



SmartGrid proposal in communities of Guama Municipality of Santiago de Cuba Province

Julio Fong Barrio¹, Hugo Domínguez Abreu², Israel F. Benítez Pina³, José Ricardo Núñez Alvarez⁴

¹Master del Dpto. Ing. Automatica – Facultad de Ingenieria Electrica – Universidad de Oriente – Santiago de Cuba-Cuba.

²Master del Dpto de Informatica - Facultad de Ingenieria Electrica – Universidad de Oriente – Santiago de Cuba-Cuba.

³Doctor Dpto. Ing. Automatica – Facultad de Ingenieria Electrica – Universidad de Oriente – Santiago de Cuba-Cuba.

⁴Master del Dpto. de Ing. Civil – Facultad de Ing. Civil y Ambiental – Corporación Universitaria de la Costa - Barranquilla- Colombia.

Email: jfong@uo.edu.cu, hdom@uo.edu.cu, ibenitez@uo.edu.cu, ricardo10971@gmail.com

ABSTRACT

Received: April 14th, 2018

Accepted: June 06th, 2018

Published: June 30th, 2018

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International

License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Socio-economic development in Cuba imposes the need to use renewable sources of energy for the electric power generation. In isolated rural communities of the eastern mountainous region of Cuba, these factors are combined with poor accessibility, absence of connection to the national energy system and strong economic potentials that need to be exploited. Therefore, this work includes a study of the potential of renewable sources of energy in the eastern mountainous region of Cuba and in particular in the municipality of Guama. It also proposes its integration into micro-SmartGrids that allow achieving the quality and stability of the electricity supply as a base to increase the socio-economic development of the region at the level of the rest of the country.

Keywords: Renewable energy sources, electric micro grids, mini-hydroelectric plants, photovoltaic cells, biomass generators.

Propuesta de Smart Grids en comunidades del Municipio Guamá de la Provincia de Santiago de Cuba

RESUMEN

El desarrollo económico y social de Cuba impone la necesidad del uso de fuentes renovables de energías para la generación de energía eléctrica. En comunidades rurales aisladas de la región montañosa oriental de Cuba, se combinan estos factores con la poca accesibilidad, falta de conexión al sistema energético nacional y fuertes potencialidades económicas que necesitan ser explotadas. Por lo anterior, este trabajo recoge un estudio de potencialidades de fuentes renovables de energías en la región montañosa oriental de Cuba y en particular en el municipio Guama. Además se propone su integración en micro-SmartGrids que permitan lograr la calidad y estabilidad del suministro eléctrico como base a incrementar el desarrollo socio-económico de la región al nivel del resto del país.

Palabras Claves: Fuentes renovables de energía, microredes eléctricas, mini-hidroeléctricas, células fotovoltaicas, generadores a biomasa.

I. INTRODUCCION

Cuba es un país que posee una extensión territorial de 114 525 km² con una longitud de aproximadamente 1200 km y ancho que oscila entre 31 y 191km. Por su característica geográfica no dispone de grandes ríos, pero por encontrarse en la zona ecuatorial dispone de grandes recursos energéticos solares y

eólicos y por disponer de grandes centrales azucareros puede disponer de gran volumen de biomasa para la generación de energía eléctrica.

El desarrollo económico y social de Cuba impone la necesidad del uso de fuentes renovables de energías para la generación de energía eléctrica. Las fuentes renovables de energía más atractivas son la hidráulica, eólica, solar y biomasa, y juega

un papel importante debido a los altos precios de los combustibles fósiles y al cambio climático por el uso excesivo de combustibles convencionales que generan gases de efecto invernadero.

En comunidades rurales aisladas del territorio nacional, como es el caso de la región montañosa oriental, se combinan estos factores con la poca accesibilidad, falta de conexión al sistema energético nacional y fuertes potencialidades económicas que necesitan ser explotadas para el desarrollo del país y su equilibrio con el desarrollo social del resto del territorio nacional.

Se han desarrollado sistemas aislados con varias fuentes renovables, pero la garantía de un suministro estable y con la calidad requerida para el verdadero desarrollo socio-económico de la región solo será logrado con la integración de las diferentes fuentes en un sistema automatizado que permita sincronizar los diferentes generadores, almacenar los excedentes y reutilizarlos en los picos, logrando estabilidad de los parámetros eléctricos y calidad del servicio contaste las 24 horas. Estos sistemas se conocen internacionalmente como microredes eléctricas inteligentes distribuidas o también micro-SmartGrids (MSG).

Por lo anterior, este trabajo recoge un estudio de potencialidades de fuentes renovables de energías en la región montañosa oriental de Cuba y en particular en el municipio Guama. Además se propone su integración en micro-SmartGrids que permitan lograr la calidad y estabilidad del suministro eléctrico como base a incrementar el desarrollo socio-económico de la región al nivel del resto del país.

En la parte 2 se explican los antecedentes de este trabajo. En la parte 3 se evalúan las posibilidades de la región y de las tecnologías que pueden ser utilizadas. En la parte 4 se resumen los aspectos principales de una micro-SmartGrid adecuada a las posibilidades de la región. En la parte 5 se detallan particularidades de diseño e instalación de una micro-SmartGrid con fuentes renovables en una de las comunidades aisladas con más posibilidades, Ocuja del Turquino.

Este trabajo se inserta dentro del proyecto científico C&C de la Universidad de Oriente titulado: Desarrollo de prototipos de laboratorio para microredes y propuestas de localizaciones de estas.

II. ANTECEDENTES EN GENERACION ELECTRICA CON FUENTES RENOVABLES

La energía hidráulica, como fuente alternativa, constituye la vía ideal para evitar la contaminación, garantizar la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible. Por esto, en las últimas décadas, la instalación de micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas, principalmente en las regiones montañosas del país, apartados del Sistema Electro-energético Nacional, ha tenido un fuerte impulso, con el objetivo de electrificar comunidades rurales, objetivos económicos y sociales.

Actualmente Cuba posee 181 micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas, de las cuales solo 31 se encuentran conectadas al Sistema Electro-energético Nacional. Estas se encuentran ubicadas fundamentalmente en las provincias de Guantánamo con 67, Granma con 30 y Santiago de Cuba con 23. Las instalaciones hidro-energéticas que trabajan en modos aislados se encuentran ubicadas en zonas montañosas y alejadas del Sistema electro-energético Nacional [1,2].

