

MEMORIAS DEL CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE MICRORREDES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE RENOVABLES

Organizado por:



PATROCINADO POR:



EDITADO POR:
CARLOS MEZA

LIBERIA, GUANACASTE, COSTA RICA

1 Y 2 DE DICIEMBRE, 2015

COMITÉ ORGANIZADOR:

Miguel Latorre, CEDER, CIEMAT, España.

Carlos Meza, Tecnológico de Costa Rica.

Wagner Castro, Universidad Nacional de Costa Rica

Wilfrido Paniagua, CTEC, Tecnológico de Costa Rica.

Rogelio González, CTEC, Tecnológico.

Isabel García, CEDER, CIEMAT, España.

TABLA DE CONTENIDO

SOBRE LA ACTIVIDAD	2
RESIDUOS AZUCAREROS COMO FUENTE DE COMBUSTIBLE PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA	3
VALORACIÓN ENERGÉTICA Y SOSTENIBLE DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE MODERGIS – CASO DE ESTUDIO COSTA RICA	10
GASIFICATION OF MUNICIPAL SOLID WASTES FOR POWER GENERATION IN BRAZIL, A REVIEW OF AVAILABLE TECHNOLOGIES AND THEIR ENVIRONMENTAL BENEFITS	24
IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRORRED DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA EN EL SECTOR AGROPECUARIO A CICLO CERRADO DE PRODUCCIÓN	33
MODELO DE EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE BIOMASA COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO PROVENIENTE DEL BAGAZO DE CAÑA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN NICARAGUA	38
DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MICRORRED INTELIGENTE CON LA UTILIZACIÓN DE MULTI-TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS RENOVABLES	48
ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTAR EL BOMBEO DE UNA RED DE DISTRITO	55
ARQUITECTURA DE UNA RED INTELIGENTE RURAL.....	64
MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MICRORRED ELÉCTRICA DE CEDER-CIEMAT	73
GESTIÓN DE UNA MICRORRED MEDIANTE TECNOLOGÍA PLC-PRIME: EL ROL DE LAS COMUNICACIONES	83
ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA Y ECONÓMICA DE UNA RED DE MICROGENERACIÓN ELÉCTRICA PARA EDIFICIOS CON ALMACENAMIENTO INTERMEDIO EN HIDRÓGENO	93
NUEVOS MERCADOS Y MODELOS DE NEGOCIO EN MICRORREDES. PROYECTO EMPOWER.....	101
EMPLAZAMIENTO Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE NUEVAS FUENTES DE ERNC, EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, CONSIDERANDO OBJETIVOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES	109

SOBRE LA ACTIVIDAD

Las Microrredes inteligentes son redes eléctricas que pueden integrar las acciones de todos los usuarios conectados a las mismas y proporcionar así un suministro eléctrico eficiente, sostenible, rentable y seguro. Hace años que están desarrolladas en Estados Unidos, aprovechando las energías que se pueden generar en el propio territorio. En Europa, la Plataforma Tecnológica Europea para las Redes de Electricidad del Futuro, apuesta por el desarrollo de redes inteligentes, marcándose, entre otros objetivos, alcanzar un 35% de generación de energía renovable distribuida por el territorio en 2020 y la descarbonización total de la energía en el 2050.

El III Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables. Valorización energética de residuos como fuente de generación eléctrica crea un espacio de cooperación para la transferencia de conocimientos, tecnología y experiencias, orientado a favorecer el desarrollo de la Generación Distribuida con energías renovables y contribuir a su conocimiento e integración en diferentes escenarios, especialmente en territorios que aspiran a ser autosuficientes a partir de las fuentes de energía renovables. En esta actividad se expusieron aplicaciones prácticas de generación distribuida con renovables y valorización energética de residuos como fuente de generación distribuida; soluciones 100% renovables con la participación de las comunidades locales.

De esta forma, el III Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables. Valorización energética de residuos como fuente de generación eléctrica, representó un escenario de intercambio de ideas y opiniones entre grupos de investigación y empresas pertenecientes a países Iberoamericanos, para el desarrollo de las Microrredes y la integración de Generación Distribuida (GD) con Fuentes de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), fomentando el debate entre los asistentes y los distintos expertos participantes en las conferencias magistrales y sesiones de ponencias que ayudarán a conocer mejor los aspectos claves relativos al uso de los posibles recursos disponibles para la generación a partir de energía renovable en zonas alejadas de los sistemas eléctricos convencionales y creando nuevos modelos de negocio en zonas de los países participantes.

El III Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables. Valorización energética de residuos como fuente de generación eléctrica, se realizó el 1 y 2 de diciembre del 2015 en la ciudad de Liberia en Costa Rica y fue organizado por el Instituto Tecnológico y la Universidad Nacional de Costa Rica (Campus Liberia, Guanacaste) y el Centro de Desarrollo de Energías Renovables CEDER-CIEMAT (España), con el patrocinio del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) a través de la acción MIGEDIR (referencia 713RT0468) y otros colaboradores.

RESIDUOS AZUCAREROS COMO FUENTE DE COMBUSTIBLE PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA¹

Antonio Valdés Delgado
avaldes@cubaenergia.cu

CUBAENERGIA

RESUMEN

Las producciones de azúcar y alcohol a partir de la caña de azúcar originan residuos agrícolas e industriales que pueden ser usados como combustible, para la producción de calor y/o electricidad. Tales son los casos de los Residuos de Cosecha de la Caña de Azúcar (RAC), el Bagazo, la Cachaza y las Vinazas que se originan en la propia fábrica además se puede considerar la Molida Integral de la Caña (MCI) todos ellos representan combustibles renovables, no contaminante del medio ambiente y que pueden sustituir combustible fósil en la producción de calor y/o electricidad.

En una producción de un millón de toneladas de azúcar se obtienen unos 2,8 millones de toneladas de bagazo, 3,3 millones de toneladas de residuos de la cosecha (RAC), unas 40 000 toneladas de cachaza y si se emplean sus mieles finales se puede producir unas 90 ton de alcohol y como consecuencia unas 1260 toneladas de vinazas.

En el presente trabajo se exponen las incidencias favorables al uso de estos residuos para la producción de calor y/o electricidad.

Palabras clave: *Residuos, bagazo, biogás, vinazas, electricidad.*

INTRODUCCION

La caña de azúcar puede proporcionar diferentes biomasa para ser usada como combustible, tal es el caso de los Residuos de Cosecha de la Caña de Azúcar (RAC), el Bagazo que se obtiene en la propia fábrica y la Cachaza además se puede considerar la Molida Integral de la Caña (MCI) como fuentes renovables de combustible que pueden estar disponible de esta planta.

En una producción de un millón de toneladas de azúcar se obtienen unos 2,8 millones de toneladas de bagazo, 3,3 millones de toneladas de residuos de la cosecha (RAC) y de cachaza, en la etapa agrícola de este agro-producto se originan los RAC mientras que en la etapa industrial se obtienen el Bagazo y la Cachaza y si se emplean sus mieles finales se puede producir unas 90 ton de alcohol y como consecuencia unas 1260 toneladas de vinazas.

¹ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

La utilización de la biomasa procedente de la caña de azúcar como fuente de combustible sólido, líquido o gaseoso para la generación de energía térmica y/o eléctrica se alcanza al procesarse esta materia prima para la producción de azúcar y/o alcohol, siendo como se ha señalado el bagazo el principal combustible que se obtiene de la producción.

LOS RESIDUOS AGRÍCOLA DE LA COSECHA COMO COMBUSTIBLE (RAC)

La caña de azúcar tiene -además del tallo - otros componentes como son las hojas verdes y secas y el cogollo (Ripoli 2004) todo ello se denominan como los Residuos agrícola de la Cosecha (RAC), - ellos representan alrededor de los 25% del peso de la caña entera, al cosecharse la caña de azúcar una parte de estos componentes de la planta se mezclan con los tallos y se envían a la fábrica y otra parte se queda en el campo.

Una fábrica de azúcar que procese 1000 toneladas de caña limpia por día puede disponer de 82.5 toneladas de RAC como un combustible adicional, las otras 247.5 toneladas una parte va a la fábrica con la caña y el resto se queda en el campo. Se obtiene -de cada millón de tonelada de azúcar producida- una cifra de unas tres millones trescientos mil toneladas de un combustible de la biomasa cañera, de éstos alrededor de 1 650 000 toneladas pueden estar disponibles para la producción de calor y/o electricidad.

EL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

El bagazo es la parte fibrosa de la caña, representando el residuo del procesamiento de la caña en la etapa de la extracción de sus jugos, Este se puede definir como el combustible natural del proceso de producción de azúcar; su combustión puede realizarse en forma directa del proceso de producción sin algún tipo de acondicionamiento, o sea, que la materia prima que se emplea para la producción de azúcar y/o alcohol - la caña de azúcar - trae a la fábrica su propio combustible, en magnitudes tales que satisface plenamente los requerimientos termo-energéticos del proceso tecnológico, Mediante un uso eficiente del vapor en el proceso tecnológico y en la eficiencia de las calderas se puede incrementar la disponibilidad de este combustible y satisfacer las necesidades térmicas para la producción de azúcar, de alcohol y disponer de sobrantes que permiten incrementar en la producción de electricidad.

LA MOLIDA INTEGRAL DE LA CAÑA

El procesamiento de la Caña en forma Integral en las fábricas que producen el azúcar y/o alcohol a partir de la caña de azúcar indica la posibilidad de un aumento directo de la cantidad del residuo industrial de la extracción de la sacarosa de la caña o sea el bagazo. Un análisis realizado entre las pérdidas en las mieles y el aumento del bagazo por el aumento de la biomasa procesada y los precios del azúcar y del combustible indicaron que puede ser económicamente factible el proceso de la MCI. (Valdés 2001).

Con el objetivo de valorar la incidencia del procesamiento de la Caña Integral, se considera una fábrica que procese 5 000 toneladas de caña por día, se estima que la caña en el campo presenta alrededor del 25% de una biomasa adicional al tallo verde -las hojas verdes, hojas secas y cogollo, lo que significa una caña total o integral de 6500 toneladas en el campo antes de su cosecha. En la tabla 1 se muestra el aumento de la cantidad de biomasa al procesarse el cogollo y las hojas adicionalmente a la caña limpia.

Tabla 1. Aumento de la cantidad de biomasa al procesarse el cogollo y las hojas adicionalmente a la caña limpia

Cogollo Procesado (%)	Fibra caña (%) ²	Bagazo Caña (%)	Bagazo (ton/día)	Bagazo adicional a la caña limpia	
				(ton/día)	(%)
100	20.60	41.2	2678	1100	70
70	20.70	41.4	2635	1055	68
50	20.75	41.5	2604	1024	65
30	20.80	41.6	2573	993	63
0	20.90	41.8	2529	949	60
Caña limpia	13.00	26.0	1300	-	-

LA CACHAZA Y LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Los residuos de la purificación de los jugos para la producción de azúcar y/o alcohol o sea la cachaza presentan un contenido tal de materia orgánica tal que posibilita la producción de biogás mediante su tratamiento anaeróbico y a partir de este combustible es factible la producción de electricidad a razón de unos 1.8 a 2.0 kWh por m³ de biogás; Se obtienen alrededor de 1 400 000 t en una zafra que produzca 4 000 000 t de azúcar. Esta cachaza bajo un tratamiento anaeróbico puede producir alrededor de unos 130 a 155 m³ de biogás por tonelada de cachaza (Anon 2002), en la siguiente tabla se muestra información sobre esta producción.

Tabla 2. Información sobre la producción de Biogás a partir de cachaza en la India

Parámetro	Fábrica 1	Fábrica 2
Caña molida (t/d)	2500	6000
Cantidad de cachaza (t/d)	75	240
Biogás producido (m ³ /d)	9750	37000
Cantidad biogás producido referido a la cantidad cachaza (m ³ /t)	130	155

LAS VINAZAS Y LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

En lo que respecta a la producción de biogás a partir de los residuales de la producción de alcohol o sea de las vinazas, se estima una obtención de 20-22 m³ de biogás/m³ de vinaza, con una eficiencia del 70% en la remoción de DQO. (López 1996)

A manera de ejemplo el ingenio Magdalena en Guatemala con una destilería que produce 300 metros cúbicos por día de alcohol tiene una planta de biogás para el tratamiento de sus vinazas (4200 m³ vinaza /d) o sea se obtienen unos 14 m³ de vinazas por m³ de alcohol y se produce 124 000 m³ Biogás/d. o sea en esta instalación se alcanza una producción de 29.5 m³ de biogás por m³ de vinazas (Byron, 2013).

² Este valor aumenta por disminuir la cantidad de cogollo procesado manteniendo la misma cantidad de hojas y variando la cantidad de materias extrañas en forma no proporcional.

LA ENERGÍA TÉRMICA Y LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

El vapor producido por la combustión de la biomasa cañera se destina hacia la producción de energía mecánica o eléctrica y la energía térmica para los requerimientos de los procesos tecnológicos de la producción del azúcar o el alcohol.

En una fábrica que procese 1000 toneladas de caña por día, con una presión media de generación de vapor de 28 kg/cm² y con un consumo de vapor en el proceso de 550 kg/ton caña, puede generar unos 2167 kWh, mientras que con un consumo de 380 kg/ton caña la generación sería de 1497 kWh, sin embargo en este último caso, se obtendrá bagazo sobrante que puede ser empleado para producir más electricidad, o energía térmica para satisfacer no solo las necesidades de la producción del azúcar sino también las necesidades de la producción de alcohol. Un esquema térmico con óptimo aprovechamiento del vapor permite lograr sobrantes de bagazo del orden del 20-25%.

El bajo consumo de energía mecánica en comparación con las necesidades de energía térmica determinan la posibilidad de implementar un sistema de cogeneración de energía eléctrica, siendo el consumo de energía eléctrica para los equipos motrices de la fábrica es del orden de los 15-25 kWh/ton caña.

La presión de generación del vapor tiene una incidencia significativa en la producción de energía eléctrica, en el ahorro de fuel oil y en la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero en la Tabla 2. se muestran estos datos para una fábrica que procese diariamente unas 10 000 toneladas de caña.

Tabla 3. Incidencia de la presión de generación de vapor sobre la producción de energía eléctrica, el ahorro de fuel-oil y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero

Preston vapor (kg/cm ²)	Índice Generación (kg vapor/ kWhr)	Energía eléctrica generada (kWhr /t caña)	Combustible Evitado (kg/h)	CO₂ Evitado (kg/h)
42	8.0	69.9	815	2567
65	6.2	90.0	1047	3300
100	5.8	96.4	1122	3535

POTENCIAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGIA ELÉCTRICA USANDO RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR

En la tabla 4 se expone la cantidad de electricidad que se pudiera producir para diferentes presiones de vapor a partir de procesar 10 000 ton caña por día para la fabricación de azúcar.

Se puede observar como con incrementos en la presión del vapor se puede obtener entre un 25 y un 35 % más de energía eléctrica producida con las mismas cantidades de biomasa

Tabla 4. Producción de energía eléctrica a partir de residuos disponibles de la producción de azúcar para diferentes presiones de generación de vapor.

Caña molida (t/d)	Cantidad (t/d)			TOTAL	
	RAC	BAGAZO	CACHAZA		
10 000	1650	2800	400	---	
PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA (kWh/día)x10³					%
Presión vapor (bar)	RAC	BAGAZO	CACHAZA	TOTAL	
42	453	770	120	1343	--
65	586	995	120	1683	25.3
100	620	1069	120	1809	34.6

POTENCIAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DE ALCOHOL

En la tabla 5 se expone la cantidad de electricidad que se pudiera producir para diferentes presiones de vapor a partir de procesar 10 000 ton caña por día para la fabricación de azúcar y alcohol a partir del uso de las mieles finales producidas. En el caso de la producción de alcohol la energía eléctrica producida se basa en su obtención a partir de la producción de biogás de los residuales líquidos de la producción del alcohol o sea sus vinazas.

Tabla 5. Producción de energía eléctrica a partir de residuos disponibles de la producción de azúcar y alcohol para diferentes presiones de generación de vapor

Caña molida (t/D)	Cantidad (t/d)				TOTAL
	RAC	BAGAZO	CACHAZA	VINAZAS (m ³ /día)	
10 000	1 650	2 800	400	1 260	---
PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA (kWh/día)x10³					
Presión vapor (bar)					
42	453	770	120	74	1417
65	586	995	120	74	1757
100	620	1069	120	74	1883

Se puede observar cómo se incrementa en 74 MW la producción eléctrica al emplearse el biogás a partir de las vinazas de la producción de alcohol.

LA TECNOLOGÍA DE GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA Y EL CICLO COMBINADO

En los últimos años se han propuesto esquemas teóricos del empleo de la gasificación del bagazo y los residuos agrícolas de la cosecha cañera con el objetivo de su suministro a una turbina de gas para la generación de electricidad; estudios posteriores indican el uso de ciclos combinados gas-vapor para aprovechar el calor sensible del gas que sale de la turbina para generar vapor en una caldera recuperadora de calor y por consiguiente generar una mayor cantidad unitaria de energía eléctrica.

Soluciones de generación-cogeneración de electricidad, en el mediano-largo plazo, pueden cambiar significativamente con la introducción de esta tecnología de Gasificación de Biomasa-Turbina de Gas-Ciclo Combinado (BIG-GT-CC), que aunque en la actualidad se encuentra en fase de desarrollo es de esperar que en el futuro se pueda encontrar disponible comercialmente. Se indica que esta tecnología puede lograr índices de generación del orden de los 220 KWh/tc en época de zafra y fuera de zafra 400 kg/t RAC. (Larson 1990) Scott (2002) Ello implicaría la posibilidad de aumentar la producción de energía eléctrica entre 5 y 40 veces los esquemas típicos actuales donde se emplean turbinas de contrapresión. En resumen, existen tecnologías disponibles y en desarrollo que pueden propiciar el mejor aprovechamiento de los residuos de las producciones de azúcar y alcohol, sin embargo, tanto por nuestro país como por otros países de América Latina la obtención de sus beneficios se enmarca básicamente en la disponibilidad de financiamiento para ejecutar este tipo de inversión.

A manera de ejemplo de un plan inversionista a mediano plazo para incrementar la producción de electricidad a partir del empleo de energía renovable utilizando básicamente la biomasa cañera se expone el plan de desarrollo hasta el 2030 en Cuba en correspondencia con un proceso inversionista considera la instalación de más de 750 MW en plantas termoeléctricas en 19 fábricas de azúcar y por consiguiente un incremento importante de la producción de energía eléctrica del país que incidirá sobre la introducción de energías renovables en la matriz energética vinculada a la producción de electricidad. A continuación se expone la ubicación y potencia proyectada del plan inversionista de las plantas termométricas en las 19 fábricas de azúcar.

