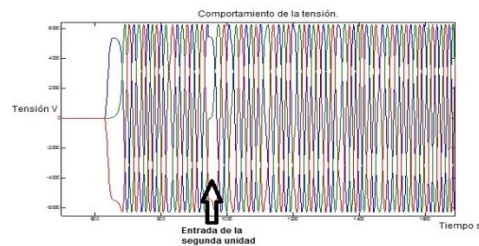


Figura 12. Comportamiento de la tensión en la pequeña central hidroeléctrica Nuevo Mundo durante la marcha en vacío.

La potencia de la instalación es de 2,5 MVA, durante la simulación se considera la capacidad plena de la pequeña central hidroeléctrica, bajo el criterio que el volumen de agua almacenada y la periodicidad de las lluvias en el territorio permiten el régimen de explotación propuesto.

### Parque con carga residencial de la subestación Vivienda Checa

En la figura 13 se observa como la conexión de la carga de la subestación Vivienda Checa con 6,3 MW provoca una caída significativa de tensión en el parque eólico al no contar con generación suficiente para suplir esta demanda por sí solo.

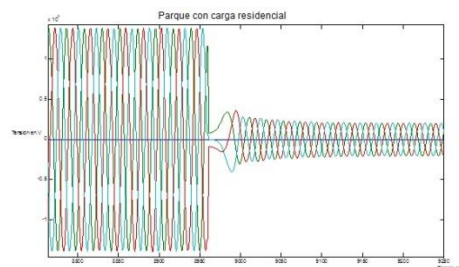


Figura 13. Comportamiento de tensión en barra de 13,8 kV con carga residencial. Parque en isla.

### Simulación durante la sincronización

Para agilizar la entrada de los datos a los modelos, se han editado los subsistemas para que sean solicitados los parámetros de los componentes del microsistema. De esta forma es posible introducir diferentes valores de potencia en las subestaciones de distribución para observar el comportamiento de las variables que se miden en los generadores, transformadores de fuerza, barras y subestaciones.

Tomando la demanda de la carga desde las subestaciones principales, se tiene que entre Moa Nueva y Vivienda Checa, alcanzan a las 8:00 am, un total de 13,8 MW, inferior a la capacidad instalada en la CE Moa cuando opera al 85 % que es de 156,4 MW, a esta se le une la pequeña central hidroeléctrica con sus 2 MW y un parque eólico con 5,2 MW, para un total de 163,6 MW quedando capacidad suficiente para asumir la demanda fuera del horario pico.

Al iniciarse el horario pico del mediodía la demanda aumenta y la generación disponible si se desconectan 9 máquinas de la CE y no se logra superar los 15,2 MW, por lo que es necesaria la desconexión de los clientes para evitar caídas de voltaje considerables. En la figura 14 se aprecia la caída de tensión que se experimenta en la barra de 34,5 kV de la subestación Moa 110 kV ante la conexión de la carga residencial si solo opera una máquina de la CE Fuel de Moa.

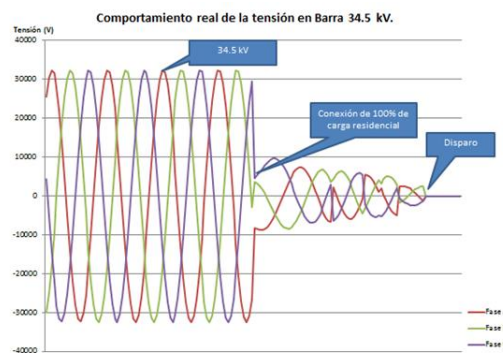


Figura 14. Comportamiento de tensión en barra de 34,5 kV con toda la carga residencial e industrial. Subestación Moa 110 kV.

Esta simulación muestra como el modelo simulado satisface los requerimientos del problema planteado y posibilita la toma de decisiones sin ser necesario experimentar por el método de prueba y error.

## Conclusiones

Existen posibilidades de formar el sistema híbrido de Moa con una capacidad de 20.23 MW, condiciones dadas por la configuración de los circuitos de distribución.

Las simulaciones de los modelos independientes de los elementos del sistema híbrido de Moa responden a los componentes reales existentes en el circuito de distribución y

permiten la toma de decisiones sin necesidad de experimentar por método de prueba y error.

El modelo general se puede extender a otros sistemas híbridos autónomos de configuración semejantes.

Al modelo del microsistema es posible adicionarle los bloques correspondientes al almacenamiento de energía a nivel de distribución.

### Referencias bibliográficas

ASHARI, M. & NAYAR, C. V. 1999. An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system. *Solar energy* 66(1): 1-9.

DRAGOŞ, C. & GLIGOR, A. 2010. Modeling and simulation of renewable hybrid power system using matlab/simulink environment. *Acta Marisiensis. Seria Technologica* 7(2): 5.

GAVANIDOU, E. S.; BAKIRTISIS, A. G. & DOKOPOULOS, P. S. 1993. A probabilistic method for the evaluation of the performance and the reliability of wind-diesel energy systems. *IEEE Trans. on Energy Conversion* 8(2): 197-206.

GONZÁLEZ, Y. A. 2008. *Impacto de la introducción de la Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico de Potencia*. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minmero Metalúrgico. Moa, Holguín.

GUERRERO, Y. 2012. *Modelación y simulación de sistema híbrido de generación de electricidad para la ciudad de Moa*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minmero Metalúrgico. Moa, Holguín.

LAGUNAS, J.; CARATTOZZOLO, P.; ORTEGA, C. & GONZÁLEZ, R. 2004. Control supervisorio difuso para sistemas híbridos de generación eléctrica. In *Siguiendo el camino de las estrellas: libro de actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. 14-18 septiembre 2004, Vigo, Galicia, España* (pp. 825-830). Asociación Española de Energía Solar.

MANWELL, J. F.; ROGERS, A.; HAYMAN, G.; AVELAR, C. T., MCGOWAN, J. G.; ABDULWAHID, U. & WU, K. 2006. Hybrid2—a hybrid system simulation model—theory manual. Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts.

TAYLOR, J. H. 1994. A rigorous modeling and simulation package for hybrid systems. *US National Science Foundation SBIR Report, Award No. III-9361232, Odyssey Research Associates, Inc.*