Las tres provincias cubanas de mayor por ciento montañoso son: Santiago de Cuba que tiene una extensión de 6156 km², Guantánamo con 6168 km² y Granma con 8375 km² que precisamente reúnen la mayor cantidad de micro-hidroeléctricas

ya instaladas y que adicionan potencialidades fotovoltaicas, eólicas y de biomasa.

Las primeras instalaciones hidroeléctricas construidas en Cuba, comenzaron a principios del siglo XX, cuando se pusieron en explotación pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, de los cuales algunos se mantienen generando en la actualidad, como la mini hidroeléctricas Salto de Pilotos con una potencia de 295 kW y la de San Vicente con una potencia de 72kW, construidas en 1912 en Pinar de Rio y la Pequeña Central Hidroeléctrica Guaso, construida en 1917 en Guantánamo, con una potencia instalada de 1500 Kw [1]. La Figura 1 presenta una foto de la sala de máquina de la PCH El Guaso (Guantánamo, Cuba).

En los primeros años de la Revolución se concluyó y se puso en explotación la central hidroeléctrica Hanabanilla con 43 MW de potencia instalada.



Figura 1: Sala de máquina de la PCH El Guaso (Guantánamo, Cuba).
Fuente: Los autores, (2018).

También desde hace varios siglos se ha utilizado el bagazo de caña para la generación de vapor y desde el siglo XIX para la generación de electricidad en los centrales azucareros.

En la actualidad Cuba dispone de varias instalaciones para la generación de energía eléctrica utilizando la energía eólica, solar y biomasa principalmente cañera y se continúan el montaje de otras instalaciones. Se estima que para el año 2030 la generación de energía eléctrica utilizando fuentes renovables alcance 870 MW con biomasa, 638 MW con energía eólica, 900 MW con parques solares fotovoltaicos y 100MW con energía hidráulica [3].

En la actualidad en la Provincia de Santiago existen 23 instalaciones hidroeléctricas, con una potencia instalada de 2787 kW, compuesta por 22 micro y mini instalaciones hidrogeneradoras y una pequeña central hidroeléctrica de 1500 kW. La mayor concentración de micro y minicentrales hidroeléctricas se encuentran ubicadas en zonas montañosas, en el municipio Guama con 15 instalaciones. El Municipio Guamá es una región agrícola, con comunidades poblacionales muy dispersas en el macizo montañoso de la Sierra Maestra y tiene como fuentes de suministro eléctrico las generadas en instalaciones hidrogeneradoras aisladas de pequeña potencia.

A pesar del desarrollo de instalaciones hidroeléctricas en las zonas montañosas orientales de Cuba, es imposible suplir las necesidades energéticas de una población creciente con múltiples necesidades socioeconómicas tanto en nuevas empresas agrícolas y ganaderas como en escuelas, hospitales e instalaciones de recreación y turismo. Por esto se hace necesario ampliar el estudio a otras fuentes renovables de energía que permitan combinarse

con los recursos hídricos y garantizar un suministro energético estable y de calidad a estas comunidades aisladas.

III. TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS QUE PUEDEN SER UTILIZADAS PARA LA GENERACION ELECTRICA EN EL MUNICIPIO DE GUAMA

III.1 POSIBILIDADES DE LA REGIÓN

Para complementar la generación mediante micro centrales hidroeléctricas y grupos electrógenos en el municipio Guamá, las tecnologías alternativas posibles dependen del potencial local, su viabilidad económica y condiciones geográficas. Dada la potencialidad y las condiciones geográficas de la región, la alternativa más viable es la energía solar para la generación de energía eléctrica mediante paneles y en menor grado la generación mediante el uso de biomasa residual del despulpe de café y el aserrín de los aserraderos de madera.

En la tabla 1, se muestran las ventajas y desventajas de las posibles fuentes renovables de energía que se pueden utilizar en varias de las comunidades apartadas del municipio y que cuentan con pequeñas instalaciones hidroeléctricas.

Tabla 1 – Ventajas y desventajas de las fuentes energéticas disponibles en el Municipio Guamá.

Fuente energética	Distribución Territorial	Relación con el medio ambiente	Resultado Económico
Biomasa (excepto madera)	Pequeña	Pequeña	favorable
Biogás	Pequeña	Pequeña	favorable
Solar	Muy grande	Excelente	favorable
Hidráulico	Pequeña	Medio	variable
Madera	Pequeña	Perjudicial	variable
Gas Natural	No	Perjudicial	perjudicial
Diésel	No	Perjudicial	perjudicial

Fuente: Los autores, (2018).

De la tabla 1 se concluye que el recurso hidráulico, a pesar de ser pequeño, es utilizable en muchas comunidades con capacidades ya instaladas. Los sistemas diesel, a pesar de ser perjudiciales, se utilizan como respaldo de la futura microred. Por tanto, constituye la fuente solar la mejor opción para combinarse con la hidráulica en la mayor parte de las comunidades del territorio.

El Municipio Guamá ya cuenta con diversas comunidades aisladas que poseen pequeñas instalaciones hidroenergéticas pero están ubicadas en ríos de poco caudal y que en determinadas épocas del año carecen de suficiente recursos hidráulicos por escasez de lluvia. Por lo anterior, tienen que hacer uso de grupos electrógenos en algunos casos o no disponer de energía eléctrica las 24 horas del día. Estas condiciones son inaceptables para un desarrollo socio-económico fuerte y auto-sostenible. La fuente alternativa más atractiva resulta la generación de energía mediante paneles fotovoltaicos por encontrarse en una región donde la radiación solar es de 6.0 a 6.5 kW-h/día en los meses de abril a septiembre y superior a 4.0 kW-h/día en los restantes meses [4].