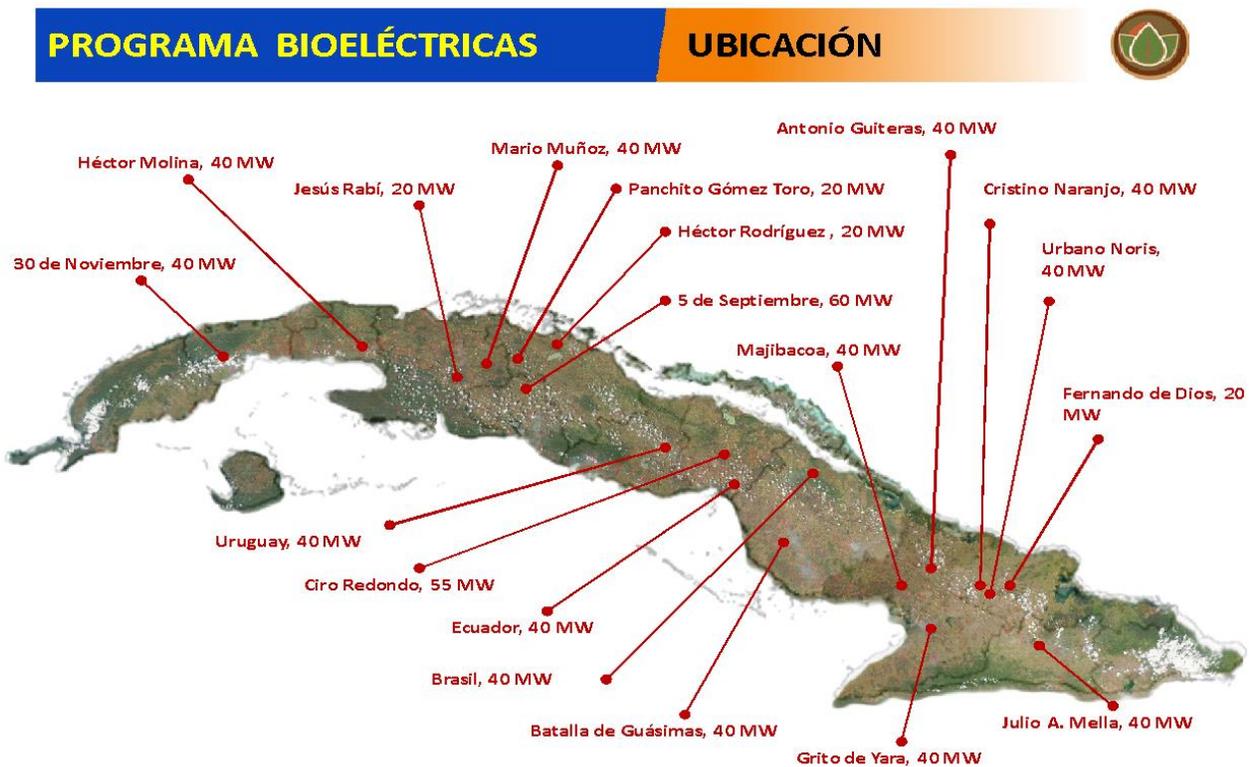


Figura 1. Ubicación y potencia proyectada del plan inversionista de las plantas termométricas en las fábricas de azúcar seleccionadas (MINEM 2014)

CONCLUSIONES

Los residuos agrícolas e industriales de la producción de azúcar y/o de alcohol representan un significativo potencial de combustible renovable que puede propiciar energía térmica y eléctrica.

En resumen, en el mundo existen tecnologías disponibles y en desarrollo que pueden propiciar un mejor aprovechamiento del potencial energético del procesamiento de la caña de azúcar sea para la producción de azúcar o de alcohol, sin embargo la obtención de sus beneficios se enmarcan básicamente en la disponibilidad de financiamiento para ejecutar este tipo de inversión. El procesamiento de la Caña Integral ha indicado como ventaja principal la obtención de una mayor cantidad de biomasa a partir de sus residuos que puede ser empleada como combustible al compararse con el procesamiento de la caña limpia.

Existe un alto potencial para producir energía térmica y eléctrica de los residuos de esta agroindustria, siendo posible preparar y ejecutar proyectos para la generación y cogeneración de esta energía. Estudios de casos prácticos para determinar la viabilidad técnica y económica para las diferentes alternativas durante y después de la cosecha pueden ser realizados.

REFERENCIAS

Anon (2002) Bio Energy News Sept p.16

Byron J. (2013) Biogas Production from vinasse as an alternative to develop biofuels Proc.Int.Sugar Cane Technol Vol 28.

Larson F., Williams R. (1990) Biomass gasifier steam injected gas turbine cogeneration. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power. Abril

López P. (1995) Waste treatment at factories producing alcohol from sugar cane molasses with recovery of *Sacharomyces* yeast with biogas production. Proc.International Seminar La Habana

MINEM (2014) Energías Renovables resultados año 2013 Taller nacional de energía Ministerio de Educación Superior La Habana

Pérez F., Rubio A. (1990) Utilización de residuos agrícola cañero como combustible. Informe Delegación MINAZ - Universidad Central de las Villas.

Ripoli T. et all. (2004) Biomassa de cana-de-acucar colheita, energia e ambiente Piracicaba Barrios y Marquez Ed, Electronica

Scott et al. (2002) Biomass gasification for combined heat and power in the cane sugar industry. ISJ vol.104 No.1242 p. 268

Valdes A., Fiandor H. (2001) Ventajas y desventajas de procesamiento industrial de la caña integral Memorias Diversificación 2000 La Habana

Valdes A (2004) Alternativas generación y cogeneración de energía eléctrica. Memorias Seminario Energía en la Industria del Azúcar y el Alcohol Itajuba Brasil Julio

Valdes A.- (2015) La cogeneración de energía eléctrica en las fábricas de azúcar y alcohol y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero VIII Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética Mayo Habana

VALORACIÓN ENERGÉTICA Y SOSTENIBLE DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE MODERGIS – CASO DE ESTUDIO COSTA RICA³

Ricardo Quijano Hurtado (1), Javier Domínguez Bravo (2)

(1) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela Procesos y Energía; Medellín, Colombia. rquijano@unal.edu.co

(2) Centro de Investigaciones Energética Medioambiental y Tecnológicas (CIEMAT) Departamento de Energía, División de Energías Renovables; Madrid, España. javier.dominguez@ciemat.es

RESUMEN

El aprovechamiento energético de Biomasa Residual Vegetal de los cultivos promisorios de biocombustibles como potencial Energético para Costa Rica, fue realizado mediante la plataforma de prospección energética sostenible MODERGIS, que bajo criterios de sostenibilidad determino zonas potenciales para el uso de áreas productoras de bioenergía en cultivos de *Jatropha Curcas*, Higuierilla Negra, Higuierilla Blanca, Palma Africana y Caña de Azúcar, así como el potencial energético de la biomasa residual de la cascara de fruto, cascarillas de semilla, tortas residuales de extracción y vinaza, los cuales tienen un potencial para ser aprovechados energéticamente por medio de procesos termoquímicos, biológicos y eléctricos. Se estimó que el potencial energético de la Biomasa Residual Vegetal para Costa Rica es de 1 294 749,56 Terajulios TJ al año, proveniente de 60 387 137,36 Toneladas de sus residuos al año, que representaría 307 776 075,80 kWh/año.

Del total de 2 293 925 de hectáreas que tiene Costa Rica, se observa que solo es apto y sostenible para cultivos energéticos el 45% del total de territorio, teniendo un amplio concepto de conservación en áreas protegidas de 55%, de los resultados de MODERGIS en el sistemas de información geográfica utilizado inicialmente, resulta que las hectáreas sostenibles para el cultivo de caña de azúcar son de 828 950 Ha, para higuierilla es de 20 800 ha, para *Jatropha Curcas* de 242 525 Ha y finalmente en Palma Africana de 1 201 650 Ha.

Palabras clave: *Biomasa Residual vegetal, Valoración Energética, Sistemas de Información Geográfica-MODERGIS, Análisis Multicriterio de Decisión - VIKOR*

INTRODUCCIÓN

Las fuentes energéticas no convencionales de energía, son aquellas que se encuentran disponibles, pero que algunas veces son empleadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente, a veces se le conocen como energías no comerciales. La biomasa es toda la materia orgánica de origen natural, como algas, arboles, plantas, residuos de cosechas y los generados por las actividades propias del ser humano, entre otras. La biomasa tiene energía solar almacenada, en los enlaces químicos de sus moléculas, que

³ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

puede liberarse en forma de energía química al romper los enlaces carbonos - hidrógenos - oxígenos mediante procesos biológicos o termoquímicos. (*McKendry 2001a*).

El modelo energético actual, basado en combustibles fósiles, ha permitido grandes avances científicos, tecnológicos y por consiguiente, el desarrollo económico mundial. Paralelamente ha deteriorado de forma progresiva e irreversible las condiciones de vida del planeta, y aunque es uno de los principales impulsores de la sociedad no logra un equilibrio entre el desarrollo y la sostenibilidad. En este contexto la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE, demostró en el Fórum Barcelona 2004 que el actual modelo energético resulta insostenible si se sigue con los mismos patrones de consumo energético y se mantiene la dependencia en los combustibles fósiles. En tal sentido recomendó ampliar las investigaciones sobre el desarrollo energético basado en las nuevas fuentes renovables (*Asgeirsdottir, B 2004*) y sostenibles que no sólo continúen alimentando el motor del desarrollo, sino que también contribuyan a una mejor calidad de vida para las futuras generaciones.

Paralelamente la comunidad científica viene recopilando mayor número de evidencias de que la biodiversidad no está distribuida de manera equitativa sobre el total de la superficie terrestre, sino que existen determinadas zonas privilegiadas que poseen gran diversidad. En las referencias (*N. Myers, R. A. Mittermeyer, C. G. Mittermeyer, G. A. B. Da Fonseca, y J. Kent, 2000*) ha concluido el concepto de "Puntos Calientes" de biodiversidad ". Estas se caracterizan por albergar una gran cantidad de especies endémicas que cada vez van perdiendo más espacio en su propio hábitat. Hasta el 44% de especies de plantas vasculares y el 35% de especies de cuatro grupos de vertebrados en el mundo se encuentran concentradas en 25 puntos calientes que comprenden sólo el 1.4% de la superficie terrestre. De la totalidad de puntos calientes, El Darién que se extiende desde las selvas húmedas de Colombia, Panamá y Costa Rica con 2 250 plantas y 418 vertebrados endémicos, coinciden con los sitios declarados por la UNESCO (*Comité de Patrimonio Mundial 2011*) de los puntos calientes y las especies que allí viven se ven afectados por el calentamiento global inducido por la utilización de recursos energéticos no renovables.

España ha cartografiado la producción energética del potencial de los residuos agroforestales de la región de Navarra mediante los sistemas de información geográfica, identificando las zonas posibles para la ubicación de plantas de aprovechamiento de biomasa, (*Domínguez, J. et al, 2003*). En Estados Unidos se elaboró el atlas de los recursos energéticos renovables, contabilizando el potencial energético de la biomasa residual, tomando como muestra representativa las hectáreas de Landfill, estiércol animal, residuos forestales de las cosechas de los cultivos de maíz, el trigo y la cebada. (*The hewlett foundation and the energy foundation, 2002*). En Colombia se elaboró el atlas del potencial energético de la biomasa residual que evalúa la oferta energética de algunos cultivos del sector agrícola y residuos sólidos urbanos. (*Unidad de Planeación Minero Energética 2008*).

En este sentido y varios autores coinciden en determinar que las herramientas de análisis, simulación y planificación sostenible solo existen por separado (*A. Angelis-Dimakis et al, 2011*), y para lograr el objetivo de evaluar integralmente una alternativa (*J. R. San Cristóbal 2011*), debe hacerse un análisis individual para luego hacer un análisis global sobre los resultados obtenidos, tarea complicada debido a la gran cantidad de información que es necesario manipular (*J. Domínguez y J. Amador, 2007*).

Para este trabajo se simuló las áreas sostenibles de combustibles energéticos con MODERGIS, (*Quijano, R., Domínguez, J. y Botero, S. (2012)*) que es una plataforma que integra los sistemas de información geográfica, el software de simulación de oferta y demanda energética L.E.A.P. (*Stockholm Environment Institute, The Long-range Energy Alternatives Planning System, 2008*) y el Análisis Multicriterio de Decisión (*S. Opricovic y G.-H. Tzeng, 2010*), como herramientas de última generación que facilitan los procesos de planificación energética, orientada a incluir en el mix energético de una país, en este caso en Costa Rica,

el uso de los biocombustibles. Pero además calcula el Potencial Energético de los residuos vegetales de la biomasa (*Escalante et al 2008*), determinando la opción más conveniente a seleccionar.

Costa Rica por décadas, ha fomentado el desarrollo de energías limpias para la generación eléctrica; sin embargo, en otras actividades económicas, se ha seguido la tendencia mundial en la utilización de los combustibles fósiles, incrementando el consumo nacional de derivados del petróleo a tasas del orden del 4,3% anual en los últimos 10 años, lo que a su vez ha provocado un incremento en la factura petrolera, con el impacto en la economía y el sector social nacional – (*Programa Nacional de Biocombustibles - 2008*). Esto provoca, no sólo una alta contaminación, sino una alta vulnerabilidad de la población por cambios en los precios de estos combustibles. En los últimos años el panorama energético mundial ha variado notablemente de manera negativa. El elevado costo de los combustibles fósiles, los crecientes riesgos de desabastecimiento y los avances técnicos, han favorecido la aparición de sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa cada vez más eficientes, confiables y limpios considerándose esta fuente de energía como una alternativa, parcial a los combustibles fósiles.

METODOLOGÍA

DEFINICIÓN MODERGIS

MODERGIS es una concepción propia que busca la integración de energías renovables, evaluando simultáneamente la potencialidad energética espacial y temporal de la oferta y demanda de energía de una zona geográfica. Además es coherente y consecuente con el uso de herramientas integradas y flexibles de modelos para la evaluación de estos recursos. (*R Quijano y J Domínguez 2008*).

IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍAS RENOVABLES – ENERGIS

ENERGIS es un entorno virtual que permite el análisis espacial de un lugar georreferenciado mediante Sistema de Información Geográfica. Este análisis permite visualizar y estimar el potencial de recursos energéticos de la zona de estudio, basado en restricciones que se ingresen y pueden ser de carácter ambiental o patrimonial. Inicia con la información cartográfica base de interés Nacional y con la información base de las regiones, provincias, municipalidades, centros urbanos, reservas forestales, parques naturales, ríos cuerpos de agua, información de viento y radiación solar. Esta información establece, primero, un marco de análisis y de referencia espacial y, segundo, unas restricciones iniciales, referida a aquellas zonas en las cuales no es posible desarrollar proyectos energéticos o hacer compatibles con zonas de interés ambiental patrimonial, Nacional o Local. El énfasis es la evaluación del potencial de recursos renovables (fundamentalmente en este caso de estudio, dendro-energía y biocombustibles), previendo la ampliación de la canasta energética en áreas potencialmente atractivas para la inclusión o sustitución por nuevas formas de energía.

ENERGIS se trabajó para este trabajo con datos espaciales de tipo ráster representado por celdas o píxeles de unidades homogéneas de información de 500 por 500 metros, que exhibe varias diferencias con el modelo vectorial dada la manera discreta para representar la información espacial (*M. N. DeMers 2002*). Esto brinda un tratamiento más profundo de los datos temáticos, disponiendo la posibilidad de aplicar álgebra de mapas y relaciones de lógica booleana y aritmética, como la posibilidad de clasificaciones multivariantes, operaciones estadísticas univariantes y multivariantes, operaciones de vecindad inmediata y otras posibilidades como interpolaciones.

INFORMACIÓN COSTA RICA

La información de Costa Rica se trabajó con metadatos sobre el contorno del país, basado en la División Territorial Administrativa (DTA) de Costa Rica del año 2009, se presenta el sistema de coordenadas geográficas, sin embargo se proporcionan los parámetros de proyección de CRTM05 y Lambert, para hacer transformaciones. Se hace una descripción del sustento legal de esta capa temática, basado en el documento oficial del año, 2009 Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. Departamento de División Territorial y Nomenclatura. División Territorial Administrativa de la República de Costa Rica – 2ed. – San José, Costa Rica: MOPT, 2009. 138p.

La DTA tiene el propósito de establecer la correcta y clara determinación fronteriza entre las diferentes unidades administrativas existentes en el país (provincias, cantones y distritos). La Proyección está en CRTM05. Costa Rica transversal de Mercator año 2005. Con la Base legal de la División Territorial Administrativa de Costa Rica, basado en la información del Instituto Geográfico Nacional.

Posición geográfica del país

Latitud (puntos extremos)

- Norte: 11°13'12" (lugar donde el Río Sapoá entra a Nicaragua).
- Sur: 08°02'26" (Punta Burica, punto más meridional del territorio continental. El punto más meridional de todo el territorio Nacional es Cabo Dampier, en la Isla del Coco, a 05°30'06" de Latitud Norte).

Longitud (puntos extremos)

- Este: 82°33'48" (Boca del Río Sixaola).
- Oeste: 85°57'57" (Cabo Santa Elena, punto más occidental del territorio continental. El punto más occidental de todo el territorio nacional se encuentra en el islote Dos Amigos, adyacente a la Isla del Coco, a 87°06'06" de longitud oeste).

TIPO DE INFORMACIÓN ANALIZADA

Revisada y analizada la información se proyecta y organiza por temáticas y por usos de la siguiente manera:

- Mapa Digital de Terreno o Elevación - MDT
- Cartografía Básica Político - Administrativa.
- Municipalidades
- Provincias
- Centros poblados
- Usos del suelo.
- Temáticas Ambientales
- Áreas Protegidas
- Parques Nacionales
- Volcanes y Zonas de Influencia.
- Resguardos Indígenas
- Factores Naturales.
- Capacidad agrologica del Suelo

- Cobertura Vegetal
- Cultivos.
- Precipitación.

CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Para determinar los criterios de sostenibilidad se hace coherencia por los definidos por la Comisión de Desarrollo Sostenible CDS y se genera mapa por mapa del potencial de restricciones que se pudieran presentar para el cultivos de biocombustibles (Quijano 2009, excluyendo mediante la herramienta de algebra de Mapas, las zonas de interés Ambiental, Social o Normativo que sean o puedan ser restringidas por alguna de las anteriores razones: En este estudio se excluyen:

- Parques Nacionales
- Zonas de Reservas Forestales
- Zonas de Volcanes y áreas de influencia.
- Zonas Urbanas
- Zonas de comunidades Indígenas

Los resultados obtenidos fueron ensamblados en una sola matriz (I/O: Entradas salidas) en la cual las áreas restringidas reciben un valor 0 y las áreas disponibles reciben un valor 1, este tipo de matrices acostumbran llamarse "matrices de decisión booleana". Esto permite que a través de instrucciones SQL o con operaciones de algebra de mapas, se garantice que una acción se dará únicamente en aquellos sitios en los cuales se respetan las restricciones.

Los resultados obtenidos fueron ensamblados en una sola matriz (I/O: Entradas salidas) en la cual las áreas restringidas reciben un valor 0 y las áreas disponibles reciben un valor 1, este tipo de matrices acostumbran llamarse "matrices de decisión booleana". Esto permite que a través de instrucciones SQL o con operaciones de algebra de mapas, se garantice que una acción se dará únicamente en aquellos sitios en los cuales se respetan las restricciones. Los resultados del mapa energético sostenible se pueden observar en la figura 1.

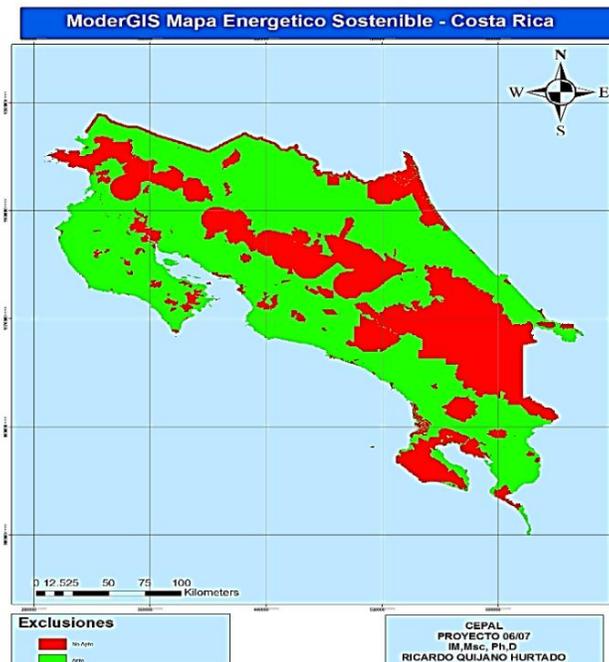


Figura 1. Mapa Energético Sostenible de Costa Rica.

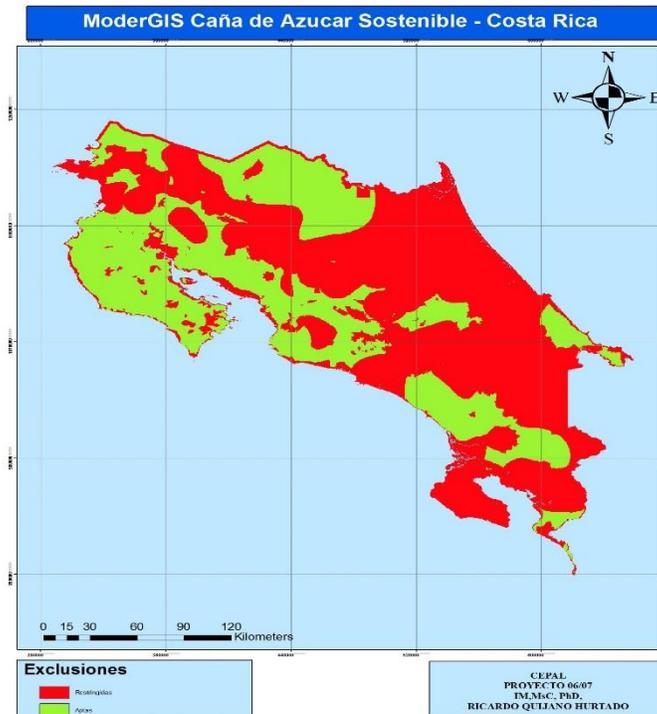


Figura 2. Mapa Energético de caña de Azúcar de Costa Rica

Simulación Sostenible de cultivos

Una vez constituidas las fuentes básicas de análisis y las fronteras para los análisis particulares se procedió a estimar la factibilidad para cada una de las siguientes fuentes de energía caña de azúcar, higuierilla, palma oleaginosa, jatropha.

Partiendo del mapa de restricciones para proyectos de energías sostenibles, se seleccionan áreas (álgebra y superposición de Mapas) las características propias de cada cultivo (Instituto Nacional de Tierras Agrícolas - INTA de Costa Rica), que son necesarias para su desarrollo:

- Precipitación.
- Características agrológicas del suelo.
- Altura sobre el nivel del mar (msnm).
- Tipo de Cultivo.

Caña de azúcar

El cultivo de caña presenta como condiciones generales: una altura apropiada entre 0 y 1600 msnm, una precipitación anual de 1500 a 3500 mm y suelos aluviales con texturas franco-arcillosas y bien drenadas. Dado que los análisis se dan a una escala macro, no es posible determinar una coincidencia de detalle en todas las condiciones, pero si una regionalización de la factibilidad en donde confluyan los parámetros que hacen posible la presencia del evento.

Este resultado preliminar se multiplica con la matriz de exclusiones, de unos y ceros igualmente, y así se obtiene finalmente el mapa de Aptitud del cultivo de Caña de azúcar en Costa Rica. El resultado se muestra en la figura 2.

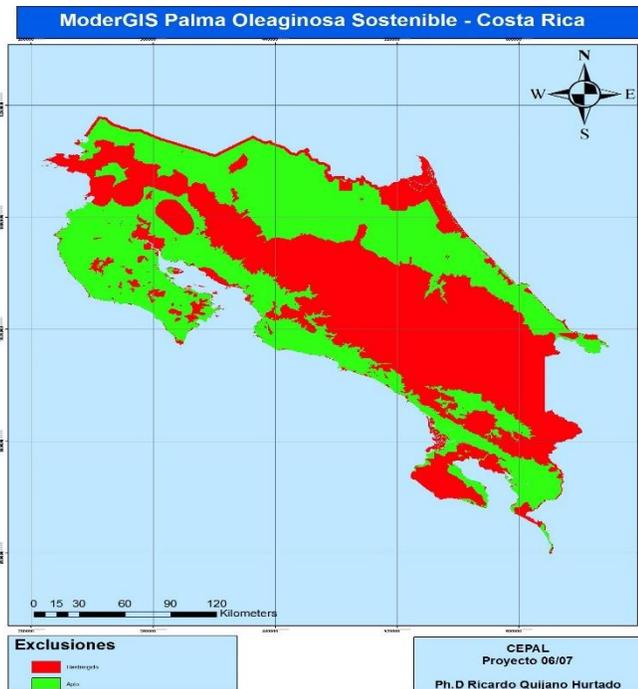


Figura 3. Mapa Palma Oleaginosa Sostenible

Palma Oleaginosa

Las condiciones consideradas fueron: los mejores suelos para este cultivo son los volcánicos y arcillas aluviales y marinas de zonas bajas (por debajo de los 500 msnm), de buena permeabilidad y bien drenados; requiere precipitaciones de 2000 mm o más distribuidos a lo largo del año, sin estaciones secas muy pronunciadas y clima cálido de temperatura entre 22 y 29 °C, el procedimiento es similar al ejecutado con la caña de azúcar, solo se requiere cambiar los rangos en las consultas de altura y precipitaciones y reutilizar el mapa de suelos ya que se reproducen las mismas condiciones que para la caña. Los resultados parciales y finales pueden observarse en la Figura 3.

Higuerilla

Para un cultivo comercial el desarrollo normal de la planta se consigue en climas cálidos y secos con precipitación de 1500 a 2000 mm anuales y con baja humedad relativa. Las lluvias deben ser moderadas y bien distribuidas, abundantes en la etapa de desarrollo; la maduración y la cosecha deben coincidir con la época seca para que los racimos sequen uniformemente y no se desprendan los frutos antes de la recolección. Cuando las lluvias pasan los requerimientos mencionados la planta tiende a desarrollarse mucho vegetativamente con disminución en la producción.

Jatropha

Nombre científico: *Jatropha curcas* L.

Nombres comunes: piñón, tempate piñoncillo, coquito, coquillo, jatrofa (español); physic nut, purging nut (inglés); pinhao manso (portugués).



Figura 4. Mapa de Higuerilla Sostenible.

Tipos de suelo: Los más aptos son suelos franco arenosos o arcillo arenosos, livianos, ventilados y bien drenados. El piñón, también conocido como tempate, no tolera suelos inundables o pesados. El rendimiento del cultivo responde bien al uso de fertilizantes orgánicos o químicos cuando las condiciones del suelo son pobres. Puede crecer en suelos con un pH entre 4.5 y 6.5; sin embargo, algunas fuentes no recomiendan suelos ácidos ($\text{pH} < 4.5 - 5.55$) ni alcalinos ($\text{pH} > 8.5$).

Requerimientos de agua: El piñón puede crecer con una precipitación anual entre 250 mm y 2000 mm. Sin embargo, se considera necesario un mínimo de 600 mm para la producción de frutos y un rango mínimo de 800-1000 mm y un máximo de 1200-1500 mm, bien distribuidos durante el año, para la producción en condiciones ideales. En condiciones de poca precipitación se puede utilizar irrigación. **Clima:** El piñón crece desde regiones tropicales muy secas hasta bosques lluviosos y en la mayoría de subtrópicos. Muchos estudios establecen que la temperatura adecuada para el cultivo es entre 18 y 28.5 grados centígrados.

Aunque este cultivo no reporta condición adversa en precipitaciones, suelos o pisos altitudinales, se recomienda en suelos pobres o deteriorados y climas desérticos a cualquier altura. El mapa de factibilidad se presenta en la figura 5.

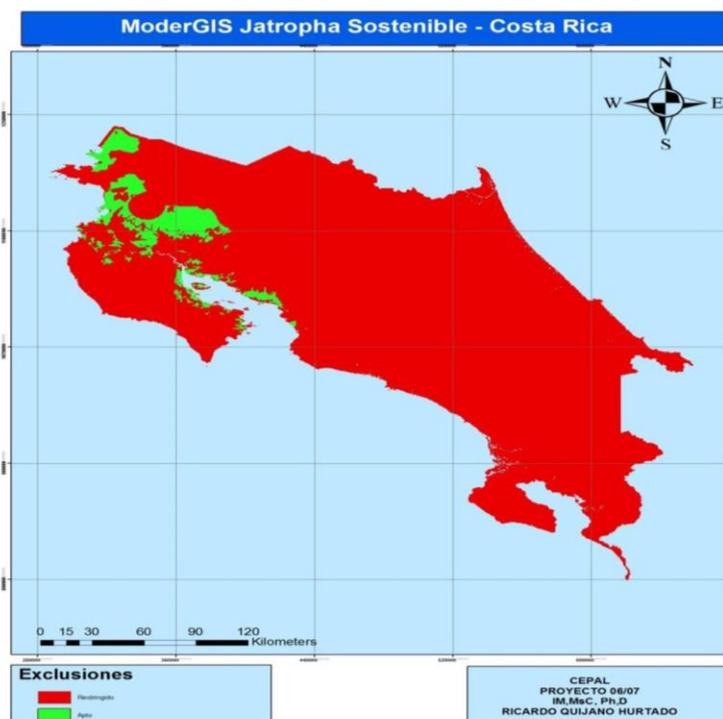


Figura 5. Jatropha Sostenible

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA RESIDUAL.

En la evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas, se realizó teniendo en cuenta la cantidad de biomasa residual húmeda, sin incluir en los modelos el contenido de humedad del residuo. Se consideró importante la inclusión de este término en la ecuación, debido a que la forma más adecuada de aprovecharlo energéticamente es en procesos termoquímicos y entre estos el más directo es la combustión, y para obtener una mejor eficiencia en estos procesos termoquímicos se recomienda

conocer: el contenido de humedad, el valor calorífico, la relación carbono fijo y volátiles, el contenido de cenizas y de metales alcalinos. (Mckendry, 2001a).

Para la valoración energética de la biomasa residual de los cultivos antes mencionados de Costa Rica, se plantea un modelo matemático en función de la masa del residuo y de su contenido energético, así:

$$PE = Masa_{residuo_seco} CE_{residuo}$$

- $CE_{residuo}$: Contenido energético del residuo

Para evaluar el PE, como primer paso se debe cuantificar la biomasa residual y para esto se tiene que la masa de residuo seco es función de: el área cosechada (A), el rendimiento del cultivo (Re), la cantidad de residuos generados (f_{p-e_i}) y del contenido de humedad (f_{h_i}). Por consiguiente la masa de residuo se puede expresar como:

$$Masa_{residuo_seco} = A Re f_{p-e} f_h \quad \text{Ecuación (1)}$$

En el modelo, el Poder Calorífico Inferior (PCI), se ha incluido para evaluar el contenido energético del residuo, el PCI (KJ/ Tn de residuo seco), puede obtenerse experimentalmente o teóricamente. Para su medición en el laboratorio se utiliza una bomba calorimétrica; y a nivel teórico por ejemplo se puede utilizar la correlación propuesta por (Changdong et al, 2002), que se basa en el análisis próximo del combustible.

Por lo anterior, para calcular el PE de los residuos del arroz se propone el siguiente modelo, el cual también es aplicable a diferentes biomásas residuales agrícolas, siempre y cuando se disponga de la información requerida en la ecuación 2. (Escalante et al 2008) (Corredor O, 2008)

La estructura del modelo propuesto para evaluar el PE es:

$$PEBV_{real} = A Re K \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n (f_{p-e_{k,i}} f_{h_{k,i}} PCI_{k,i}) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

- **PEBV**: Potencial Energético Biomasa Vegetal Agrícola (TJ / año).
- **A**: Extensión de tierra cultivada, representada por las hectáreas cosechadas del cultivo principal (Ha) en un año o en un mes; depende de la disponibilidad de información.
- **Re**: Rendimiento del cultivo en función del producto principal (Tn de producto principal/ Ha sembradas).
- **K**: Constante de conversión de unidades. Su valor es $1 \cdot 10^{-6}$
- $f_{p-e_{k,i}}$: Factor de generación de producto energético, es una relación entre la masa de residuo con respecto a la masa de producto principal. (Ton de residuo/ Ton de producto principal).
- $f_{h_{k,i}}$: Factor de humedad. (Tn residuo seco/Ton de residuo húmedo). $f_{h_{k,i}} = 100 - \%humedad$

En la ecuación 2, el contador k hace referencia a los dos grupos de residuos considerados; mientras que el contador i se refiere a cada uno de los residuos identificados y que pertenecen a cada uno de los grupos. Como se presenta en la siguiente tabla 1 para potencial energético en TJ de la Palma Africana:

Tabla 1. Potencial Energético Palma Africana

PALMA AFRICANA	Área de cultivo	PCI	Biomasa	Potencial Energético
	ha	kJ/kg	t/año	TJ/año
Racimos fruta	1201650	6000	2564321,1	11548,68
Fibra	1201650	10000	15813714	113605,7
Cascara	1201650	18800	9493035	167475,4
Total Palma Africana	1201650		27871070,1	292629,8

Fuente: Cálculos propios - ModerGIS

Para la caña de azúcar se presenta en el tabla 2 el potencial energético del residuo en este caso el bagazo.

Tabla 2. Potencial Energético

CAÑA DE AZUCAR	Área de cultivo	PCI	Biomasa	Potencial Energético
	ha	kJ/kg	Ton/año	TJ/año
Bagazo	828950	76400	18236900	808113,5
Total Bagazo				808113,5

Fuente: Cálculos propios - ModerGIS

La *Jatropha Curcas* presenta un potencial energético de las hojas, la torta y la cascarilla, como se observa en la tabla 3. Y finalmente se presenta en la tabla 4 los resultados de la higuera.

Tabla 3. Potencial Energético *Jatropha Curcas*

	Área de cultivo	PCI	Biomasa	Potencial Energético
	ha	kJ/kg	Ton/año	TJ/año
JATROPHA CURCAS				
Cascarilla	242525	22141	5435203,52	106971
Hojas	242525	18807	6789923,92	73541,34
Torta Prensada	242525	5339,69	1011959,82	2723,93
Total <i>Jatropha</i>			13237087,3	183236,2

Fuente: Cálculos propios - ModerGIS

Tabla 4. Potencial Energético de la higuera

Higuerilla Negra	Área de cultivo	PCI	Biomasa	Potencial Energético
	ha	kJ/kg	Ton/año	TJ/año
Cascarilla	20800	18247	670800	10770,05
Total Higuerilla N			670800	10770,05

Higuerilla Blanca	Área de cultivo	PCI	Biomasa	Potencial Energético
	ha	kJ/kg	Ton/año	TJ/año
Cascarilla	20800	18735,68	371280	6127,006
Total Higuerilla B			371280	6127,006

Fuente: Cálculos propios - ModerGIS

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez obtenidas las fuentes de información que definen la distribución espacial de la factibilidad para desarrollar una fuente de combustibles basados en biomasa, se procede a generar las consultas que mostraran cuantas unidades reales hay de una determinada fuente en un departamento X, esta operación se realiza por medio de operaciones recurrentes (para cada fuente) de estadísticas espaciales utilizando como matriz consultada al mapa de la fuente energética y como plantilla de consulta al mapa de polígonos que definen los departamentos. Esta operación reporta los estadísticos principales de las celdas que se encuentran contenidas en las fronteras del polígono. Para el caso que se ilustra (Arenal-Huerta Norte) puede verse que el número total de celdas (almacenado en la variable COUNT) es de 26 378 celdas que equivalen a 65 945 km², esto resulta de la siguiente operación de conversión de unidades:

$$\text{Área Total [km}^2\text{]} = \frac{26378 [\text{celdas}] \quad 500 [\text{m}] \quad 500 [\text{m}]}{1.000.000 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \right] \quad ([\text{Celda}])}$$

Como a las celdas que presentan factibilidad positiva se les asigno el valor de 1, y a las que NO, el valor de cero, la suma de todas las celdas (almacenado en la variable SUM) reportara el área en la cual puede darse la presencia o desarrollo de la fuente energética bajo análisis, para el ejemplo esta seria:

$$\text{Área Factible [km}^2\text{]} = \frac{1535 [\text{celdas}] \quad (500 [\text{m}] \quad 500 [\text{m}])}{1.000.000 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \right] \quad ([\text{Celda}])}$$

Es decir 383.75 km².

Los valores así calculados se almacenan en una tabla síntesis que presenta el área factible para cada fuente energética y para cada provincia. Ver Tabla 1. Esta tabla se obtiene generando una relación 1 a 1 entre cada resultado del análisis espacial y la tabla que acompaña la fuente de datos espacial de los departamentos, usando como campo clave para la relación el nombre del departamento.

Se presenta en la tabla 5. los resultados de las áreas potenciales de cada provincia por tipo de cultivo energético, se observa que el territorio de Costa Rica solo es apto y sostenible el 45% del total de territorio, teniendo un amplio concepto de conservación en áreas protegidas de 55%.

Tabla 5. Áreas Potenciales de cultivos para Biocombustibles – Costa Rica

REGIÓN O PROVINCIA	ÁREAS POTENCIALES (Ha)				
	TOTAL	Caña	Higuerilla	Jatropha	Palma
Arenal- Huerta norte	91475	38375	0	0	53100
Arenal- Tilaran	106550	57525	1500	5475	42050
Cordillera volcanica central	297625	126750	14125	0	156750
Guanacaste	370550	125925	0	95225	149400
La Amistad- pacifico	339100	242425	0	0	96675
La Amistad caribe	297750	74475	3625	0	219650
Osa	299275	74625	0	0	224650
Pacifico central	75550	29775	1550	15925	28300
Tempisque	244650	59075	0	125900	59675
Tortuguero	171400	0	0	0	171400
TOTAL	2293925	828950	20800	242525	1201650

Fuente: Cálculos propios – ModerGIS

CONCLUSIONES

El aporte de este modelo aplica a la conceptualización y construcción de un algoritmo lineal, para optimizar un plan de fuentes renovables de energía, dada una restricción expresada en potencia y energía tradicional de una zona geográfica determinada con sensibilidad ambiental y patrimonial que quiera entrar en los lineamientos de la sostenibilidad energética y ambiental.

Se estimó que el potencial energético de la Biomasa Residual Vegetal es de 1 294 749,56 TJ al año, proveniente de 60 387 137,36 Toneladas de sus residuos al año, que podría representar la generación de 307 776 075,80 kWh/año.

Del total de 2 293 925 de hectáreas que tiene Costa Rica, se observa que solo es apto y sostenible para cultivos energéticos el 45% del total de territorio, teniendo un amplio concepto de conservación en áreas protegidas de 55%, de los resultados de MODERGIS en el sistema de información geográfica utilizado inicialmente resulta que las hectáreas sostenibles para el cultivo de caña de azúcar es de 828 950 Ha, para higuerilla es de 20 800 ha, para Jatropha Curcas de 242 525 Ha y finalmente en Palma Africana de 1 201 650 Ha. Con una producción de residuos de biomasa de 60 387 137,36 Toneladas de sus residuos al año, que pueden ser aprovechados en usos termoquímicos o eléctricos, buscando una optimización de los recursos naturales una menor presión con el uso de los combustibles fósiles y un adecuado manejo ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen todo la colaboración y ayuda para la realización de este trabajo a la Universidad Nacional de Colombia y al Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas - CIEMAT de España y a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) por el suministro de la información y el apoyo financiero de este proyecto.