Luego de definir las mejores fuentes renovables de energía de la región, es necesario que las mismas sean aprovechadas de forma eficiente. Por esto se deben analizar cuáles son las tecnologías alternativas aplicables en estas comunidades

III.2 TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS POSIBLES EN LA REGIÓN

Micro y mini centrales hidroeléctricas: Una micro o mini central hidroeléctrica está constituida por un sistema de tuberías que captan y conducen el agua del río hasta una casa de máquinas, donde se transforma la energía del agua en eléctrica mediante la utilización de un grupo turbina-generator. El agua después de pasar por la turbina es trasladada al cauce del río por lo que el impacto ambiental es mínimo. El municipio Guamá posee actualmente 15 micro y mini centrales hidroeléctricas y con posibilidad de incrementar el número de estas pequeñas instalaciones, con características especiales desde el punto de vista hidráulico y geográfico. El municipio se encuentra ubicado en una región muy montañosa con ríos pequeños y pendientes abruptas que permiten utilizar turbinas Peltón, las cuales utilizan alta presión y poco caudal debido a la diferencia de altura entre la toma de agua y la casa de máquina, en la mayoría de los casos con diferencias de alturas superiores a los 50 metros.

Sistemas fotovoltaicos: La tecnología fotovoltaica convierte la energía solar en energía eléctrica mediante paneles solares. Esta tecnología resulta ser la más atractiva para ser utilizadas en las comunidades aisladas en el municipio Guamá conjuntamente con las instalaciones hidroenergéticas para formas sistemas híbridos.

Biomasa sólida (Residuos agrícolas y de aserrío): La generación de energía eléctrica con biomasa sólida se obtiene usualmente mediante diferentes sistemas, entre ella mediante la gasificación de aserrín, cáscaras de café y madera y luego se utiliza el gas como combustible en un motor de combustión interna que mueve un alternador. Esta alternativa puede ser utilizada en los asentamientos aislados que cuentan con aserrío de madera y cáscaras de productos agrícolas de las empresas agrícolas de la región.

Biogas: El biogás es un gas combustible resultado de la digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico). En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja fermentar; después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se produce un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico [5]. La mayoría de las comunidades del municipio Guamá no han alcanzado suficiente desarrollo agropecuario para tener grandes volúmenes de desechos generados. Por esto actualmente, el biogás generado a partir de residuos que se generan de la ganadería es solamente utilizado en la elaboración de alimentos e iluminación de corrales en empresas ganaderas o granjas porcinas. No obstante constituyen un ahorro de energía eléctrica que se requiere en todas las comunidades posibles para mayor eficiencia de las futuras microredes eléctricas. En un futuro el desarrollo agropecuario crecerá, por lo que debemos considerar este recurso dentro de las posibles fuentes renovables para generación eléctrica en el municipio, que permitan integrarse en una microred eléctrica.

En resumen, la utilización de las fuentes de micro-hidroeléctricas combinadas con generadores fotovoltaicos y el uso de grupos electrógenos de respaldo, constituyen la estructura ideal que permite la implementación de un sistema híbrido de generación para la mayoría de las comunidades rurales de la región. Ocasionalmente en algunas localidades con mayores volúmenes de biomasa sólida se pueden adicionar generadores

basados en residuos agrícolas (cascara de café) y forestales (aserrín). En un futuro, cuando el desarrollo agropecuario sea mayor, podrían adicionarse sistemas de biogás, pero actualmente deben aprovecharse para ahorro energético mediante el uso en cocinas e iluminación. El uso en cocinas e iluminación va creando la cultura necesaria para un mejor aprovechamiento futuro. No obstante es imposible combinar eficientemente estos sistemas sin un potente sistema de sincronización y control de la generación y demanda energética con calidad. Por tanto, se valoran a continuación los principios básicos de una microSmartGrid a utilizarse en esas comunidades del municipio Guama.

IV. ADECUACION DEL SISTEMA SMART GRID PARA MICRO SMART GRID EN EL MUNICIPIO GUAMÁ

Según la IEA (Agencia Internacional de Energía): “Una red inteligente es una red eléctrica que utiliza tecnologías digitales y otras tecnologías avanzadas para para monitorear y gerenciar el transporte de electricidad de todas las fuentes de generación, para atender a las demandas variables de electricidad de los consumidores finales” [6].

La evolución de las SmartGrids esta resumida en la Figura 2, tomada del libro de Ali publicado en Springer 2013 [7]. Se presentan las tecnologías y capacidades que se han utilizado y sus ventajas en recuperación de inversiones. A la cabeza se encuentran los sistemas basados en multiagentes inteligentes.

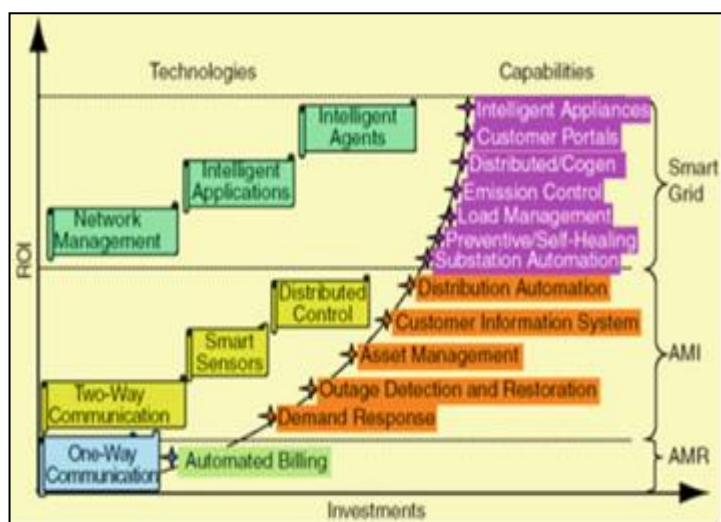
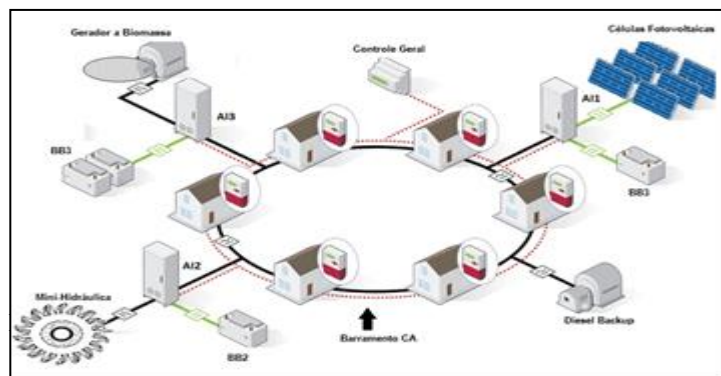


Figura 2: Arquitectura general de MSG para comunidades aisladas.