REFERENCIAS

- A. Angelis-Dimakis et al., «Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, págs. 1182-1200, Feb. 2011.
- Grynspan, R., «Grynspan: Bloomberg New Energy Summit 2011», 07-Abr-2011. [Online]. Available: <http://content.undp.org/go/newsroom/2011/april/grynspan-en>. [Accessed: 14-Jun-2011].
- Asgeirsdottir, B., «Forum 2004 - Documentos: Panel 1: Energía y desarrollo: ¿es posible otro modelo energético?», 2004. [Online]. Available: http://www.barcelona2004.org/www.barcelona2004.org/esp/banco_del_conocimiento/documentos/ficha80a8.html?idDoc=350. [Accessed: 14-Jun-2011].
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2003), Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana, Daniela Simioni (comp.), Libros de la CEPAL N°73, junio. (2005b), Taller Regional "Hacia economías de menores emisiones de GEI: mayor sostenibilidad en los mercados y en la orientación de la inversión", División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, 13 y 14 septiembre
- Changdong Sheng. J.I.t. Azevedo. 2004. Estimating the higher value of biomass fuels from basic analysis data.
- Corredor, O, Evaluación del Potencial Energético de la Biomasa Residual - Universidad Industrial de Santander, tesis de Maestría 2008. p 1-52.
- Domínguez bravo, J., ciria, P., Esteban, L.S., Sanchez, D. lasry, P. (2003): Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España), *GeoFocus (Informes y Comentarios)*, n°3, p. 1-10. ISSN: 1578-5157.
- J. Domínguez y J. Amador, «Geographical information systems applied in the field of renewable energy sources», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 52, no. 3, págs. 322–326, 2007.
- Escalante H, Oferta Energética de la Biomasa residual en Colombia, 2008
- J. R. San Cristóbal, «Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method», *Renewable Energy*, vol. 36, no. 2, págs. 498-502, Feb. 2011.
- Jankowski, P., «Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods», *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 9, no. 3, págs. 251-273, 1995.
- Instituto Geográfico Nacional (Costa Rica). Sistema de Información Geográfico de Costa Rica – UM.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET) Dirección Sectorial de Energía (DSE) Estadísticas. 2009 Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET) Dirección Sectorial de Energía (DSE) V PLAN NACIONAL DE ENERGÍA 2008-2021 Costa Rica.
- Mckendry, P. 2002. Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of biomass. In: *Bioresource Technology*, N° 83, p. 37-46,
- Mckendry, P. 2002. Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies. In: *Bioresource Technology*, N° 83, p. 47-54.
- M. A. Delucchi y M. Z. Jacobson, «Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies», *Energy Policy*, vol. 39, no. 3, págs. 1170-1190, Mar. 2011
- M. Heydari, M. Kazem Sayadi, y K. Shahanaghi, «Extended VIKOR as a new method for solving Multiple Objective Large-Scale Nonlinear Programming problems», *RAIRO-Operations Research*, vol. 44, no. 2, págs. 139–152, 2010.
- M. N. DeMers, GIS modeling in raster. J. Wiley, 2002.

N. Myers, R. A. Mittermeyer, C. G. Mittermeyer, G. A. B. Da Fonseca, y J. Kent, «Biodiversity hotspots for conservation priorities», *Nature*, vol. 403, no. 6772, págs. 853-858, 2000.

O. UNEP y I. IEA, «The IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories», IPCC, Bracknell, 1995 (3): I, págs. 51-155, 2006.

Programa Nacional de Biocombustibles, resumen ejecutivo Ministerio del Ambiente y Energía, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica 2008

R Quijano, 2009 Sostenibilidad de los Biocombustibles en Colombia. *Energías Renovables. Revista No 84 Especial América Latina* pp. 44. Madrid diciembre de 2009. ISSN 1578-6951. *Energías Renovables* ISSN: 1578-6951 ed: v.1 fasc.84 p.44.

R Quijano, J, Domínguez, y S, Botero. (2012) MODERGIS Application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5176-5187, Vol 16, Issue 1, ISSN – 1364-0321

R. Quijano and J. Dominguez Bravo, "Integrated Model Platform for Sustainable Energy Planning. Colombian case." *iEMSs Fourth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2008)*. Barcelona, Cataluña, 2008, pp.1231-1238

S. Opricovic y G.-H. Tzeng, «Extended VIKOR method in comparison with outranking methods», *European Journal of Operational Research*, vol. 178, no. 2, págs. 514-529, Abr. 2007.

The Hewlett Foundation and the Energy Foundation, *Renewable Energy Atlas of the West*. USA. 2002.

UNESCO - Comité de Patrimonio Mundial 2011. Bienes en la Lista del Patrimonio Mundial

Unidad de Planeación Minero Energética, *Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia*, Bogotá-Colombia, 2003.

GASIFICATION OF MUNICIPAL SOLID WASTES FOR POWER GENERATION IN BRAZIL, A REVIEW OF AVAILABLE TECHNOLOGIES AND THEIR ENVIRONMENTAL BENEFITS⁴

Diego Mauricio Yepes Maya (1), Electo Eduardo Silva Lora, Angie Lizeth Espinosa Sarmiento (2)

(1) Federal University of Itajubá, BPS Street, 1303, diegoyepes@unifei.edu.br
(2) Federal Center of Technological Education of Rio de Janeiro,
angieespinosa.sar@gmail.com

ABSTRACT

This article reviews the literature on thermochemical processing of municipal solid waste as the final disposal in Brazil, explores recent publications in the field of solid waste generated, its origin, characteristics and removal mechanisms currently employed, in the same way, available technologies for the thermochemical treatment of MSW with an emphasis on gasification and clean technology are evaluated, highlighting the current technical and reported in the literature in order to identify indicators of efficiency and flexibility of the technology. From the review it is concluded that gasification is a technically feasible option for the thermochemical conversion of municipal solid waste and subsequent power generation, besides being a technology that meets the applicable emission limits. Some of the main advantages of gasification of municipal solid waste are: (a) the sharp reduction in the waste mass (about 70-80%) and volume (approximately 80-90%), (b) the drastic reduction in land use, 1:3000, (c) destruction of organic pollutants and other halogenated hydrocarbons, (d) concentration and immobilization of inorganic contaminants so that they can be used effectively and safely removed, (e) use recyclables, such as ferrous metals, ferrous ash and slag materials, (f) reducing emissions of greenhouse gases by anaerobic decomposition of organic waste and (g) power generation.

Key words: *MSW, Waste to energy, gasification, thermo-chemical conversion, environmental advantage.*

INTRODUCTION

Brazil, the sixth largest economy in the world, with over 190 million people today faces two challenges in energy supply: firstly, the need for new alternative energy sources and secondly, proper disposal of Municipal Solid Waste (MSW); this is the generic name for any type of domestic waste routinely generated. According to the Brazilian Technical Standards Agency: "MSW are food waste, plastic bags, bottles, papers in general, clothes, pruning debris, remains of fairs such as: fruits, vegetables in general, and other materials organic and non-organic." Until the enactment of the National Solid Waste Policy (Edições Câmara 2012), the MSW does not include hospital, industrial, hazardous or radioactive wastes according to ABNT, 2004 (Codignole 2013). In Brazil, the MSW amounts generated is approximately 200,000 tons per day (Salomão 2010), its (17.7%) has as final destination open dumps, landfills (58.1%) and controlled landfills (24.2%), and the Southeast, accounting for nearly half of this total (Anon 2013).

⁴ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

The objective of this paper is to review the different thermochemical treatments to eliminate Municipal Solid Waste as well as the energy that is generated from them and demonstrate the environmental benefits reported in the literature).

MSW AVAILABILITY AND COMPOSITION ESTIMATION

The MSW generation is product of the each society consumption habits, some authors still determine a system waste generation based on the number of habitants, a small town, less than 3000 inhabitants, generates an average 0.50 kg / person / day, and larger cities, up to 5 million people can generate up to 1.0 kg / person / day (FEAM et al. 2012). In Brazil 2000, were generated on average 186,036 tons of MSW / day, and there was an increase of 31% from 2000 to 2008; most of the MSW generated in Brazil is destined to landfill followed by the provision will open dumps and landfills. According Codignole 2013: The municipalities MSW disposal situation, only 16.82% have waste treatment, 17.86% have selective collection of recyclable waste and 82.39% waste are collected directly in the soil (Codignole 2013).

In accordance with Brazilian legislation (Edições Câmara 2012) and others (Codignole 2013), the municipal solid waste generation sources are classified into three: a) domestic residence: Paper, plastic, clothing, leftover food, cans and bottles, packaging food, pruning of trees and debris from gardens. b) In commercial establishments (restaurants, offices, shops in general): Scrap paper, food scraps d, cartons, plastics, remains of gardens. c) In government offices (hospitals, prisons, schools, libraries): Paper, plastic, food scraps, garden scraps, waste classroom (FEAM et al. 2012).

According to research compiled by INTOSAI and Cointreau, 2006, the MSW composition varies depending on whether is a developing country, a developed country or a sub region developed, in the case of organic waste, it will be superior presence in underdeveloped countries like almost 85% compared to developed countries reaching only 30% in most of cases. The developed countries produce more paper, plastic, glass, metal and waste electrical equipment than countries less developed; these kind of residues on average are over 60% for developed countries, while in developing countries are less than 20% (Shonhiwa 2013)(Cointreau 2006).

POTENTIAL OF MSW FOR ENERGY GENERATION

The basic characteristics of municipal solid waste are usually heterogeneous, there are approaches based on separately assess of the most representative factions, as shown by some authors (Codignole 2013; Yamada et al. 2004; Woolcock & Brown 2013; STANTEC 2011). However, due to the fuel quality is necessary to know about MSW availability and their actual amount on a dry basis. On the Brazilian case, the volume collection data was taken from surveys conducted on data basis from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (Abrelpe & Plastivida 2013; Abrelpe 2011; Abrelpe 2013; Abrelpe 2008)], in the MSW case and other relevant urban cleaning items, hit a universe of 400 municipalities surveyed as shown in Table 1.

Table 1. Municipalities Searches by Regions for MSW (Abrelpe 2011)

Region	Number of municipalities surveyed
North	50
Northeast	123
Midwest	32
Southeast	132
South	63
Total	400

As a result of this research is published in 2012 the Brazilian Atlas of MSW which in the results were as follows: in 2011 were generated about 198 tons per day of municipal solid waste in Brazil, which equates to about 62 million tons per year. Of the total waste generated, 90% are listed. Waste collected in 2011, 58% were destined for landfills, 24% to controlled landfills and dumps 17%. This implies that there are approximately 75 000 tons daily with inadequate allocation. According to the data available for 2011, the Southeast region has 97 000 tons of MSW per day. The second region with the largest generation of municipal waste is the Northeast region, where they are generated daily about 50 tons of waste, representing 25% of the total. The South, Midwest and Northeast regions generate between 7% and 10% each (Abrelpe 2013)]. Evaluating a material as a possible energy carrier is necessary to establish the organic compounds, that is why the next and final analyzes are employed, moreover, it should be evaluated the upper and lower calorific value. All of them together form the foundation for the analysis of combustion or gasification processes basis (Basu 2013). On the case of MSW generated in Brazil, Table 1 shows a result example of a MSW mixture elemental composition in a typical Brazilian city, in a Latin American city and residual biomass, as follows:

Table 2. Elemental analysis of MSW and biomass
a: São Paulo Br (Codignole 2013), b: México, DF, Mx (Lopez Juarez 2010), c: Eucalyptus (Giraldo Restrepo 2013)

Constituent	Unit	A	b	c
C	%	37.42	49.06	46.78
H	%	5.14	6.62	5.92
O	%	29.91	37.55	45.55
N	%	1.19	1.68	0.32
S	%	0.13	0.2	0.09
Cl	%	0.66	0.47	—
Ash	%	25.56	18.16	1.34
Moisture	%	24.1	28.29	12.23
LHV	MJ/dry kg	14.36	—	18.06
HHV	MJ/kg	15.48	20.23	—

TECHNOLOGIES FOR MSW THERMOCHEMICAL CONVERSION INTO ENERGY

Thermal waste treatment is only one part of an integrated waste management. The heat treatment can play a number of important functions in an integrated system of waste management. The heat treatment may: a) reduce the volume of waste, thus preserving landfill space (heat treatment does not replace the need for landfills as several waste disposal still need) (Abrelpe 2013); b) Allow the recovery of energy from solid waste stream unwilling landfill in (Abrelpe 2011; Abrelpe 2013); c) allow the minerals and chemicals recovery from the solid waste stream, which can be reused or recycled; d) destroying a variety of contaminants that may be present in the waste stream (Arena 2012b; STANTEC 2011); e) Can often reduce the need for excessive handling of waste.

In most jurisdictions, the thermal waste treatment is applied to manage the waste flow remaining after diversion of source separated by recyclables and organic materials (STANTEC 2011). The MSW thermal treatment has a number of technologies to extract energy from waste, reducing its volume and making the remaining fraction mainly inert (Kothari et al. 2010). These technologies can be generally grouped into two main categories: conventional and advanced combustion heat treatment. Conventional combustion technologies include incineration and burning mass of fluidized bed incineration, among others. Incineration is the most common type of technology used worldwide. Incineration is a process of waste thermal destruction at high temperatures around 900-1200 °C with time controlled residence, the process is done through a thermal decomposition via oxidation at high temperature, where a plot organic the waste is converted into gas and another portion is converted into a solid (Kothari et al. 2010). This

practice helps reduce the volume, weight and hazardous materials intended for this treatment (Codignole 2013).

The advanced technologies of heat treatment include gasification, pyrolysis and plasma gasification. These technologies tend to be less proven on a commercial scale and involve more complex technological processes (Arena 2012b; Arena 2012a). Gasification is the heating of organic waste (MSW) to produce a fuel gas (syngas), which consists of a mixture of mainly H₂ and CO, along with minor amounts of CH₄, N₂, CO₂ and H₂O. The synthesis gas produced can then be used on site or off site or a second stage of combustion heat or electricity to generate heat; gasifiers are primarily designed to produce useful syngas. The electrical efficiency of synthesis gas in the steam turbine is 15-24%, 20-30%, in gas turbines and combustion in 14-26% engines. There are three main gasification technologies that can be used to treat waste materials, including fixed bed, fluidized bed gasification and high temperature types (STANTEC 2011).

Gasification has been used for over 100 years in the fuels and chemicals production (Bridgwater et al. 2002), but with little success due to the availability of fossil fuels and other forms of power generation, as well as the insufficient technological development. During the Second World War were built around a million gasifiers for use in the civilian sector, the military sector as in all gasoline used. From '80s was renewed worldwide interest in the research, development and construction of gasification facilities for demonstration and commercial application, particularly in the processes of biomass gasification due to the decrease of fossil fuel in the world and the increase in global warming (Bridgwater et al. 2002).

Pyrolysis is a process for thermochemical degradation that occurs when heat is applied to a substance or material, in total absence of oxidant. In this case, pyrolysis is an endothermic process that needs an external source of energy (heat) for its development. This process allows the transformation of waste into three fractions: solid, liquid and gas. The solid fraction consisting mainly of ash and carbon (depending on the temperature employed in the process), which can be used as fuel or for the manufacture of activated carbon by its subsequent activation with CO₂, steam or both. The gaseous fraction is also fuel, consisting of H₂, CO, CO₂, CH₄ and other hydrocarbons. The liquid fraction is composed of a complex mixture of aromatic hydrocarbons and aliphatic oxygenated (Basu 2010). The Table 3 provides a comparison of the different technologies for the thermochemical conversion of MSW energy, some different operating parameters and the observed material characteristics.

ENVIRONMENTAL ADVANTAGES OF USING GASIFICATION AS A TECHNOLOGY FOR THE MSW TREATMENT AND DISPOSAL

The main solid urban waste gasification advantages are: (a) a mass strong reduction of residue (about 70-80%) and volume (about 80-90%) (Arena 2012b); (B) drastic reduction in land use, (it is estimated that a treatment plant waste to energy (WTE) 1 Mt / for nearly 30 years requires less than 100,000 m² of land, to be compared with more than 3,000. 000 m² would be required to discharge 30 million tons of MSW) (Arena 2012b; Galeno et al. 2011), (c) the destruction of organic pollutants, such as halogenated hydrocarbons (Kothari et al. 2010), (d) the concentration and immobilization of inorganic contaminants so they can be used effectively and safely disposed (Galeno et al. 2011), (e) the use of recyclable materials from the waste heat, such as ferrous and non-ferrous metals from ashes and slags (f) reducing emissions of greenhouse gases from anaerobic decomposition of organic waste (Arena 2012b; Kothari et al. 2010); (G) generating renewable energy from solid waste (Arena 2012b; Galeno et al. 2011; EPE-EMPRESA 2008; Rebitanim et al. 2013). For purposes of this analysis, Table 3 shows the operation values and issue reports some stations thermochemical treatment of MSW installed. Different MSW stations treatment via gasification, and analysis of the different publications (Yamada et al. 2004), (Anon n.d.; Anon n.d.; Anon n.d.; Strobino et al. 2012; Anon n.d.; Anon n.d.)(Tanigaki et al. 2012) led to the search for manufacturers,

that helped develop and substantiate such claims, manufacturers, especially from Asia has offered settings for today treatment of municipal solid waste through gasification.

Table 3. Few certified emissions gasification plant waste

Company. Plant location	Nippon Steel Kasuza, Japan	JFE/Thermoselect Nagasaki, Japan	Ebara TwinRec Kawaguchi, Japan	Mitsui R21 Toyohashi, Japan	Energos Averoy, Norway	Plasco En. Ottawa, Canada
Gasifier type	<i>Downdraft</i>	<i>Downdraft</i>	<i>Circulating fluidized bed</i>	<i>Rotary kiln gasifier</i>	<i>Gasifier grate movable</i>	<i>Plasma</i>
Gasifying agent	<i>Oxygen</i>	<i>Oxygen</i>	<i>Air</i>	<i>Air</i>	<i>Air</i>	<i>Air</i>
Temperature °C	900-1200	900-1200	900-1200	<900	<900	>1200
Capacity tons/day	200	300	420	400	100	110
Power production MWe	2.3	8	5.5	8.7	10.2	—
Emissions, mg/m ³ N (11% O ₂)						
Particulate	10.1	<3.4	<1	<0.71	0.24	9.1
HCl	<8.9	8.3	<2	39.9	3.61	2.2
NO _x	22.3	-	29	59.1	42	107
SO _x	<15.6	-	<2.9	18.5	19.8	19
Hg	-	-	<0.005	-	0.0026	0.0001
Dioxins / furans, n-TEQ/m ³	0.032	0.018	0.000051	0.0032	0.0008	0.006

Source: Adaptations of (Arena 2012b) e (Galeno et al. 2011)

Several authors have highlighted the advantages of gasification of municipal solid waste until now (Anon n.d.), the projects in the last decade are operating and can announce it. Emission reduction offers a favorable when compared against the window and incineration, Table 4 presents a comparison of the advantages it can offer the use of gasification versus incineration of municipal solid waste (Schilli 2004; Anon n.d.; Anon n.d.).

Other methodologies allow us to know the advantages of using gasification as an effective treatment for the proper management of solid waste, such as the methodology for life cycle analysis (LCA), the recent example is a study conducted in Mexico City, it was made clear that further significant advantages from the environmental impact is reduced emplace as a means of municipal gasification of solid waste disposal, and therefore, the power generation. The authors report improvements in reducing acidification of the air as it leaves the issue about 4 times the amount of sulfur oxides which is emitted by incineration. Likewise the reduction in eutrophication, since, by means of gasification are sent 10 times less amount of ppm PO₄ respect to incineration. The greenhouse gases, perhaps the most relevant aspect of this study, the authors reported greater reductions, no gas leaks as it occurs in landfills, and when compared to the technology of incineration, gasification avoids more 400% of CO₂ emissions (Lopez Juarez 2010). Since the gasification process takes place in minimal oxygen amounts, the formation of dioxins is less than combustion. Emission of dioxins by this process is 0.2e⁻¹⁰ g/m³produced gas while burning the biogas produced in landfills through torches is 1.8e⁻⁷ g/m³ biogas(Lopez Juarez 2010)(Schilli 2004).

Table 4. Gasification technology versus incineration for MSW treatment

Parameter considered	Gasification technology	Incineration
Feedstock flexibilities	Ability to mix raw materials, such as MSW, industrial waste, commercial and industrial waste, hazardous waste, tires, other biomass (such as wood waste)	MSW and other waste streams common
Main product	Synthesis gas (carbon monoxide and hydrogen)	Ash
Other possible products	Replacement fuel for natural gas and fuel oil. Supply via alternative or combined cycle engines. Power via Fuel Cells (future) Steam process Compounds of fertilizer	Power over Rankin cycle (steam cycle). Process steam
The overall efficiency of the plant	Combined Cycle process: 1 ton of municipal solid waste is capable of creating 1,000 kWh of energy by setting combined cycle (Anon n.d.).	Steam Cycle Process: 1 ton of MSW generates between 500-650 kWh of energy (Anon n.d.).
Emissions	Nitrogen oxide (NOx): <36 ppm Sulfur dioxide (SO ₂) <1.05 ppm Mercury (Hg): <1.4 ug / DSCM ²	Nitrogen oxide (NOx): 110-205 ppm Sulfur dioxide (SO ₂): 26-29 ppm Mercury (Hg): 28-80 mg / DSCM ²
Dioxins and furans	Operating temperature (> 1000 ° C) together with an atmosphere of oxygen deprivation destroys any dioxins / furans which may be present in the feedstock, and eliminates the potential for the creation of dioxins / furans. Syngas rapid cooling by water quench prevents the de novo synthesis of dioxins and furans.	The presence of oxygen, chlorine and particles creates the ideal conditions for the formation of dioxins and furans.
Other waste treatment	Inert, non-hazardous and non-leaching slag glass salable product as a construction aggregate. The majority of the particles recovered during the cleaning of the synthesis gas is recycled.	Ash, volatile and hazardous waste cannot be availed

Source: Adaptations of (Strobino et al. 2012), (Tanigaki et al. 2012), (Arena 2012a)

CONCLUSIONS

The gasification process is an intermediate for the production of a fuel gas which can be used in a wide variety of applications. It is also evident that, although the fuel and chemicals production from MSW gasification is possible, and it is likely that the true goal for the near future. The most prevalent method is the synthesis gas use for energy production is already thermal or electrical.

Brazil has an interesting potential for energy from municipal solid waste, collection reaches almost 80%, which translates to 243 707 ton/day, considering the process efficiency in the literature and manufacturers, the potential energy from MSW gasification is about 180 MW/day.

Gasification could be proposed as a viable alternative for the treatment of municipal solid waste with energy recovery, can be a solution to the problem through the use of land used for landfill, and compared

with the practice of incineration has lower emissions. However, it still faces some technical and economic challenges, mainly related to the highly heterogeneous MSW nature, some little-known experiences of the world using this technology, and costs, which are now high compared to the current incineration technologies.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their recognitions to the Excellence Center in Thermoelectric Generation and Distributed (NEST), the Mechanical Engineering Institute and the Federal University of Itajubá (UNIFEI) mechanical engineering post graduate program.

REFERENCES

- Abrelpe, 2013. Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos, São Paulo.
- Abrelpe, 2011. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2011 Abrelpe, ed., São Paulo: abrelpe. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract> [Accessed May 10, 2013].
- Abrelpe, 2008. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.
- Abrelpe & Plastivida, 2013. Caderno Informativo: Recuperação Energética. , p.24.
- Anon, A review of state-of-the-art for WtE technologies in relation to the study just completed for the Department of Environment & Conservation, Government of Western Australia. Available at: http://www.wasteauthority.wa.gov.au/media/files/documents/WtE_presentation_Dec_2012.pdf [Accessed June 3, 2013a].
- Anon, 2013. ENERGIA OBTIDA A PARTIR DO LIXO. FONTES DE ENERGIA. Available at: <http://fontes-energeticas.blogspot.com.br/p/lixo.html> [Accessed May 15, 2013].
- Anon, Energy-from-Waste Plants | Products | Hitachi Zosen Corporation. Available at: <http://www.hitachizosen.co.jp/english/products/products001.html> [Accessed June 3, 2013b].
- Anon, JFE Steel Corporation - Products and Services. Available at: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/index.html> [Accessed June 3, 2013c].
- Anon, Mitsui Recycling, Pyrolysisgasification & Melting process. Available at: http://www.ieabcc.nl/workshops/Tokyo_Joint_Meeting/02_Mitsui.pdf [Accessed June 3, 2013d].
- Anon, News Releases | 2013 - MITSUI & CO., LTD. Available at: <http://www.mitsui.com/jp/en/release/2013/index.html> [Accessed June 3, 2013e].
- Anon, The Plasco Advantage. Available at: <http://www.plascoenergygroup.com/our-solution/the-plasco-advantage/> [Accessed June 3, 2013f].
- Anon, Waste Treatment: Fluidized bed gasification and melting furnace - Kobelco Eco-Solutions Co.,Ltd. Available at: http://www.kobelco-eco.co.jp/english/product/haikibutushori/ryudo_q3.html [Accessed June 3, 2013g].
- Arena, U., 2012a. Department of Environmental Sciences – Second University of Naples of Wastes WtE processes.
- Arena, U., 2012b. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. Waste management, 32(4), pp.625–39. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22035903> [Accessed August 27, 2013].
- Basu, P., 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis Elsevier, ed., Burlington, MA: Elsevier Inc.
- Basu, P., 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory, Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=2->

G0SaWM80oC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Biomass+Gasification,+Pyrolysis+and+Torrefaction+Practical+Design+and+Theory&ots=8jQD3tlavL&sig=w5O5HdfnC5UnY6x-tRODHJAPQRw [Accessed May 26, 2014].

Bridgwater, a. V., Toft, a. J. & Brammer, J.G., 2002. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032101000107>.

Codignole, F., 2013. Projeto e avaliação técnico-econômica de plantas de gaseificação o lixo urbano para geração distribuída de eletricidade. Universidade Federal de Itajubá. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract> [Accessed May 10, 2013].

Cointreau, S., 2006. Occupational and environmental health issues of solid waste management. Urban papers, p.57.

Edições Câmara ed., 2012. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS 2nd ed., Brasília.

EPE-EMPRESA, D., 2008. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS. Rio de Janeiro: EPE. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Aproveitamento+Energetico+dos+Residuos+Solidos+Urbanos+de+Campo+Grande+,+MS#2> [Accessed May 10, 2013].

FEAM, DPED & GEMUC, 2012. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: GUIA, Belo Horizonte. Available at: <http://www.feam.br/mudancas-climaticas>.

Galeno, G., Minutillo, M. & Perna, a., 2011. From waste to electricity through integrated plasma gasification/fuel cell (IPGFC) system. International Journal of Hydrogen Energy, 36(2), pp.1692–1701. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910022160> [Accessed May 7, 2013].

Giraldo Restrepo, S.Y., 2013. Avaliação de um Sistema de Limpeza integrado a um Conjunto Gaseificador de Biomassa/Célula SOFC. Universidade Federal de Itajubá.

Kothari, R., Tyagi, V. & Pathak, A., 2010. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. Renewable and Sustainable Energy ..., 14(9), pp.3164–3170. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.05.005> [Accessed May 6, 2013].

Lopez Juarez, B.P., 2010. Evaluación de los Impactos Ambientales Generados por la Gasificación y la Incineración como Tratamientos de Gestión de Residuos Sólidos para la Ciudad de México. Instituto tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Rebitanim, N.Z. et al., 2013. Potential applications of wastes from energy generation particularly biochar in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, pp.694–702. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113000075> [Accessed May 13, 2013].

Salomão, A., 2010. Banco Mundial faz estudo sobre o lixo no Brasil. Exame.com. Available at: <http://exame.abril.com.br/blogs/aqui-no-brasil/2010/10/04/banco-mundial-faz-estudo-sobre-o-lixo-no-brasil/> [Accessed May 15, 2013].

Schilli, J.W., 2004. Using Gasification to Process Municipal Solid Waste. HDR Innovations, 12(4).

Shonhiwa, C., 2013. An assessment of biomass residue sustainably available for thermochemical conversion to energy in Zimbabwe, Elsevier Ltd. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953413001050> [Accessed May 13, 2013].

STANTEC, 2011. WASTE TO ENERGY A Technical Review of Municipal, Burnaby, BC.

Strobino, F. et al., 2012. ENERGY RECOVERY FROM MSW TREATMENT BY GASIFICATION AND MELTING TECHNOLOGY. ecos2012.org, pp.1–15. Available at: http://www.ecos2012.org/public/proceedings/pdf/RECS/RECS_ecos2012_393.pdf [Accessed August 21, 2013].

Tanigaki, N., Manako, K. & Osada, M., 2012. Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system. *Waste management (New York, N.Y.)*, 32(4), pp.667–75. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22093706> [Accessed May 30, 2013].

Woolcock, P.J. & Brown, R.C., 2013. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*, 52, pp.54–84. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953413001177>.

Yamada, S., Shimizu, M. & Miyoshi, F., 2004. Thermoselect waste gasification and reforming process. JFE technical report, 3(3), pp.21–26. Available at: http://www.thermoselect.com/news/2004-07_JFE_Technical_Report_Thermoselect_Process.pdf [Accessed May 22, 2013].

IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRORRED DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA EN EL SECTOR AGROPECUARIO A CICLO CERRADO DE PRODUCCIÓN⁵

Luís Manuel Batista Tamayo

batista@cibacav.cu

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Centro de Investigaciones de Bioalimentos (CIBA). Cuba
Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (CUBASOLAR)

RESUMEN.

El Centro de Investigaciones de Bioalimentos en la región Central de Cuba desarrolla un proyecto a ciclo cerrado con la introducción de fuentes renovables de energía que conformen una microrred con el objetivo de convertirlo en un centro de ciencia productiva dedicado fundamentalmente a la elaboración de concentrados nutritivos para porcino, avícola, caprino y ovino. El resultado de las investigaciones son aplicadas en los lotes de animales testigos existentes en el centro y la producción es suministrada como alimento a la población. Con la conformación y puesta en explotación de esta microrred, la factura eléctrica se disminuirá en un 70 % aproximadamente, lo que constituye en primer lugar a un ahorro energético sostenible, al cuidado del medio ambiente y a una mejoría económica de los trabajadores al beneficiarse de las utilidades. El proyecto pretende desarrollarse con la colaboración científico-técnica de Eco-Source Solution Inc. de Canadá y por la parte cubana con la Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (CUBASOLAR) y así lograr la culminación exitosa del mismo. Parte del proyecto está en explotación (biodigestor y cercado eléctrico con fotovoltaica) con resultados satisfactorios.

Palabras claves: *Microrred, energías renovables, producción de alimentos, medio ambiente*

INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigaciones de Bioalimentos (CIBA), es una institución ciencia e innovación tecnológica con más de 20 años de experiencia que dedica sus esfuerzos a la protección del medio ambiente y al desarrollo de sistemas alternativos de producción animal con alto grado de sostenibilidad, apostando en la actualidad por el incremento del uso de fuentes renovables de energía para convertirse en un centro de investigación energéticamente sostenible en un proceso a ciclo cerrado de: producción de alimentos y utilización del forraje en la preparación de concentrados que, una vez probados se recomienda su aplicación al sector productivo estatal y privado, desarrolla proyectos de investigación científica e innovación tecnológica nacionales e internacionales, actividades de interface y transferencia de tecnología con eficiencia y sostenibilidad en la producción agropecuaria tropical, dirigido a la reducción de la contaminación ambiental y protección del medio ambiente con el objetivo de alcanzar

⁵ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

productos, subproductos y materias primas destinados a la alimentación animal a partir de fuentes nacionales, además, comercializa productos y servicios. Ubicado en la región central de Cuba, en la zona norte de la provincia de Ciego de Ávila, carretera a Morón km 1½, con 10 ha de terreno, 3 de ellas ocupadas por naves para gallinas, ovino, caprino, porcino entre ellos el cerdo criollo cubano (negro) y área socio administrativa.

Entre sus líneas de investigación principales se encuentra el empleo de plantas para la producción animal, como alimento animal (nutrientes básicos y aditivos). Sistemas de manejo agropecuario con propuestas de sistemas de producción a ciclo cerrado en la relación: suelo – planta – animal, con el empleo de desechos y subproductos en la alimentación animal, producción de energía (BIOGÁS), alimento y fertilizante. En el centro se han identificado 5 productos líderes: Sistemas integrados de ovinos y caprinos a plantaciones frutales, follajes proteicos para la alimentación de monogástricos y pequeños rumiantes, sistemas de gestión ambiental en el sector empresarial, digestión anaerobia como método de descontaminación ambiental y producción de biogás como fuente energética, aprovechamiento de subproductos y desechos agropecuarios e industriales como alternativa sostenible en la alimentación animal (*Expediente Decreto Ley 323.(2014)*).

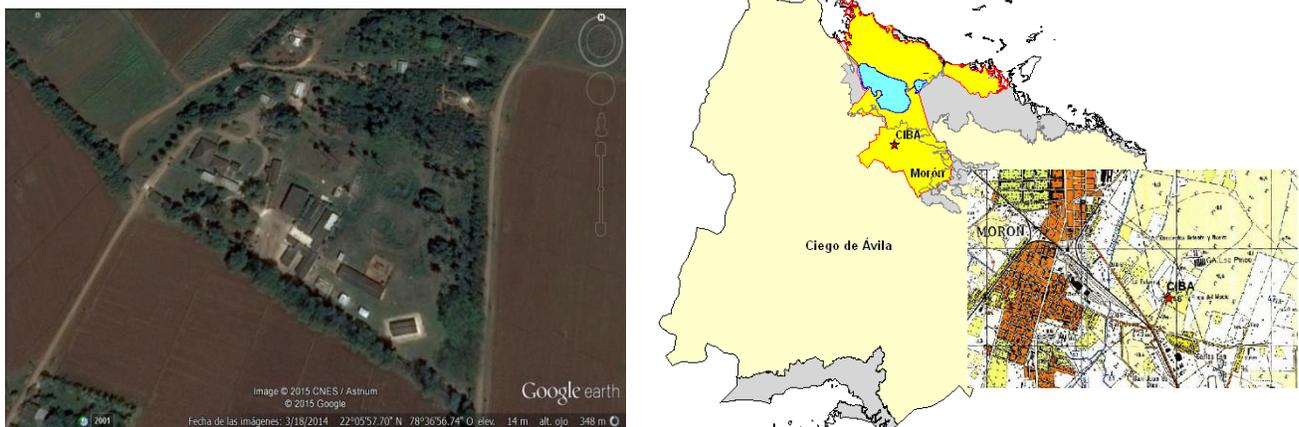


Figura 1. Ubicación del Centro de Investigaciones de Bioalimentos

En el quehacer científico, el CIBA desarrolla en la actualidad 15 proyectos de investigaciones, dos de ellos internacionales, además 4 proyectos que iniciarán en el 2016, incluyendo al presente.

ACCIONES PARA LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

- En plena capacidad de explotación una planta de tratamiento de residuales porcinos por vía de digestión anaerobia. Un biodigestor de cúpula fija de 54 m³ y un biobolsa de 3,7 m³ que reportan una producción actual de 10,7 m³/día que se utiliza para la cocción de alimentos y en los laboratorios, además 0,115 T/día de bio-abono más, la remoción de carga orgánica que es de 70 %
- El lodo residual pos-tratamiento conservado con cepas de *lacto bacillus* puede ser incluido en dietas de cerdos hasta un 20%. El gas producido es utilizado en las áreas de pantry, laboratorios y en la nave porcina.
- Actualmente el consumo eléctrico es de 150 kW/día debido a la utilización de bombeo de agua, para las cochiqueras y áreas de cultivo, preparación de bio-alimentos, trabajos de laboratorios y otros.

- Con la instalación eólica y fotovoltaica que se proyecta, conllevaría a un sensible ahorro de combustible (≈ 3.65 t/año) y disminución de emisiones de CO^2 (≈ 10.22 t/año), lo que implica un ahorro aproximado de 3.8 M USD.
- Cercado con acción eléctrica fotovoltaica en el área de pastoreo de ovinos y caprinos.



Figura 2. Biodigestor y cercado con electrificación fotovoltaica en plena explotación

ACCIONES PROYECTADAS CON OTRAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA

Se elaboró un proyecto con el asesoramiento de Eco-Source Solutions Inc de Canadá, donde se pretende el completamiento de una **microrred con fuentes renovables** con un sistema de bombeo de agua eólico fotovoltaico que garantizará el riego por goteo del área de producción en casas de cultivo tapado y las necesidades de las naves de animales fundamentalmente, suministro que se realiza actualmente con turbinas de alto consumo, un pequeño parque fotovoltaico de 10 kWp y calentadores solares de agua para el área de laboratorios de análisis físico-químico y microbiológicos.

Una vez ejecutado el proyecto se completará el sistema de investigación-producción-comercialización de productos en un ciclo cerrado y con un ahorro de la factura eléctrica de aproximadamente en un 70 %.



Figura 3. Sistema fotovoltaico 10 kWp, bombeo fotovoltaico y molino de viento que se instalarán.

La instalación de casas de cultivo tapado con riego por goteo para la producción de alimentos para el mercado interno y turismo es una de las vertientes del proyecto, la biomasa de los productos seleccionados se utiliza para la elaboración de concentrados una vez realizado el respectivo análisis bromatológico, el que constituirá uno de los elementos más importantes, la producción de alimentos, utilización de la biomasa para piensos destinado a los lotes de porcino, equino y bovino principalmente.



Figura 4. Casa de cultivo tapado a instalar

PLANIFICACIÓN TOTAL DEL PROYECTO NECESARIO DE INVERSIÓN

Para la planificación del proyecto se contó con la participación especializada de suministradores nacionales quienes aportaron la información necesaria acorde a los requerimientos del proyecto y quienes serán los encargados de la instalación y puesta en marcha. En la tabla 1 se expone la planificación general de los medios a adquirir los que se encuentran detallados en el proyecto. (*Ecosol Energía, Corporación Copextel S.A. (2014)*)

Tabla 1. Presupuesto global de medios a adquirir por el proyecto

Renglones	Aporte en USD (MP)	Aporte en CUP (MP)	Total (MP)
Sistema fotovoltaico 10 kWp (con inyección a la red)	40,9	6,2	47,1
Bombeo fotovoltaico (configuración completa, incluyendo tuberías y accesorios para riego por goteo)	10,0	3,0	13,0
Casas para cultivo tapado (3 unidades)	450,0	135,0	585,0
Molino de viento para extracción del agua	3,0	0,9	3,9
Camioneta (4 x 4)	15,0	4,5	19,5
Periodo de recuperación incluido VAN – TIR (6,6 años)			
TOTAL	518,9	149,6	668,5

El proyecto para su ejecución satisfactoria, cuenta con el apoyo logístico de CUBASOLAR para la gestión, tramitación de fondos, recursos financieros y asesoramiento.

REFERENCIAS

EcoSol Energía. Corporación Copextel (2014). Propuesta de sistema fotovoltaico de 10 kWp de conexión a la red. Documento original.

Borroto A. et al (2013). Carpeta de propuestas Tecnológicas. Producción Pecuaria, Base Alimentaria y Gestión de Residuos. CD ISBN 978-959-234-090-9

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2014). Decreto Ley 323 sobre los centros de investigaciones.

Pérez A. (2015). Eco-Source Solutions Inc. Recomendaciones para la implementación de una microrred con energías renovables. www.ecosourcesolutions.com.

Valdés L. et al (2012). Producción de cerdo a ciclo cerrado y gestión integral de residuales en planta de biogás. Libro. ISBN 978-959-287-027-6

MODELO DE EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE BIOMASA COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO PROVENIENTE DEL BAGAZO DE CAÑA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN NICARAGUA⁶

Napoleón Vicente Blanco Orozco, PhD⁷

RESUMEN

Se efectuó una evaluación integral del empleo del recurso energético bagazo de caña y de derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica en Nicaragua empleando un modelo de evaluación que integra de forma sencilla empleando la lógica difusa los elementos de evaluación financiera, económica, social, ambiental y productividad. Se determinó que el empleo del bagazo de caña es integralmente rentable, presenta más beneficios, que el empleo de derivados del petróleo que no es integralmente rentable para la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

Palabras clave: *Bagazo de caña, derivados del petróleo, lógica difusa, evaluación integral.*

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación se centró en proponer un modelo que permite determinar la evaluación financiera, económica, social y ambiental de manera integral del recurso energético renovable biomasa como combustible sólido proveniente del bagazo de caña utilizado en la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

El modelo de evaluación integral del uso de bagazo de caña de azúcar en la generación de energía eléctrica se aplicó con el enfoque de la lógica difusa a través de componentes o subsistemas como elementos del modelo. En el componente de productividad se aplicó el enfoque de análisis de datos envolventes (DEA) con la metodología de los índices de Malmquist, en el componente ambiental se aplicó el enfoque de balance de gases de efecto invernadero (GEI) utilizando las directrices del IPCC; en el componente de la evaluación financiera y económica se aplicó el análisis de flujo financiero y económico respectivamente, y finalmente, en el componente social se aplicó el análisis multicriterio.