Fuente: [7].

En la Figura 3 se presenta la arquitectura general de una MSG para comunidades aisladas [8] que puede ser aplicable para estas comunidades del municipio **Guama**.



La propuesta incluye tres fuentes renovables (Mini-hidráulica, células fotovoltaicas y generador a biomasa) que se combinan entre sí y junto a un generador de respaldo (Diesel Backup). Los tres sistemas de fuentes renovables utilizan controladores locales (AI1,2,3) con sus respectivos bancos de baterías (BB1,2,3). Esto permite relativa independencia de control local de generación eléctrica en cada subsistema, y las conversiones de corriente directa (CD) a alterna (CA) y viceversa cuando sea necesario. La línea continua en negro representa las conexiones de CA y en verde los tramos de CD a partir de los convertidores integrados a los controles locales. Cada uno de los cuatro generadores está conectado al anillo de CA que suministra a los consumidores de la comunidad (representados simplificada por seis residencias). La línea discontinua en rojo es el sistema de comunicaciones que enlaza a los controladores locales de cada generador con los controladores residenciales y con el control general de la microred eléctrica.

Este sistema de comunicaciones permite la creación de un sistema de automatización integrado que garantice el control local (nivel de control digital distribuido) y la interoperabilidad energética de toda la SmartGrid (nivel de control supervisorio). Estos niveles fueron explicados en el trabajo de Pavan [9].

La comunicación de información entre este controlador central y los controladores locales de generadores y consumidores permite cumplir las funciones principales de gestión energética del sistema que están resumidas en la Figura 4. Estas funciones están concentradas en el sistema de gestión energética (EMS) que es una de las actividades principales de una SmartGrid, como se indica en el trabajo de Eun-Kyu Lee [10]. Este trabajo propone un Sistema de Automatización Primario (PAS) que realiza eficientemente el EMS para una SmartGrid basado en la interoperatividad funcional de las gestiones energéticas de generación, consumo y almacenamiento, que son los aspectos básicos que se tuvo en cuenta para resumir estas funcionalidades de la Figura 4.



Figura 4: Funciones principales de gestión energética en una MSG.

Fuente: Los autores, (2018).

La eficiencia de la microred eléctrica solo es posible si el sistema puede cumplir la función principal de equilibrio de energía de la microred híbrida. La toma de decisiones inteligente de este sistema tiene que ser capaz de mantener los parámetros de calidad del sistema (voltaje, corriente y frecuencia en valores permisibles) bajo cualquier circunstancia de funcionamiento de la microred. La inestabilidad de las fuentes renovables de energía, así como el funcionamiento irregular de los consumidores, generan grandes fluctuaciones en disponibilidad y consumo eléctrico en el sistema que podrían afectar grandemente la estabilidad del sistema. También los fallos, las afectaciones climatológicas y los grandes desastres (ciclones, terremotos, incendios forestales, etc.) generan perturbaciones externas al

sistema. Además deben considerarse los ciclos de mantenimiento y reparación de las instalaciones, así como nuevas incorporaciones o bajas en la red eléctrica. Todo esto demuestra la complejidad de una toma de decisiones eficiente en el sistema centralizado y obliga a distribuir la mayoría de las funciones posibles.

Las cinco funciones básicas que influyen directamente en el equilibrio de energía de la MSG híbrida están representadas en la parte inferior de la Figura 4. Esto incluye:

- 1- Monitorear demanda de potencia y calidad de la energía: Cada unidad consumidora tiene un sistema inteligente capaz de avisar o prevenir las posibles fluctuaciones del consumo energético y por tanto se puede establecer en el control central un estimado de la demanda actual y futura del sistema.
- 2- Monitorear disponibilidad energética y estado de los componentes: Cada unidad generadora debe chequear y reportar el nivel de generación y almacenamiento eléctrico de ese subsistema mediante su controlador local. Esto permitiría al control central tomar decisiones de que tipo de generación o almacenamiento tributara al consumo general de acuerdo a sus potencialidades y utilizar el sistema de respaldo a Diesel solo en caso de emergencias.
- 3- Tomar decisiones de reconfiguración en base a excedentes y déficits: Cada subsistema de generación en colaboración con los demás subsistemas puede tomar la decisión de almacenar los excedentes de generación eléctrica en sus bancos de baterías, al no requerirse mayor consumo desde los consumidores. Este excedente almacenado previamente es reutilizable en situaciones de déficit energético en el sistema, lo cual se coordina con el control central. En caso de que las reservas almacenadas se agoten y no se pueda suplir la demanda, el control central puede autorizar la activación del sistema de respaldo a Diesel, pero el sistema debe configurarse para que esto ocurra solo excepcionalmente,
- 4- Gerenciar las altas y bajas de los componentes del sistema: Para garantizar la durabilidad y eficiencia del sistema, deben planificarse mantenimientos y reparaciones periódicas de los diferentes subsistemas que deben ser coordinados en los horarios y días que se tenga más bajo consumo y mayor generación en los otros subsistemas. Para esto el control central debe gerenciar las altas y bajas de los componentes del sistema, así como también en caso de fallos, desastres naturales o reducción o incremento de consumidores.
- 5- Gerenciar los datos e informaciones entre los componentes: El control central debe mostrar y almacenar todas las informaciones importantes del funcionamiento normal o ante contingencia de la MSG híbrida. Esta información puede ser mostrada en línea o en reportes periódicos al personal de operación y gerencia del sistema, así como ser utilizada para mejorar el sistema de toma de decisiones del sistema de acuerdo al comportamiento estadístico histórico del mismo.

Existen otras funciones tradicionales del control central y de los controles locales que están relacionados con situaciones particulares de esos sistemas y de los usuarios que interactúan con ellos. Todo lo cual debe ser previsto en la implementación de todo el sistema.

La capacidad de tomas de decisiones cooperadas entre todos los subsistemas y el control central solo es posible utilizando los recursos de la inteligencia distribuida. Una forma

muy utilizada actualmente es la creación de un sistema multiagente inteligente (MAS) [11].

Un agente es un sistema computacional encapsulado que está situado en un ambiente y puede actuar con flexibilidad y autonomía en dicho ambiente para cumplir sus objetivos de diseño” [12].