Con el modelo de evaluación propuesto, se logran integrar desde una nueva perspectiva teórica las evaluaciones de los proyectos energéticos que en la revisión de literatura se encontró se aplican de manera dispersa. Además, no se encontró un instrumento que las integrara hasta el desarrollo del modelo que en esta tesis doctoral se presenta. Por lo que, el modelo planteado se muestra como un nuevo aporte al conocimiento científico sobre la evaluación del uso del recurso energético bagazo de caña para la producción de energía eléctrica.

⁶ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: MICrorredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

⁷ Docente de la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Electrotecnia y Computación, Nicaragua. blanconapoleon@yahoo.com; napoleon.blanco@usr.uni.edu.ni

La metodología utilizada para construir el modelo de evaluación integral se aplicó con el enfoque de la lógica difusa. Para la elaboración del modelo se utilizó un estudio no experimental, explicativo con orientación paradigmática de la economía ambiental y con enfoque integrado basado en el estudio de casos y la simulación en el proceso de investigación. Como parte de la estrategia metodológica se estudiaron y seleccionaron las metodologías de evaluación económica, social, ambiental, financiera y de productividad del empleo de recursos energéticos renovables y no renovables en proyectos de generación de energía eléctrica para determinar los elementos factibles a ser integrados.

El proceso de selección de metodologías de evaluación se complementó con la herramienta de consulta a expertos. Cada uno de los elementos metodológicos de las evaluaciones seleccionadas y que son componentes del modelo fue aplicado usando el método de estudio de casos en Nicaragua. Luego, se integraron los resultados del proceso de selección de metodologías de evaluación de recursos energéticos renovables y no renovables en un modelo para la evaluación del uso bagazo de caña y de combustibles derivados del petróleo en la generación energía eléctrica. Finalmente, el modelo integral de evaluación fue aplicado usando el método de estudios de casos en Nicaragua.

METODOLOGÍA

Para la elaboración del modelo de evaluación integral se siguió un procedimiento que inició con la revisión bibliográfica a partir de la cual se comprobó que no se disponía de un modelo de evaluación financiera, económica, social y ambiental de forma integral de recursos energéticos. Seguidamente, se procedió a la selección de los elementos metodológicos de cada evaluación para valorar recursos energéticos; la selección de las metodologías también se sustentó en consultas a expertos. Luego, se aplicaron los elementos seleccionados a integrarse en estudios de casos. A continuación los resultados de cada evaluación se expresaron en índices: financieros, económicos, sociales y de productividad que son las entradas al modelo de integración.

Finalmente, utilizando el método inductivo, que es un método científico mediante el cual se obtienen conclusiones generales a partir de premisas particulares, se logró en base a las observaciones de las características de cada evaluación realizada en los estudios de casos, efectuar una derivación inductiva de la dificultad de integrar las metodologías y teorizar una forma de integración usando el conocimiento matemático; lo que condujo a que, se integraran los índices de evaluación a través de la lógica difusa.

Para la evaluación integral del uso de bagazo en la generación de energía eléctrica de los casos de estudio de los ingenios San Antonio y Monte Rosa y del uso de combustible fósil en las plantas: ALBANISA, EMPRESA ENERGETICA CORINTO, TIPITAPA POWER COMPANY, CENSA, GECSA Y GEOSA se empleó un modelo de evaluación que integra las evaluaciones financiera, económica, ambiental, social y de productividad sustentado en un proceso de integración basado en los principios de lógica difusa y que se muestra en la figura que se detalla a continuación.

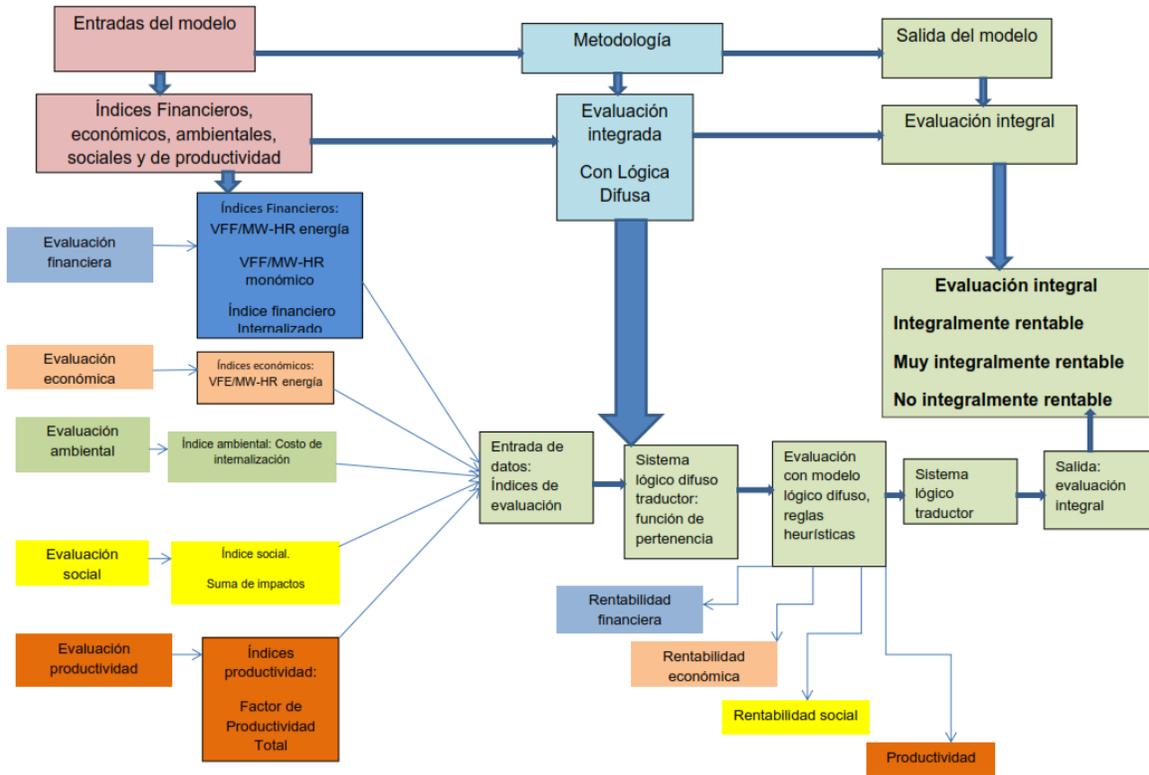


Figura 1. Esquema metodológico del modelo de evaluación integral

Fuente: Elaboración propia

El modelo de evaluación tiene como entradas los resultados de las siguientes evaluaciones: la evaluación financiera, la evaluación económica, la evaluación social, la evaluación ambiental en forma de balance de gases de efecto invernadero y la evaluación de la productividad que se realiza empleando la metodología de datos envolventes (DEA) y los índices de Malmquist de la planta de generación de energía.

Las entradas de datos son procesadas utilizando una lógica de rangos basada en la lógica difusa. Luego, los dictámenes de evaluación son procesados con un algoritmo basado en reglas heurísticas que vincula los criterios de decisión sobre las inversiones y la operación de plantas de generación de energía eléctrica en estudio. Como salida del proceso se tendría una valoración integral del empleo del energético bagazo de caña de azúcar o combustible fósil.

Parte del proceso metodológico de evaluación integral contiene con la definición de criterios de evaluación. Los criterios de evaluación financiero, económico, social, ambiental y productivo se sustentan en la consulta a expertos y en revisión de la bibliografía relacionada. Siguiendo con el proceso metodológico de evaluación integral, las entradas de cada evaluación, expresadas en los índices de evaluación, son transformadas a la lógica difusa usando las funciones de pertenencia descritas en el acápite de perspectiva teórica y evaluadas con los criterios de evaluación definidos y consultados a los expertos. El valor difuso de cada evaluación es categorizado empleando lógica de rangos asociada a los valores de función de pertenencia de cada tipo. Los resultados de cada valoración financiera, económica, ambiental, social y de productividad se integran a través de reglas heurísticas.

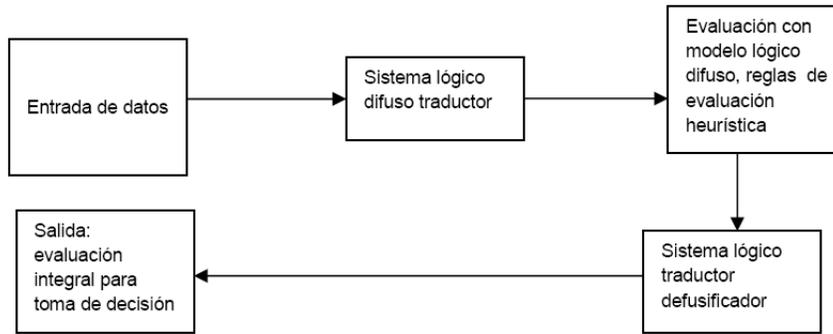


Figura 2. Modelo de aplicación de lógica difusa en la evaluación financiera, económica, social y de productividad

Fuente: elaboración propia en base a Cox 1994

Luego, las reglas heurísticas fueron evaluadas con un modelo lógico de rangos sustentado en la lógica difusa; lo que incluye la definición de funciones de pertenencia y definición de rangos de funciones de pertenencia que fueron consultadas a expertos. A continuación se definieron los predicados de la lógica difusa que contienen los resultados de cada valoración financiera, económica, ambiental, social y de productividad y que se integran a las reglas heurísticas. Posteriormente, se traducen las reglas heurísticas a lógica difusa y se valoran con la lógica de rangos usando los valores de verdad (lógicos) de las funciones de pertenencia.

La transformación de las entradas de cada evaluación financiera, económica, ambiental, social y de productividad expresadas en los índices de evaluación a la lógica difusa se hizo usando los valores lógicos de función de pertenencia. Los índices de cada evaluación financiera, económica, ambiental, social y de productividad se integran con la lógica difusa en un modelo de evaluación integral. Las reglas heurísticas para la evaluación son integradas usando un modelo matemático con operadores de lógica difusa. Las reglas heurísticas, criterios de evaluación, valores lógicos de rangos de funciones de pertenencia y predicados para la evaluación integral de las plantas de generación de energía empleando bagazo de caña y combustibles fósiles fueron definidas y consensuadas por un grupo de expertos consultados, quedando establecidas en la expresión que se presenta a continuación.

MODELO DE EVALUACIÓN INTEGRAL

$$E I_n(x) = P_i FIN_n(x) \wedge P_i ECON_n(x) \wedge P_i SOCIAL_n(x) \wedge P_i PRODUCT_n(x) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde n representa el tipo de evaluación de integralidad (1 representa la condición de integralmente rentable, 2 representa la condición de no integralmente rentable y 3 representa la condición de muy integralmente rentable).

FIN = Evaluación financiera

ECON = Evaluación económica

SOCIAL = Evaluación Social

PRODUCT = Evaluación productividad

\wedge = operador difuso AND

P_i representa el peso asignado por los expertos a cada tipo de evaluación a integrar

La evaluación integral usando las reglas heurística y la lógica difusa produce como resultado un conjunto de valores difuso correspondiente al modelo empleado; estos valores deben ser defusificados para traducirlos a un lenguaje más comprensible para los evaluadores. Para la evaluación final se empleó un proceso de defusificación basado en un rango de valores, muy similar al proceso de asignación de pertenencia con la función sigmoideal, por lo que al final se empleó una tabla de asignación de valores de evaluación integral. La defusificación se basa en las reglas heurísticas asignadas y en un modelo de defusificación (centroide), para simplificar el proceso, asumimos una escala de evaluación de rangos de rentabilidad integral con un punto central de la evaluación que es un punto de inflexión igual a 0.5 en la evaluación de la rentabilidad total.

DATOS

Los datos de entrada al modelo de evaluación son las salidas de las evaluaciones financiera, económica, social, ambiental y de productividad. De la evaluación financiera se empleó el valor futuro financiero (VFF) que se muestra en la tabla 1. De la evaluación económica se empleó el valor futuro económico (VFE) que se muestra en la tabla 2. De la evaluación social se obtuvieron los impactos del empleo e bagazo de caña y de derivados del petróleo: contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad, precio de la energía eléctrica, Impacto en las emisiones de CO₂ y la suma de impactos que se muestra en las tablas 3 y 4.

Tabla 1. Resultados de la evaluación financiera de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña y derivados del petróleo.

#	Planta de generación de energía eléctrica	VFF US \$	Observación
<i>Ingenios que emplean bagazo de caña</i>			
1	Ingenio San Antonio	\$ 150 440 090	Financieramente rentable
2	Ingenio Monte Rosa	\$ 44 786 871	Financieramente rentable
<i>Plantas que emplean derivados del petróleo conectadas al SIN</i>			
1	ALBANISA	\$ -10 129 820	No es rentable financieramente
2	CENSA	\$ -338 351 842	No es rentable financieramente
3	Empresa energética Corinto	\$ -326 053 280,53	No es rentable financieramente
4	Tipitapa Power Company	\$ -315 514 979,29	No es rentable financieramente
5	GEOSA	\$ -302 860 891	No es rentable financieramente
6	GECSA	\$ 156 018 688,35	Rentable financieramente

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Resultados de la evaluación económica de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña y derivados del petróleo.

#	Planta de generación de energía eléctrica	VFE	Observación
<i>Ingenios que emplean bagazo de caña</i>			
1	Ingenio San Antonio	\$ 21 928 609	Economicamente rentable
2	Ingenio Monte Rosa	\$ 40 245 802	Economicamente rentable
<i>Plantas que emplean derivados del petróleo conectadas al SIN</i>			
1	ALBANISA	\$ -76 771	No es rentable economicamente
2	CENSA	\$ -120 746 055	No es rentable economicamente
3	Empresa energética Corinto	\$ -460 349 663	No es rentable economicamente
4	Tipitapa Power Company	\$ -302 759 161	No es rentable economicamente
5	GEOSA	\$ -846 730 464	No es rentable economicamente
6	GECSA	\$ -139 615 915	No es rentable economicamente

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Resultados de la evaluación social económica de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña.

Ingenio	Impacto: Contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad	Impacto: Precio de la energía eléctrica	Impacto: Beneficio al ambiente a través de la influencia en el ahorro de emisiones de CO ₂	Suma de impactos
Ingenio San Antonio	0,10	0,00019	0,049	0,15
Ingenio Monte Rosa	0,17	0,00017	0,04	0,21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Resultados de la evaluación social económica de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean derivados del petróleo.

Planta generadora de energía eléctrica	Impacto: Contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad	Impacto: Precio de la energía eléctrica	Impacto: Beneficio al ambiente a través de la influencia en el ahorro de emisiones de CO ₂	Suma de impactos
ALBANISA	0,71	0,0009	-0,009	0,7
GECSA	0,38	0,0003	-0,008	0,37
CENSA	0,22	0,0005	-0,011	0,21
Empresa energética Corinto	0,35	0,001	-0,024	0,33
Tipitapa Power Company	0,23	0,001	-0,018	0,22
GEOSA	0,48	0,057	-0,023	0,51

Fuente: elaboración propia

De la evaluación de productividad social se obtuvo los promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores de las plantas de generación de energía eléctrica empleando bagazo de caña y combustibles fósiles conectadas al sistema nacional interconectado (SIN) tal y como se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Resultados de la evaluación social económica de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean derivados del petróleo.

Planta generadora de energía eléctrica	Impacto: Contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad	Impacto: Precio de la energía eléctrica	Impacto: Beneficio al ambiente a través de la influencia en el ahorro de emisiones de CO ₂	Suma de impactos
ALBANISA	0,71	0,0009	-0,009	0,7
GECSA	0,38	0,0003	-0,008	0,37
CENSA	0,22	0,0005	-0,011	0,21
Empresa energética Corinto	0,35	0,001	-0,024	0,33
Tipitapa Power Company	0,23	0,001	-0,018	0,22
GEOSA	0,48	0,057	-0,023	0,51

Fuente: elaboración propia

De la evaluación de productividad social se obtuvo los promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores de las plantas de generación de energía eléctrica empleando bagazo de caña y combustibles fósiles conectadas al sistema nacional interconectado (SIN) tal y como se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 6. Promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores, la eficiencia técnica, y la tecnología de los ingenios San Antonio y Monte Rosa, durante el periodo 2002-2012.

Planta de generación	Effch	Techch	Pech	Sech	Tfpch
Ingenio San Antonio	0,94	0,944	0,952	0,988	0,888
Ingenio Monte Rosa	1,168	0,944	1,123	1,039	1,103
Promedio	1,048	0,944	1,034	1,013	0,989

Effch: cambio de la eficiencia técnica, Techch: cambio tecnológico.
Pech: cambio en eficiencia pura, Tfpch: cambio en la productividad total de los factores.

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores, eficiencia técnica y tecnología de las centrales térmicas del SIN que emplean derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica, durante el periodo 2009-2011.

Centrales térmicas de generación eléctrica	Effch	Techch	Pech	Sech	Tfpch
ALBANISA	1,034	0,992	1,000	1,034	1,026
GECSA	1,031	0,988	1,029	1,002	1,019
GESARSA	0,987	0,988	1,000	0,987	0,976
CENSA	0,979	0,989	0,979	1,000	0,969
Empresa energética Corinto	1,000	0,93	1,000	1,000	0,930
Tipanta Power Company	1,012	0,994	1,000	1,012	1,006
GEOSA	0,854	0,95	0,854	1,000	0,811
Promedio	0,984	0,976	0,979	1,005	0,960

Effch: cambio de la eficiencia técnica, Techch: cambio tecnológico.
Pech: cambio en eficiencia pura, Tfpch: cambio en la productividad total de los factores.

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

Los resultados de la evaluación integral corresponden a la salida del modelo de evaluación integral descrito en este artículo y se dividen en una valoración integral del uso de cada energético así como una evaluación de cada componente; es decir una valoración que integra los aspectos financieros, económicos, ambientales, sociales y de productividad y cuyos resultados se resumen en los siguientes tablas 8 y 9.

Tabla 8. Evaluación integral de los ingenios San Antonio y Monte Rosa

Evaluación	Ingenio San Antonio	Ingenio Monte Rosa
Evaluación financiera	Muy rentable	Muy rentable
Evaluación económica	Bastante rentable	Bastante rentable
Evaluación social	Bastante rentable	Muy rentable
Evaluación de productividad	No productivo	Bastante productivo
Valoración integral	Integralmente rentable	Integralmente rentable

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Evaluación integral de las plantas de generación de energía que emplean derivados del petróleo.

Evaluación	ALBANISA	Empresa energética Corinto	Tipanta power company	CENSA	GECSA	GEOSA
Evaluación financiera	No rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Muy rentable	Muy rentable	No rentable
Evaluación económica	No rentable	No rentable	No rentable	No rentable	No rentable	No rentable
Evaluación social	Muy rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Muy rentable
Evaluación de productividad	Bastante productivo	No productivo	Bastante productivo	No productivo	Bastante productivo	No productivo
Valoración integral	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la evaluación integral del uso de bagazo de caña en la generación de energía eléctrica se encontró que es una actividad muy rentable desde el punto de vista financiero lo que significa que desde la perspectiva de la iniciativa privada de negocio es muy atractiva esta actividad. Así mismo, se obtuvo que desde el punto de vista de la evaluación económica, esto es, el costo de oportunidad de la economía Nicaragüense, esta actividad es bastante rentable lo que denota los beneficios económicos del uso de este recurso energético renovable para la sociedad en general y no para un grupo específico de ella.

Además, desde el punto de vista del impacto social del uso de bagazo en la generación de energía eléctrica y de forma más precisa desde el impacto de la contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad, impacto en precio de la energía eléctrica e impacto en las emisiones de CO₂ fue valorado como bastante rentable para el caso del ingenio San Antonio y muy rentable para el ingenio Monte Rosa lo que indica que la contribución social de este último ingenio impacta en mayor beneficio a la sociedad Nicaragüense. Desde el punto de vista de la productividad total de los factores de producción empleados en la generación de energía eléctrica usando bagazo de caña el ingenio Monte Rosa presenta un ritmo promedio de crecimiento de productividad, al contrario, el ingenio San Antonio no muestra crecimiento en su productividad y por tanto es calificado como no productivo.

Por otra parte, la evaluación integral del empleo de derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica detalla cómo no rentable a todas las plantas térmicas consideradas en este estudio. No obstante, la mayoría de estas plantas son consideradas como bastante rentables y muy rentables desde el punto de vista financiero, es decir son un buen negocio, lo que confirma la disponibilidad de inversión privada en este tipo de centrales. Sin embargo, estas plantas térmicas no son rentables para la economía nacional por lo que su empleo no justifica la disposición de recursos públicos en este tipo de plantas.

Por otra parte, desde el punto de vista social las plantas que emplean de derivados del petróleo para generar energía fueron valoradas en su mayoría como bastante rentables debido principalmente al impacto en el acceso al bien energía eléctrica que ellas proporcionan. En el mismo sentido, la evaluación del promedio de crecimiento de productividad total de sus factores algunas de ellas muestran un crecimiento que las clasifica como bastante productivas, pero la mitad de ellas fueron evaluadas como no productivas lo que significa que el empleo del recurso energético no renovable y la gestión del proceso de generación de energía eléctrica en el 50% de las plantas térmicas estudiadas es ineficiente.

CONCLUSIONES

El modelo de evaluación integral utilizado en este artículo se sustenta empleando una lógica de rangos basado en la herramienta matemática de la lógica difusa que logra integrar los elementos de evaluación financiera, económica, social y ambiental empleados para valorar el recurso energético renovable bagazo de caña con respecto a los recursos energéticos no renovables derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

Así mismo, en este artículo se detalló el proceso de construcción del modelo de evaluación integral y se explicó cuáles fueron los datos de entrada y salida que se debe suministrar al modelo; así como la forma de emplearlo. Así mismo, se detalló la metodología de integración basada en la lógica difusa y la evaluación integral de salida del modelo. Cabe señalar aquí que, en el proceso de integración de las evaluaciones en el modelo, el establecimiento de los límites o rangos de evaluación de rentabilidad financiera, económica, social y de productividad, las reglas heurísticas generales de evaluación y la modelización de la lógica difusa fueron consultados expertos usando la metodología DELPHI.

Por otra parte, como resultado de la evaluación integral del uso de bagazo de caña en la generación de energía eléctrica se obtuvo que es integralmente rentable. Por el contrario, todas las plantas térmicas consideradas en este estudio resultan no ser integralmente rentables.

En suma, el empleo del bagazo de caña es integralmente rentable y presenta más beneficios que el empleo de derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

REFERENCIAS

- Andrade, r., González, e., & Caballero, e. (2011). Un sistema lógico para el razonamiento y la toma de decisiones: la lógica difusa compensatoria basada en la media geométrica. *Revista investigación operacional*, 32 (3), 230-245. Obtenido desde: <http://rev-inv-ope.univ-paris1.fr/files/32311/32311-04.pdf>
- Arango, M., Serna, C., y Ortega G. (2012). La gestión de indicadores empresariales con lógica difusa para la toma de decisiones. *Lámpsakos*, 8, 47 – 53. Obtenido desde: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4490568>
- Aziz R. (2013). *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer Heidelberg New York Dordrecht, London. ISBN 978-3-642-34894-5
- Baca, G. (2006). *Evaluación de Proyectos*. 4a Edición. México. Mc Graw Hill. 392p.
- Blank, L., y Tarquín, A. (2004). *Ingeniería económica*. 5ta edición. México. Mac Graw Hill. 749p.
- Blank, L., y Tarquín, A. (2004). *Ingeniería económica*. 5ta edición. México. Mac Graw Hill. 749p.
- Blanco, N y Zúniga, C. (2013). A New Case of Bio Economy in Nicaragua. *Journal of Agricultural Studies*, ISSN 2166-0379. 2013, Vol. 1, No. 1. Macrothink Institute. doi:10.5296/jas.v1i1.3352. URL:<http://dx.doi.org/10.5296/jas.v1i1.3352>
- Cox, E. (1994). *The Fuzzy System Hand Book*. Academy Press. Washington. USA. 622p
- Cejas, J. (2011). La lógica difusa compensatoria. *Ingeniería Industrial*, 23(2), II/No. 157-161.
- Cohen, E., y Martínez, R. (2004). *Manual de formulación, evaluación y monitoreo de proyectos sociales*. Obtenido desde: http://www.eclac.org/search/?q=Manual+de+formulacion%2Cevaluacion+y+monitoreo+de+proyectos+sociales&btnG=Buscar+en+la+CEPAL&client=UN_Website_English&site=un_org-ECLAC&output=xml_no_dtd&lr=lang_es&base=%2Ftpl%2Ftop-bottom.xslt&idioma=ES&ie=UTF-8&sort=date%3AD%3AL%3Ad1&entqr=3

- Coelli, T. (2008). A guide to DEAP versión 2.1: a data Envelopment Analysis computer program. CEPA Working Paper, 96. Obtenido desde: <http://www.uq.edu.au/economics/cepa/deap.php>
- Dubois, D., y Prade, H. (1985). A review of fuzzy set aggregation connectives. *Information Sciences*, 36, 85-121.
- Espín, R., y Vanti, A. 2005. Administración lógica: un estudio de caso en una empresa de comercio exterior. *BASE – Revista de Administração e Contabilidade da Unisinos*, 2(2), 69-77.
- Farrel, M.J. (1957). The Measurement of productivity. *Journal of the Royal Society, A CXX*, 253-290. Obtenido desde: <http://www.lib.ctgu.edu.cn:8080/wxcd/qw/285.pdf>
- Fountaine, E. (1999). *Evaluación Social de Proyectos*. 12a Edición. Chile. Alfa Omega. 470p.
- González, E., y Espín, R. (2010). Solución de juegos cooperativos n-personales basada en lógica difusa compensatoria. *Investigación operacional*, 31(1), 45-60.
- Mallo, P., Artola, M., Zanfrillo, M., Morettini, M., Galante, M., Pascual, M., Y Busetto, A. (2010). Una propuesta de selección de entidades aseguradoras a partir de un modelo de lógica compensatoria difusa. *Cuadernos del CIMBAGE*, 12, 85 – 111.
- Morillas Raya, A. 2006. *Introducción al análisis de datos difusos*. Edición electrónica. Texto completo en: www.eumed.net/libros/2006b/amr/
- Mendoca, L., Sousa, JMC., Kaymak, U., y Sá da Costa, MG. (2006). Weighting goals and constraints in fuzzy predictive control. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 17, 517–532.
- Osorio, J. (2011). QFD difuso para la toma de decisiones multicriterio – Ejemplo de aplicación. *Prospectiva*, 9(2). 22-29.
- Rosales, R. (2001). *Evaluación de proyectos*. ICAP. San José Costa Rica.
- Zadeh, L. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 178 (13), 2751-2779.
- Zimmermann, H. (2001). *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, 4th ed., Boston, Kluwer Academic Publishers, 2001, ISBN 978079

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MICRORRED INTELIGENTE CON LA UTILIZACIÓN DE MULTI-TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS RENOVABLES⁸

Antonio Valdés Delgado ⁽¹⁾, Enrique Siu Luy ⁽²⁾, Raulien Torres Fernández ⁽³⁾,
Anaely Saunders Vázquez ⁽⁴⁾, Jesús Suarez Hernández ⁽⁵⁾, Luis Cepero ⁽⁶⁾

(1); (2) CUBAENERGIA. avaldes@cubaenergia.cu ; esiu@cubaenergia.cu
(3); (4) CUBAENERGIA. rtf@cubaenergia.cu ; anaely@cubaenergia.cu
(5); (6) Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey" (EPPF Indio Hatuey). jesus.suarez@ihatuey.cu ; cepero@ihatuey.cu

RESUMEN

Una microrred es una red inteligente que posibilita distribuir la energía eléctrica desde los generadores a los consumidores, mediante sistemas automatizados, lo que posibilita operar en forma independiente, disminuir consumo de energía, reducir costos, realizar un uso eficiente y racional de la energía, y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, posibilitando una mayor fiabilidad del sistema de generación de electricidad distribuida.

Se desarrollará un sistema de MICRORRED INTELIGENTE como demostración de la utilización de multi-tecnologías energéticas renovables para lugares aislados o en circuitos cerrados, el proyecto diseñará, e implementará la microrred en la Estación Experimental Pastos y Forrajes "Indio Hatuey (EPPF).

La EPPF cuenta en este momento con una serie de instalaciones para la producción tanto de energía eléctrica como térmica a partir de fuentes renovables y se analiza también futuras posibilidades de introducir otras fuentes renovables tal como la energía solar fotovoltaica.

El diseño, implementación y operación de la primera microrred inteligente en el país posibilitará servir como polígono de ensayos/pruebas para valorar todas las ventajas, dificultades y complejidades que surjan durante su implementación, así como analizar las condiciones objetivas necesarias para su generalización en el país.

Palabras clave: *Energía, microrred, electricidad, biodiesel, biogás*

INTRODUCCIÓN

Una microrred se conforma básicamente a partir de sistemas híbridos, con una configuración que considera varias fuentes de Energías Renovables, y otra convencional, con almacenamiento para lugares aislados con sistemas de control y regulación.

⁸ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

La principal característica es una red inteligente que posibilita distribuir la Energía Eléctrica desde los generadores a los consumidores, mediante sistemas automatizados lo que posibilita operar en forma independiente (*Dobakhshari, 2011*), disminuir consumo de energía, reducir costos, al poder introducir en los momentos de mayor consumo las unidades de menor costo de generación en forma secuencial, y posibilitando una mayor fiabilidad del sistema de generación de electricidad distribuida, al estar más cerca del punto de consumo, igualmente las unidades de generación no renovables solo entrarán en los momentos específicos y en tiempo real (*Hamidi, 2010*).

Siendo bidireccional el flujo de energía, una red inteligente envía electricidad desde los generadores a los consumidores usando una tecnología digital para controlar las necesidades del consumidor, ayudando a: ahorrar energía, reducir costos, realizar un uso eficiente y racional de la energía, y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (*Ghadir, 2010; Beidou, 2010*).

El aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) (*Guerrero, 2010*) se presenta como una necesidad impostergable para el desarrollo sostenible de los países y como una solución prioritaria ante la creciente demanda mundial de energía eléctrica, el aumento de los precios del petróleo y otros combustibles fósiles, la disminución de sus reservas naturales y la amenaza ecológica que representa el esquema energético global actual de rebasar los límites de la capacidad del planeta para asimilar los impactos ambientales que ocasiona (*MINEM, 2013*).

Es un elemento estratégico para el desarrollo económico del país, su uso permite además una generación distribuida de la energía eléctrica, lo que posibilita la disminución de las pérdidas de energía por transmisión. En Cuba es de interés el uso de las FRE. Debido a los impactos sociales, económicos, y medio ambientales que se derivan de su implementación, estas han sido utilizadas desde el pasado milenio para satisfacer necesidades energéticas en comunidades aisladas, y se continúa su utilización para lograr satisfacer las necesidades de energía a las poblaciones que habitan en sitios aislados. En la generación de electricidad distribuida, al estar más cerca del punto de consumo, se reducen las pérdidas de transmisión y las necesidades de capacidad de transmisión.

Se propone el desarrollo de un sistema de MICRORRED INTELIGENTE como demostración de la utilización de multi - tecnologías energéticas renovables para lugares aislados o para circuitos cerrados, el proyecto diseñara e implementara la microrred en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey" (EPPF Indio Hatuey), lo que propiciará la generación de electricidad distribuida, reduciéndose las pérdidas de transmisión y las necesidades de capacidad de transmisión.

ESTUDIO DEL CASO

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRORRED INTELIGENTE

El proyecto tiene como objetivo el estudio, diseño, implementación y operación de una Microrred inteligente empleando energía eléctrica a partir de la utilización de múltiples energías renovables existentes y en estudio en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey" (EPPF Indio Hatuey).

Esta es una instalación perteneciente al Ministerio de Educación Superior (MES) de Cuba, enclavada en la provincia de Matanzas, y su actividad fundamental es realizar investigaciones principalmente en temas vinculados con la Agricultura y la Energía, y también participa en la formación profesional de especialistas nacionales e internacionales.

La misión del centro es contribuir al desarrollo local sostenible, a través de modelos agroecológicos que integren la producción de alimentos y de energía, dirigido a fomentar el desarrollo socioeconómico y el cuidado del medio ambiente y el bienestar humano con equidad de género.

El centro cuenta con edificaciones para laboratorios, administración, mantenimiento, cocción de alimentos, alojamiento, áreas productivas – ganado vacuno y porcino- y con áreas agrícolas sembradas de plantas oleaginosas y de alimentos.

El proyecto propone realizar las siguientes acciones:

- Determinación de las potencias eléctricas instaladas en las diferentes áreas de la institución en estudio.
- Determinación de los consumos de energía eléctrica de las diferentes áreas de la institución en correspondencia a las horas de su utilización, en y fuera de la jornada laboral.
- Identificación de la energía factible a generar en correspondencia con las FRE existentes y posibles a implementar.
- Diseño del sistema de control y distribución de la energía que se genere y su demanda.
- Diseño de sistema inteligente en línea, para el suministro de la energía más económica, según las demandas que se presenten.

Es de señalar que además se estudiarán las necesidades de energía térmica y las posibilidades de satisfacer esta demanda a partir de las fuentes de energía renovables existentes y proyectadas para la EEPF Indio Hatuey.

Se tomarán en cuenta las experiencias alcanzadas por el desarrollo y operación de la microrred existente en el Instituto Politécnico de Braganza, Portugal (*Leite, 2012*).

CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DE ELECTRICIDAD EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL

Los equipamientos, sistemas de iluminación y acondicionamiento de aire existentes en las edificaciones que componen la EEPF Indio Hatuey se alimentan de energía eléctrica a partir de dos bancos de transformadores exclusivos, que sirven al conjunto de las cargas instaladas.

El consumo de electricidad de los dos bancos de transformadores se registra en los días laborables (de lunes a viernes) y en el horario de 8 AM a 5 PM, justificado por la actividad propia que realiza la estación como centro de investigación.

El Banco **de Transformadores I**, con una capacidad de 100 kVA y demanda contratada de 75 kW, brinda servicio a las cargas de 8 edificaciones representando una potencia de 407 kW. (En la Gráfico y Tabla No. 1 se muestra un diagrama donde se detallan cada una de las edificaciones).

Analizando la facturación del año 2014, como promedio mensual, se consumen 14,6 MWh al mes, y su máximo consumo facturado es de 22,5 MWh registrado en el mes de mayo 2014. El consumo promedio mensual se distribuye por horarios en la siguiente proporción: en el horario Madrugada el 22,9%, en el Día el 64,8% y en el Pico el 12,3% (Gráfico No.1)

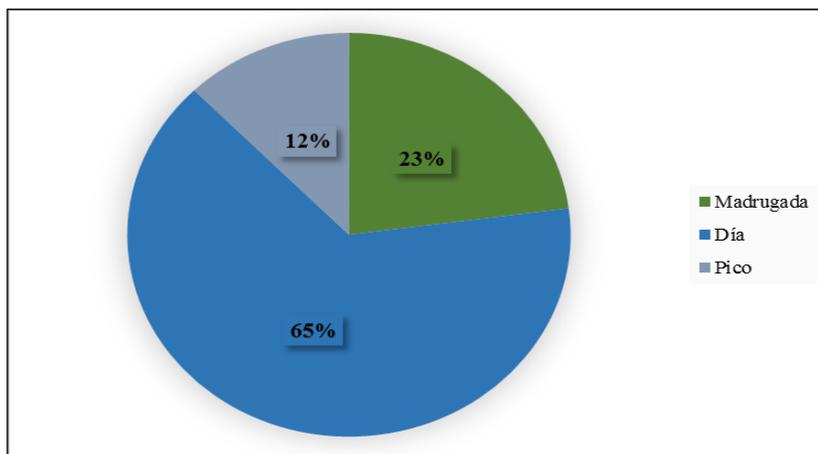


Gráfico 1: Consumo promedio del Banco de Transformadores I

La demanda máxima registrada en el horario laborable como promedio es de 62 kW, aunque han sobrepasado el valor contratado con registros de 86 kW en los meses de julio y agosto del 2014. En el horario pico de 6 PM a 10 PM se registran valores de demanda de 37 kW promedio mensual, aunque hay registros máximos en dicho horario de 49 kW.

De acuerdo con los consumos en las edificaciones correspondientes al banco de transformadores I, se relaciona a continuación el consumo mensual estimado a partir de sus cargas eléctricas típicas y de las horas en que funcionan (Tabla No. 1)

Tabla 1. Consumos de electricidad en las edificaciones correspondientes al Banco de Transformadores I

Cargas eléctricas típicas	Consumo mensual kWh	Peso porcentual %
Equipos acondicionamiento aire	4092	27,5
Equipos de Laboratorio	2843	19,1
Máquinas Herramientas	2476	16,7
Medios de cómputo	1525	10,3
Equipos para la preparación de alimentos	1290	8,7
Equipos para refrigeración	1265	8,5
Sistemas de Iluminación	897	6,0
Bombas agua	335	2,3
Electrodomésticos (radios, televisores, etc)	111	0,7
Otros equipos eléctricos	35	0,2
Total general	14868	100,0

El **Banco de Transformadores II**, con una capacidad de 75 kVA y demanda contratada de 55 kW, brinda servicio a las cargas de 11 edificaciones, representando una potencia de 186 kW (Ver Gráfico y Tabla No. 2).

Por la facturación del año 2014, como promedio mensual se consumen 9,2 MWh al mes, y su máximo consumo facturado es de 13,6 MWh registrado en el mes de junio 2014. El consumo promedio mensual se distribuye por horarios en la siguiente proporción: en el horario Madrugada el 27,4%, en el Día el 61,5% y en el Pico el 11,1% (Gráfico No. 2).

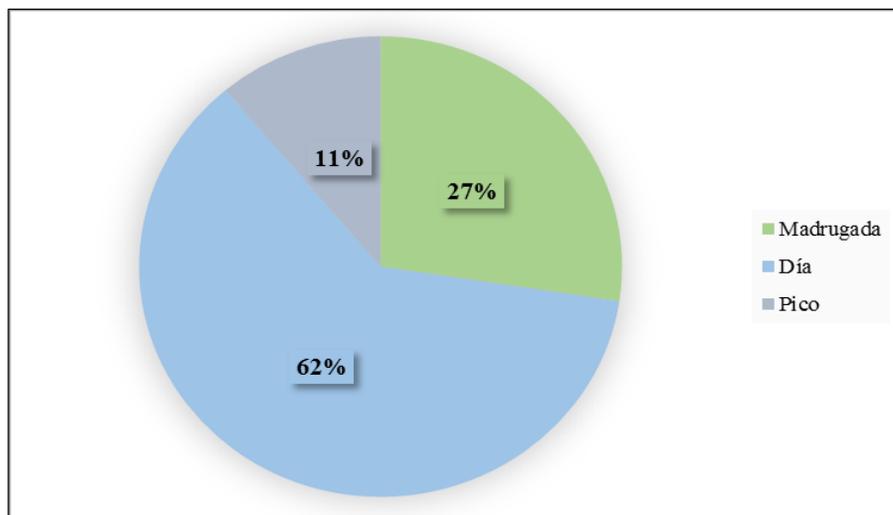


Gráfico 2. Consumo promedio del Banco de Transformadores II

La demanda máxima registrada en el horario laborable es de 39 kW promedio mensual, aunque hay un registro de 54 kW (junio 2014). En el horario pico se registran valores de demanda de 22 kW promedio mensual, y máximos en dicho horario de 34 kW. En la tabla siguiente se muestra el consumo estimado de las cargas típicas en este servicio eléctrico o banco de transformadores.