Los Agentes Inteligentes son un paradigma para implementar métodos integradores, de control y supervisión y de información y conocimiento, en procesos complejos [13].

Las estructuras MAS (MULTIAGENT SYSTEM) [11-13] son las bases para obtener estas posibilidades desde la fase de diseño, resultando sistemas reconfigurables y críticamente seguros. Se afirma que el enfoque de MAS provee una mayor eficiencia de un sistema automatizado en:

- tolerancia a fallos y robustez del sistema: un fallo local no implica en un fallo global;
- resolución de problemas complejos que requieren cooperación;
- solución más rápida debido a la ejecución paralela de tareas por los nodos inteligentes distribuidos en la red de automatización;
- potenciales mejorías en la calidad de los resultados al soportar que varios revolvedores de problemas trabajen colaborativamente en el mismo ambiente;
- reutilización y escalabilidad del sistema;
- integración de (diferentes y especializadas) fuentes de conocimiento y subsistemas heterogéneos;
- soporte a la autonomía de subsistema
- descentralización de la toma de decisiones

Pero un sistema complejo requiere de herramientas de diseño formal de sistemas automatizados que contribuyan a garantizar una solución eficiente. El diseño formal de MAS utiliza muchos recursos del diseño de software basado en Lenguaje de modelado unificado (UML) [14]. Muchos trabajos también demuestran la actualidad de la mezcla de la tecnología de diseño basada en agentes y el modelado en redes de Petri [15-18]. La variante más recomendada es utilizar la mezcla de UML-PN [19] en el modelado, verificación y validación de sistemas basados en MAS para el diseño de la toma de decisiones inteligente en las MSG híbridas.

El UML 2.2, aun teniendo limitaciones para modelar la autonomía y el comportamiento proactivo de los agentes [12], puede combinarse con los formalismos BDI (Belief, Desired, Intentions, [20]) para compensar esa deficiencia del UML hasta obtener un modelado más completo de un sistema multiagente.

Existen varios trabajos con aplicación de UML en el diseño de MAS para SmartGrids [21-22]. En estos trabajos se resaltan las ventajas de los diagramas de casos de uso de UML en el diseño de la arquitectura general del sistema y los procedimientos de atención a riesgos. Por tanto, en este trabajo se aprovechan estas ventajas de los diagramas de casos de uso.

La figura 5 representa un diagrama de casos de uso simplificado del sistema MAS que se implementaría en una MSG híbrida para comunidades rurales aisladas con las características indicadas en la figura 3 y las funciones explicadas anteriormente. Se detallan los actores reales (Usuarios y Técnico de Mantenimiento) y los actores virtuales (Agentes inteligentes de cada generador y consumidor de la MSG, mas el agente de Control General). Se indican los principales casos de uso y sus relaciones de inclusión, dependencia y extensión. Esto crea las

bases para una programación más eficiente de las funcionalidades generales del sistema.

Los detalles de funcionamiento de cada agente inteligente se desarrollan en diagramas de secuencia y máquinas de estado que permiten ser traducidos a Redes de Petri jerárquicas extendidas GHENeSys [23-24]. Las ventajas de esta traducción es

que dichas redes tienen excelentes herramientas de verificación de propiedades del modelo y validación de requerimientos funcionales que permiten poner a punto el sistema con los detalles de implementación en la herramienta de programación del MAS para la MSG híbrida.

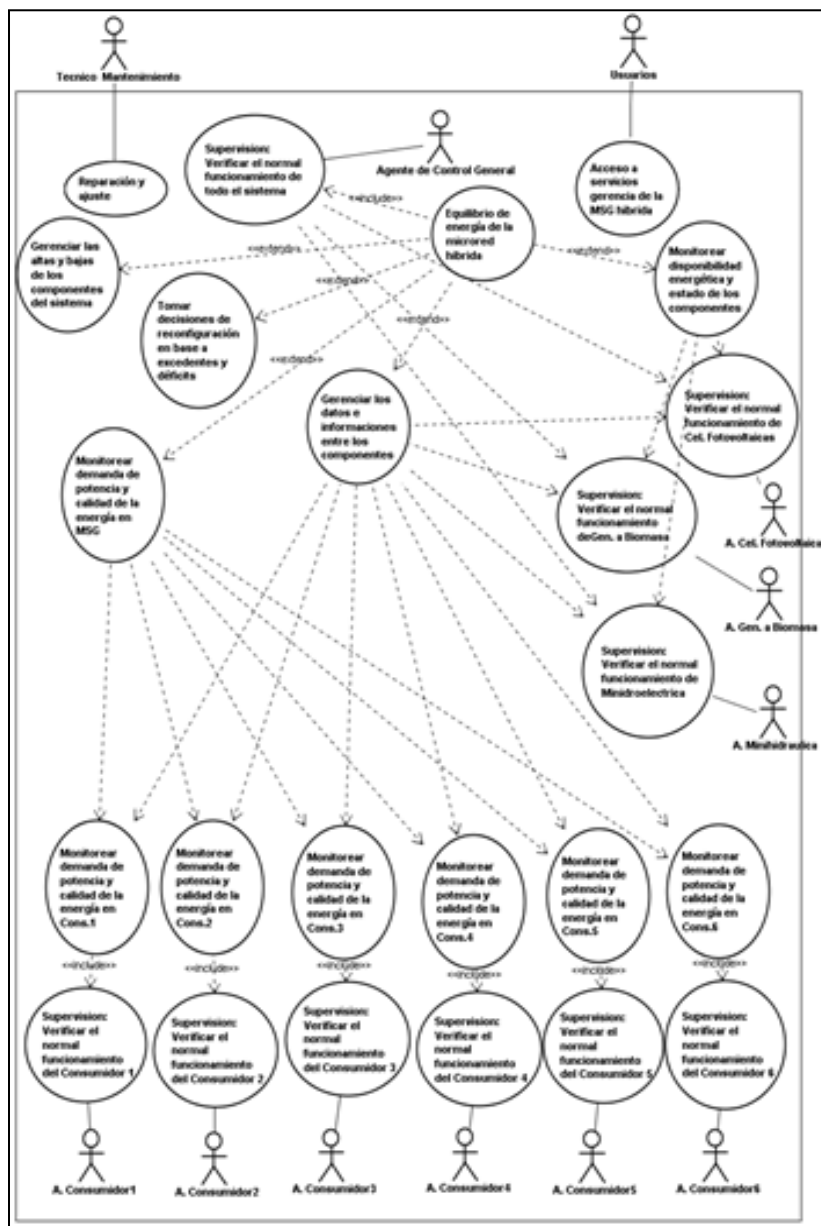


Figura 5: Diseño UML de los casos de uso del MAS para MSG híbrida.

Fuente: Los autores, (2018).

La Figura 6 es un ejemplo simplificado de este diseño detallado para el caso del agente de la Minihidroeléctrica. Solo se representa la parte del modelado del control de frecuencia generada basado en la combinación de carga lastre y gasto de agua [27]. Dicho control se ejecuta con un algoritmo inteligente a partir de la medición de la frecuencia actual que debe mantenerse en 60 ± 1 Hz mediante la actuación combinada sobre los dos actuadores. Las facilidades de modelado jerárquico de la PN GHENeSys permite encapsular en los macrolugares P2, P3, P5 y P6 las funciones más complejas para que sean detalladas en otras macroneces internas. El uso de arcos habilitadores desde los

lugares auxiliares P7, P10, P11 y P13 permite el control de las transiciones respectivas para el gobierno del sistema. La verificación de propiedades de vivacidad, seguridad y repetitividad de dicha PN se garantiza aplicado reglas de buena formación en el diseño y comprobando las invariantes de lugar y transición de la red autónoma subyacente en este modelo. Utilizando las posibilidades de la simulación dinámica se garantiza la validación funcional del diseño creado. Luego dicho modelo es traducido al programa según el equipamiento utilizado en el sistema.

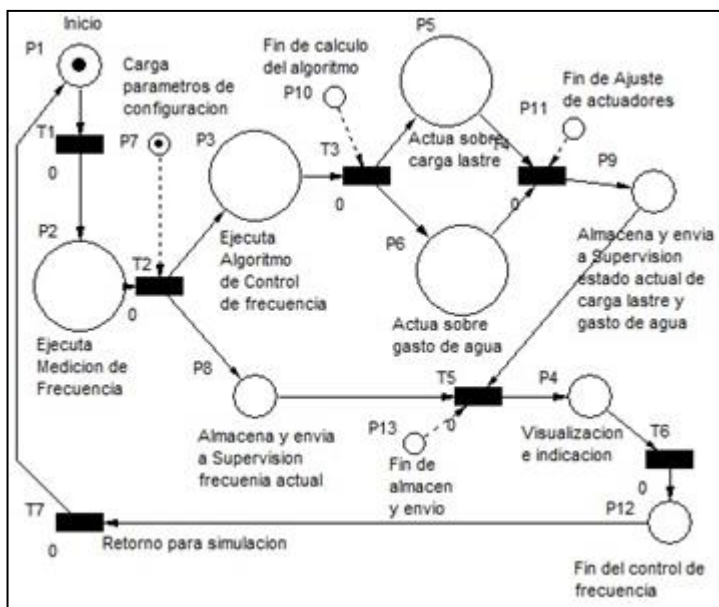


Figura 6: Diseño simplificado en GHENeSys del control de frecuencia dentro del Agente Minihidroeléctrica.

Fuente: Los autores, (2018).

La implementación de este sistema inteligente se realiza sobre los dispositivos de control local y el control general utilizando técnicas de inteligencia artificial basadas en lógica borrosa (Fuzzy) [25-26]. El apoyo del Toolbox de Lógica Fuzzy dentro del Matlab-Simulink ayuda en el ajuste de la base de conocimiento y maquina de inferencia de los algoritmos Fuzzy de cada agente y las conversaciones y colaboración entre agentes se modela en UML-PN para luego ser programada en el lenguaje de programación de los dispositivos de control seleccionados.

El proyecto científico C&C de la Universidad de Oriente titulado: Desarrollo de prototipos de laboratorio para microredes y propuestas de localizaciones de estas, trabaja en el desarrollo de prototipos experimentales de los componentes de la MSG híbrida, en el diseño e implementación de los algoritmos de control inteligente del sistema, así como en los posibles asentamientos rurales en que sea más factible su implementación. La Figura 7 representa uno de los prototipos de pruebas experimentales a nivel de laboratorio, en este caso para el control local de la mini-hidroeléctrica.



Figura 7: Prototipo de pruebas experimentales para control local de la mini-hidroeléctrica

Fuente: [27].

La Figura 8 muestra el esquema simplificado del prototipo para pruebas del controlador de la Figura 7.

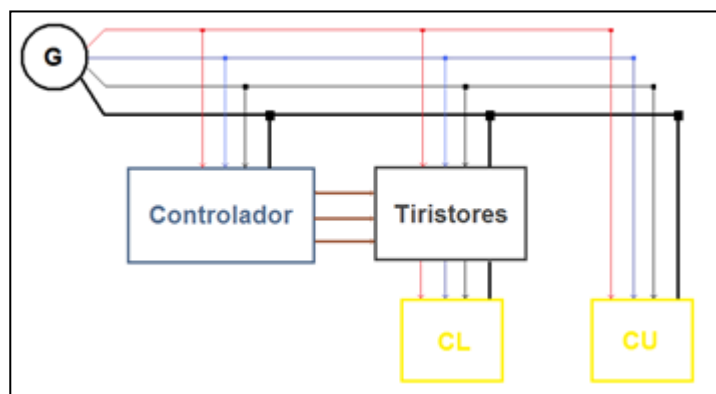


Figura 8: Diagrama de conexiones del Prototipo de pruebas experimentales para control local de la mini-hidroeléctrica.

Fuente: [27].

En el trabajo de Ebeid, 2017 [28] se analizan varios indicadores de calidad del servicio en una SmartGrid y es precisamente las mediciones de los parámetros eléctricos un indicador básico. El control de la frecuencia de la electricidad generada es clave en la calidad de su consumo. La Figura 9 muestra una comparación de los resultados del control manual y el control automático con la aplicación de este algoritmo inteligente combinado en el control de frecuencia implementado.

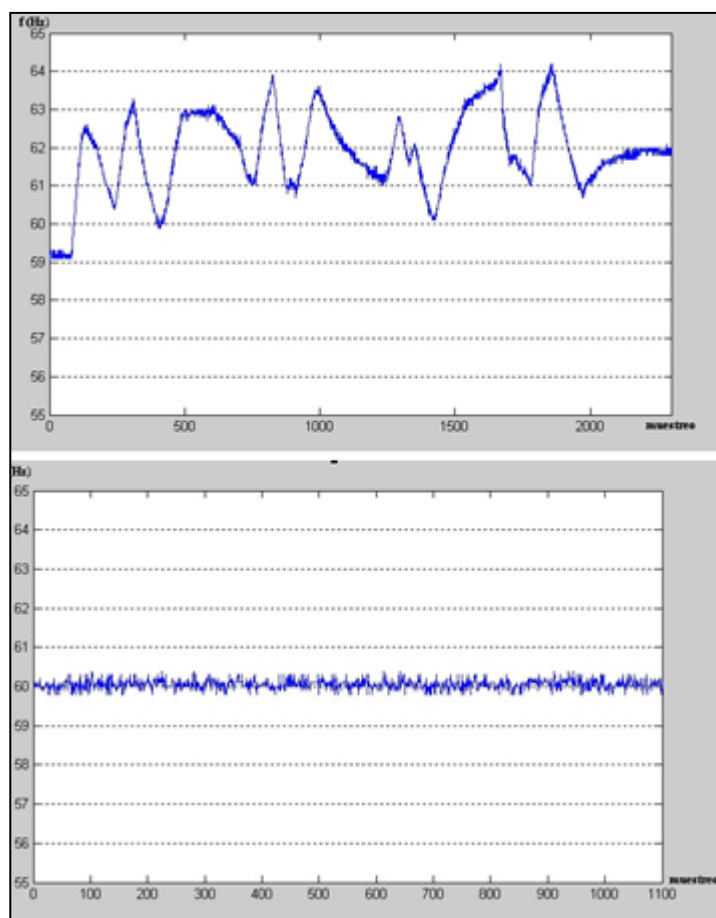


Figura 9: Resultado comparativo de pruebas experimentales para control local de la frecuencia en la mini-hidroeléctrica.

Fuente: [27].

V. PROPUESTA DE UN SISTEMA MICRO SMART GRID EN UNA COMUNIDAD DEL MUNICIPIO DE GUAMÁ

Partiendo de las condiciones geográficas, poblacional y recursos energéticos disponibles se propone, en este trabajo, a la comunidad del Ocujal del Turquino para instalar un Micro Smart Grid, donde se combine el aprovechamiento de la generación de energía eléctrica en una micro central hidroeléctrica, con la instalación de paneles solares y un grupo electrógeno.

La comunidad del Ocujal del Turquino, se encuentra situada en la ladera sur de la Sierra Maestra, a 62 km al este de la ciudad de Santiago.

Esta comunidad dispone de un asentamiento poblacional con 497 viviendas, 1385 habitantes, según datos de Hidroenergía Santiago del 2010, en la actualidad deben ser mucho más, también existen varias familias en los alrededores de la comunidad, cuenta con 17 objetivos económicos y 10 objetivos sociales, 3 escuelas primarias y secundarias, 2 consultorios del médico de la familia, 1 panadería, 2 tiendas, 1 restaurante, 1 centro de administración pública, 1 hospital para la atención a los habitantes de la región sureña de la Sierra Maestra y otras instalaciones sociales. La principal fuente económica de la comunidad es la agricultura, principalmente café y viandas, y la cría de ganado vacuno y porcino en pequeña escala.

La comunidad cuenta con una mini central hidroeléctrica de 190 kW, nombrado El Dian (Figura 10), no conectado al Sistema Electroenergético Nacional, que suministra energía al poblado de Ocujal y a los habitantes residentes cercanos a la instalación. Esta instalación presenta dificultades de generación de energía eléctrica en período prolongado de sequía, por lo que el suministro de energía se limita a horarios determinados.



Figura 10: Caseta de la mini hidroeléctrica El Dian (Ocujal del Turquino).

Fuente: Los autores, (2018).

El hospital no recibe la energía eléctrica de la central hidroeléctrica, sino dispone de energía eléctrica generadas por paneles solares y banco de acumuladores, además un grupo electrógeno de emergencia. Esto garantiza que ya existe experiencia en el uso de los sistemas fotovoltaicos y los respaldos a Diesel.

Por encontrarse la comunidad en una zona con gran intensidad de radiación solar, la fuente renovable de energía más atractiva es la energía solar que puede aprovecharse mediante paneles solares para la generación de electricidad y paneles para el calentamiento de agua para uso en las instalaciones sociales, educacionales y de salud.

La combinación de la instalación hidrogeneradora, con un sistema de paneles solares y un grupo electrógeno reúne las

condiciones óptimas para la implementación de un sistema de generación híbrida con Micro Smart Grid en esta localidad.

La capacidad de la mini-hidroeléctrica permite absorber gran parte de la demanda eléctrica de la comunidad en periodos lluviosos, por lo que la instalación de un sistema de paneles solares con capacidad similar a la de la mini-hidroeléctrica garantizaría un excedente que puede almacenarse en bancos de baterías auxiliares colocados en ambos subsistemas (como indicado en Figura 3), para guardar los excedentes en periodos lluviosos o de alta intensidad solar. El sistema de control distribuido se ocuparía del equilibrio de energía en la MSG híbrida como fue explicado en el cuarto punto de este trabajo.

Este mismo sistema en implementación para Ocujal del Turquino puede ser adaptado a muchas otras comunidades rurales de la región oriental de Cuba, así como otras comunidades similares de otros países.

VI. CONCLUSION

Los resultados parciales presentados en este trabajo demuestran que es factible el diseño de una MSG híbrida para comunidades rurales aisladas de la región montañosa oriental de Cuba. Estas mismas características se pueden adaptar a comunidades similares en otros lugares apartados de otros países. Esto constituye la garantía de un suministro estable y eficiente de energía eléctrica que permita un desarrollo socioeconómico sostenible de la zona y por tanto una vía para reducir las grandes diferencias existentes entre los lugares electrificados y las comunidades aisladas en el mundo. Las soluciones de diseño UML-PN del MAS garantizan la verificación y validación de las funciones del sistema desde las fases de diseño para evitar errores de implementación y reducir costos de proyectos similares en cualquier parte del mundo. Las pruebas experimentales de implementación realizadas a nivel de laboratorio demuestran la factibilidad de una instalación real.

VII. AGRADECIMENTOS

Se reconoce el apoyo de la Universidad de Oriente y de la Unión de Empresas Eléctricas de Cuba en el desarrollo de este proyecto, así como las empresas de Hidroenergía y el gobierno local en la provincia Santiago de Cuba.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Abreu Barbie. **Regulador de frecuencia para pequeñas centrales hidroeléctricas**. Tesis de Master en Automática. Universidad de Oriente. Cuba. 2018.
- [2] [http://www.cubasolar.cu/Energía/Energía 38 HTM/artículo 05.htm](http://www.cubasolar.cu/Energía/Energía%2038%20HTM/artículo05.htm)
- [3] República de Cuba Ministerio de Energía y Minas. **Estudio para la Recolección de Datos sobre el Sector de Electricidad en la República de Cuba Informe Final**. 2016 { }
- [4] República de Cuba Ministerio de Energía y Minas. **Estudio para la Recolección de Datos sobre el Sector de Electricidad en la República de Cuba Informe Final**. 2016
- [5] Manuales sobre energía renovable: **Biomasa/ Biomass Users Network (BUN-CA)**. -1 ed. -San José, C.R. :Biomass Users Network (BUN-CA), 2002

- [6] IEA – International Energy Agency. **Technology Roadmap of Smart Grids**. Disponible en: <http://www.iea.org/>
- [7] Ali, AB.M.S. **Smart Grids Opportunities**, Developments and Trends. 2013. VIII, 230p. Springer ISBN: 978-1-4471-5209-5. Available in: <http://www.springer.com/978-1-4471-5209-5>.
- [8] MACIEL, LÍVIA GUIMARÃES; PINA, ISRAEL FRANCISCO BENITEZ. **Proposal of SmartGrids in communities of Amazonas State**. ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA), v. 1, p. 76-82, 2015. ISSN 2447-0228 (ONLINE). DOI: 10.5935/2447-0228.20150020
- [9] Y. V. Pavan Kumar, Ravikumar Bhimasingu. **Key Aspects of Smart Grid Design for Distribution System Automation: Architecture and Responsibilities**. Procedia Technology 21 (2015) pág. 352 – 359. ELSEVIER. Available online at www.sciencedirect.com.
- [10] Eun-Kyu Lee, **Advancing Building Energy Management System to Enable Smart Grid Interoperation**. International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2016, Article ID 3295346, 12 pages, disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3295346>
- [11] Aguilar, J., Rios, A., Hidrobo, F., Cerrada, M., 2013. **Sistemas Multiagentes y sus aplicaciones en Automatización industrial**, 1ª Edicion. Vol. 2. ULA, Mérida, Venezuela.
- [12] Jennings03 Jennings, N.R. and Bussmann, S., 2003. **Agent-Based Control Systems**. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 23, pages 61-74.
- [13] Fenghui Ren, Minjie Zhang, Danny Soetanto, and XiaoDong Su. **Conceptual Design of A Multi-Agent System for Interconnected Power Systems Restoration**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. 2012
- [14] Object Management Group. 2007. **Unied Modeling Language: Superstructure Specification**, version 2.1.2, August 2007. URL <http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2/Superstructure/PDF>
- [15] Han, W; Jafari, M. (2003). **Component and AgentBased FMS Modeling and Controller Synthesis**. IEEE Trans. on Syst., Man, and Cyb. Part C, V. 33, N. 2, May03, pp. 193-206.
- [16] Leitao, P. (2009). **Agent-based distributed manufacturing control: A state of the art survey**. Eng. Applic. of Artif. Intell. 22, pp. 979–991.
- [17] Colombo, A. W., R. Schoop and R. Neubert (2006). **An Agent-Based Intelligent Control Platform for Industrial Holonic Manufacturing Systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 1, pp. 322-337
- [18]. Zhao, Y., Fan, Y., Bai, X., Wang, Y., Cai, H. & Ding, W. (2004). **Towards formal verification of UML diagrams based on graph transformation**, Proceedings of the IEEE International Conference on E-Commerce Technology for Dynamic E-Business, IEEE Computer Society.
- [19] Villani, E., Miyagi, P. E. and Valette. R., **Modelling and analysis of hybrid supervisory systems: A Petri net approach**, Springer, 2007
- [20] KAVI, K.M., ABORIZKA, M. and KUNG, D. (2002): **A framework for designing, modeling and analyzing agent based software systems**. Proceedings of the fifth International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing ,Beijing, China, 196-200, IEEE Computer Society.
- [21] P. Ranganathan, K. Magelhttps, K. E. Nygard. **UML design patterns in a Smart Grid**. University of North Dakota, USA, 2009. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f061/43bf52b39dfdf4c726b91d0aba40e998c5f0.pdf>
- [22] Muniba Sultan, Amna Pir, Nazir Ahmad Zafar. **UML based Formal Model of Smart Transformer Power System**. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 8, No. 11, 2017, pag. 304-310. Available at www.ijacsa.thesai.org
- [23] SILVA, JOSÉ REINALDO; BENÍTEZ, ISRAEL; VILLAFRUELA, Luisa; GOMIS, ORIOL; SUDRIÀ, ANTONI. **Modeling extended Petri nets compatible with GHENeSys IEC61131 for industrial automation**. International Journal, Advanced Manufacturing Technology ^{JCR}, v. 36, p. 1180-1190, 2008
- [24] Israel Francisco Benitez Pina, Saddid Lamar Carbonell, Robson Marino da Silva, Jose Reinaldo Silva, Paulo E. Miyagi. **Design of automatic control system based on unified timed hybrid Petri net**. Revista DYNA 84 (200), pp. 80-89, Marzo, 2017. Medellín. ISSN 0012-7353 Printed, ISSN 2346-2183 Online DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n200.56917>
- [25] Garnizo, C. 2011. **Metodología para la implementación de controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC s7-300**. Tecnura, V.15, N.30, Julio-Dic. Pp.44-51.