Tabla 2. Consumos de electricidad en las edificaciones correspondientes a banco de transformadores II

Cargas eléctricas típicas	Consumo mensual kWh	Peso Porcentual %
Equipos acondicionamiento aire	5695	60,2
Medios de cómputo	1131	12,0
Equipos de Laboratorio	1111	11,7
Sistemas de Iluminación	446	4,7
Electrodomésticos (radios, televisores, etc)	386	4,1
Equipos para refrigeración	288	3,0
Bombas agua	265	2,8
Equipos para la preparación de alimentos	51	0,5
Máquinas Herramientas	50	0,5
Otros	20	0,2
Cerca eléctrica	14	0,1
Total general	9455	100,0

Consumo de la Vaquería. No tiene medición eléctrica y su consumo se factura por un cálculo estimado acordado con la Empresa Eléctrica equivalente a un valor fijo mensual de 1,0 MWh/mes.

LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍAS EXISTENTES Y FACTIBLES DE IMPLEMENTAR EN LA EEPF INDIO HATUEY

La EEPF Indio Hatuey cuenta en estos momentos con una serie de instalaciones para la producción tanto de energía eléctrica como térmica a partir de fuentes renovables, y se analiza también futuras posibilidades de introducir otras fuentes renovables, tal como la energía solar fotovoltaica.

A continuación se describen instalaciones existentes que serían la base de suministro de energía para satisfacer necesidades de la estación, a través de la conformación de la microrred inteligente:

- **Producción de biogás en un biodigestor a partir del empleo de la materia orgánica del ganado porcino:** Existe un biodigestor instalado en la producción porcina, el biogás que se produce se emplea en dos refrigeradores domésticos, que utilizan como energía primaria este gas directamente (no usa electricidad), y en la cocción de alimento porcino.
- **Gasificación de Biomasa Forestal:** Existe un gasificador que emplea biomasa forestal como combustible y presenta acoplado un generador de energía eléctrica.
- **Producción de Biodiesel:** Disponen de plantaciones de *Jatropha Curca*, -planta oleaginosa que presenta alrededor de un 38 % de aceite en sus semillas-, además cuentan con una instalación para la producción de biodiesel mediante el proceso de transesterificación. El biodiesel producido se puede emplear en la generación de electricidad, el transporte automotor (Valdés A, 2015) y/o equipos agrícolas.
- En relación a futuras fuentes renovables de energía en proyección, factibles de utilizar para la generación de electricidad se indican las siguientes (Cepero L, 2014):
- **Producción de biogás en biodigestor a partir de empleo de la materia orgánica del ganado vacuno:** Se proyecta un biodigestor para la producción de biogás en la vaquería existente.
- **Energía Solar Fotovoltaica:** Se estudia la posibilidad de instalar esta fuente en áreas de terreno disponible para la producción de electricidad.
Es de señalar que en la EEPF Indio Hatuey se cuenta además con:
- **Molinos a Viento:** Existen tres equipos, estando dos en operación para extraer agua de pozos para riego.
- **Calentadores solares:** Se cuenta con un total de 27 equipos instalados, los cuales se usan para dar servicio de agua caliente en el aseo de los trabajadores, de los huéspedes del hotel y para la cocción de alimentos y fregado en el restaurante y dos comedores existentes.

RESULTADOS ESPERADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA MICRORRED.

Con la articulación de la Microrred de energía eléctrica en la referida Estación Experimental se esperan obtener los siguientes resultados:

- Incidir en alcanzar la autosuficiencia energética de la institución mediante la utilización de sus recursos propios, cubriendo sus necesidades de electricidad.
- Establecer una mayor integración entre los recursos locales disponibles y las fuentes renovables de energía.
- Enviar electricidad a los consumidores, disminuyéndose las pérdidas por transmisión de la electricidad al ser una generación distribuida, así como se disminuirán las emisiones de gases de efecto invernadero.
- No utilizar energía de la red pública, pues mediante su generación propia permitirá realizar un uso más eficiente y racional de la energía, incidiendo en la reduciendo de los costos de la energía.
- Servir como polígono de ensayos/pruebas que permitirá valorar todas las posibilidades, ventajas, problemas y complejidades que surjan durante la implementación de la microrred, así como analizar las condiciones objetivas necesarias para la generalización de las microrredes en el país.
- Convertirse en una plataforma de capacitación para especialistas y directivos, que en la práctica constatarán los beneficios de la aplicación de este tipo de generación distribuida, a nivel local y nacional.

- Posibilitar el diseño propio, atemperado a las condiciones reales que existen en el país, de sistemas de comunicación, transmisión y adquisición de datos y del control y automatización del sistema.
- Posibilitar la base material de estudios para investigaciones futuras sobre diferentes sistemas de almacenamiento de energía, como es el caso del transporte eléctrico. (Leite, 2014)

CONCLUSIONES

Se desarrollará un sistema de MICRORRED INTELIGENTE como demostración de la utilización de multi-tecnologías energéticas renovables para lugares aislados o para circuitos cerrados, por lo que el proyecto diseñará, e implementará una microrred inteligente en la Estación Experimental para Pastos y Forrajes "Indio Hatuey".

El diseño, implementación y operación de la primera microrred inteligente en el país posibilitará servir como polígono de ensayos/pruebas para valorar todas las ventajas, dificultades y complejidades que surjan durante su implementación, así como analizar las condiciones objetivas necesarias para la generalización de microrredes en el país.

Se dispondrá de una plataforma de capacitación para especialistas y directivos, que en la práctica constatarán los beneficios de la aplicación de este tipo de generación distribuida, a nivel local y nacional.

REFERENCIAS

Beidou F., Bagman et al. (2010) Smart grid Challenges research directions IEEE International Symposium on Power Electronics for distribution generation systems. p 670.

Cepero L. (2014) "Programa de actividades para el fomento de fuentes renovables de energía Indio Hatuey". Informe interno

Dobakhshari A. Salehi Azizi S. y Ranjbar A.M. (2011) "Control of Microgrids: Aspects and Prospects". International Conference on Networking Sensing and Control p.38

Ghadir R. (2010) "Survey on smart grid Proceedings of IEEE". Southeast Con p 210

Guerrero J. M., Blaabjerg, Zhelev T., Hemmes, K. Monmasson E., Jemei S., Comech M. P. Granadino, R. Frau J. I. (2010) "Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm", IEEE Industrial Electronics Magazine, vol.4, no.1, pp.52-64, March

Hamidi V, Senior K Smith y Wilson R. (2010) "Smart Grid Technology Review within the Transmission and Distribution Sector Innovative Smart Grid Technologies". Conference Europe IEEE PES p.1

Leite V., L..., Batista J. and Rodrigues O. (2012) "Live Park of Renewable Energies Polytechnic Institute of Bragança International Conference on Renewable Energies and Power Quality". Santiago de Compostela. España. Marzo

Leite V., Ferreira A. and Batista J. (2014) "Improving the Storage Capability of a Microgrid with a Vehicle-to-Grid Interface Polytechnic Institute of Braganza, Portugal". II Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables. Soria. España.

MINEM (2013) Convocatoria presentación proyectos Programa I+D+i "Desarrollo Sostenible Fuentes Renovables de energía". La Habana. Cuba

Valdes A. (2015) "Biomásas para producir alimentos, energía y bioproductos". Ier Encuentro entre instituciones de investigación Italia - América Latina y el Caribe en el sector agroalimentario y forestal". Roma, Italia. Septiembre

ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA ALIMETAR EL BOMBEO DE UNA RED DE DISTRITO⁹

Luis A. Bujedo Nieto⁽¹⁾, Jesús Samaniego Muñoz⁽²⁾, Fernando Frechoso Escudero⁽³⁾, Roberto Carazo Álvarez⁽⁴⁾, Eloy Fraile⁽⁵⁾, M^a del Rosario Heras Celemín⁽⁶⁾, José Antonio Ferrer Tevar⁽⁷⁾, Silvia Soutuyo Castro⁽⁸⁾, José Sánchez Sánchez⁽⁹⁾, Alberto Sánchez Patrocinio⁽¹⁰⁾, José Batanero⁽¹¹⁾, Carmen Navarro⁽¹²⁾ y Humberto Cerón Sánchez⁽¹³⁾

(1); (2); (3) CARTIF. luibuj@cartif.es; jessam@cartif.es; ferfre@cartif.es

(4) INGENIERIA IDEAS TX, r.carazo@ingenieriatx.es

(5) INZAMAC, eloyfraile@inzamac.es

(6); (7); (8) CIEMAT. mrosario.heras@ciemat.es; ja.ferrer@ciemat.es;
silvia.soutullo@ciemat.es

(9); (10) USAL. jss@usal.es; aspatrocinio@usal.es

(11); (12) ICCA. jbatanero@iccaweb.com; cnavarro@iccaweb.com

(13) COFELY, Humberto.Ceron@cofely-gdfsuez.com

RESUMEN

En este artículo se aborda el estudio del comportamiento dinámico bajo entrono TRNSYS de una instalación fotovoltaica para cubrir la demanda de bombeo de una red de distrito térmica, bajo diferentes perfiles de diseño (autoconsumo y aislada). Se pretende determinar la viabilidad energética de incluir en este tipo de instalaciones una pequeña microrred con la que abastecer los consumos eléctricos de las mismas y dotarlas de una autosuficiencia energética no solo desde el punto de vista térmico sino también desde el eléctrico.

Palabras clave: Red de distrito, fotovoltaica, autoconsumo, almacenamiento eléctrico, TRNSYS.

INTRODUCCIÓN

A la hora de abordar el estudio energético de una red de distrito de calor, generalmente se aborda desde el punto de vista térmico de la instalación. Y cualquier medida de mejora energética planteada en diseño está encaminada hacia el ahorro energético en este aspecto.

Actualmente existe una clara tendencia hacia el diseño más sostenible y eficiente de estas redes de calor, y la introducción de energías renovables en sus planteamientos, principalmente hacia el uso de calderas de biomasa como elementos generadores o la integración de instalaciones solares térmicas como apoyo para determinados servicios.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta el uso de sistemas de bombeo para garantizar que el fluido de trabajo llegue correctamente a cada uno de los puntos de consumo conectados a la red de calor. Además estas bombas de circulación deben estar en funcionamiento continuo y aunque suelen disponer

⁹ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

de control de velocidad que permite regular el caudal en función de las necesidades de demanda lo que reduce su consumo, existe un importante consumo eléctrico. Generalmente el tamaño de estas bombas de distribución se hace teniendo en cuenta el caudal máximo de diseño y las pérdidas de presión.

Es por ello, que desde este trabajo se plantea el estudio dinámico de una instalación fotovoltaica que pretende cubrir las necesidades eléctricas de una red de calor, considerando diferentes planteamientos de diseño y operación, con el objetivo de analizar la viabilidad de una independencia energética de este tipo de instalaciones.

DESCRIPCIÓN DE LA RED Y MODELADO EN TRNSYS

La red de calor considerada ha sido la planificada dentro del proyecto SMARTZA, estando establecida su ubicación en Zamora (España). Dicha red está definida tal como se muestra en el esquema mostrado en la figura 1, y consta de 6 puntos de demanda, que incluyen 3 pabellones deportivos cubiertos, uno de ellos con piscina climatizada, la casa del deporte de Zamora, un centro de piragüismo y un edificio de oficinas para la administración de las actividades deportivas. El pabellón que contiene la piscina climatizada dispone de una instalación solar térmica. Además, sobre la cubierta de la sala de la central térmica, se pretende instalar una instalación solar fotovoltaica para hacer frente a la demanda eléctrica de la instalación, cuyo dimensionado y análisis de su comportamiento es el objeto de este artículo.

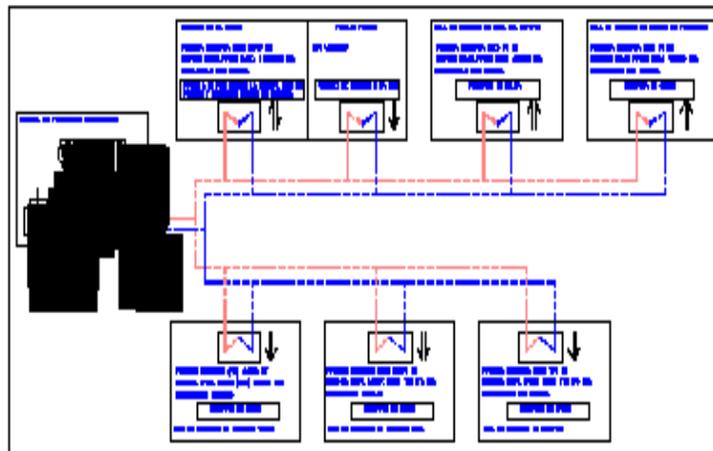


Figura 1. Esquema de principio de la red de distrito SMARTZA.

En base al esquema mostrado en la figura 1, se ha realizado un modelo en TRNSYS el cual se muestra en la figura 2, y que permite:

- Evaluar las pérdidas y rendimiento del sistema.
- Mostrar los resultados de simulación del comportamiento de la red de distrito
- Realizar un análisis de las diferentes opciones de almacenamiento posibles.
- Para ello se ha configurado el modelo en diferentes subsistemas que interactúan de manera dinámica entre ellos.
- Datos climáticos
- Generación y almacenamiento
 - Central de producción
 - Instalación solar térmica de piscina

- Instalación solar fotovoltaica
- Distribución de conductos
- Demanda de calor de la red a través de sus perfiles horarios de demanda de las instalaciones.

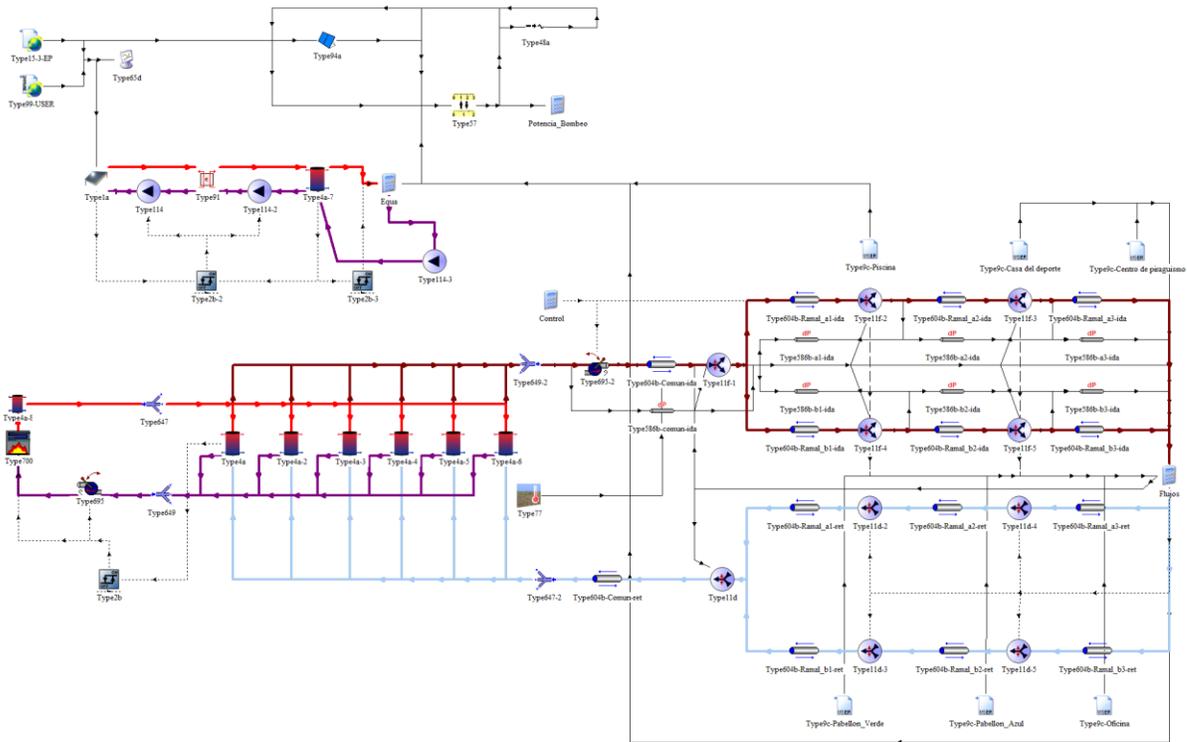


Figura 2. Modelo TRNSYS de la red de Distrito

La principal ventaja que presenta la simulación dinámica en entorno TRNSYS como herramienta de cálculo y diseño, es que permite la interacción entre los diferentes elementos que modela, siendo posible evaluar los efectos transitorios así como los almacenamientos energéticos dependiendo de los niveles de acoplamiento entre ellos.

MODELO DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

Para la alimentación de la demanda eléctrica del bombeo de la instalación, se ha decidido el dimensionado de una instalación fotovoltaica, cuyo modelo en TRNSYS se muestra en la figura 3.

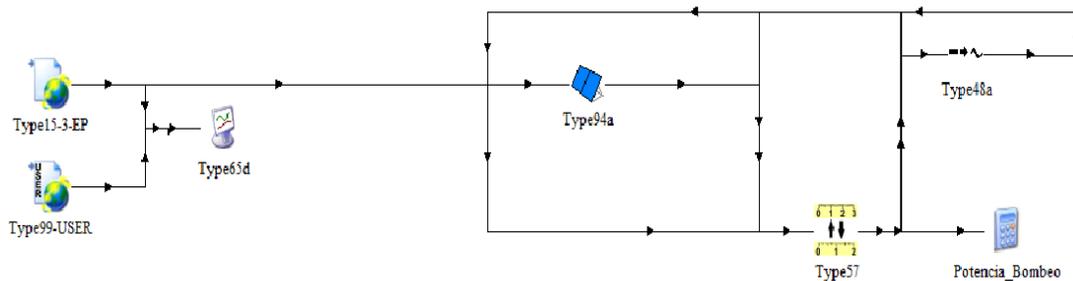


Figura 3. Esquema TRNSYS de la instalación FV.

Con el fin de facilitar su dimensionado, se ha considerado también una instalación con la superficie y potencia fotovoltaica concentrada en un único elemento y un inversor. Los elementos considerados son:

- **Type 15:** Datos climáticos de Energy Plus.
- **Type 94:** Modelo de panel fotovoltaico. Se han tomado valores estándar para los parámetros del modelo, de forma que el valor sea lo más típico posible.
- **Type 48:** Modelo de inversor, en el que también se han tomado valores de rendimientos típicos.

Finalmente en un elemento calculador se incluyen tanto la producción de la instalación fotovoltaica como la demanda de bombeo de la red de distrito, con el fin de poder plantear diferentes estrategias de interacción entre ambas tales como autoconsumo, con o sin balance neto o bien la opción de almacenamiento. Este último caso, se considera desde un punto de vista energético, abstrayendo la tecnología a aplicar, la cual es muy dependiente del precio.

La instalación se ha supuesto que está orientada hacia el sur y con una inclinación de 40°.

DATOS CLIMÁTICOS

Una parte fundamental en los entornos de simulación dinámica son las condiciones meteorológicas. En ellas se indican entre otros datos la temperatura ambiente, la radiación, la velocidad del viento, etc.

En definitiva se indican el punto de partida contra el que las instalaciones van a tener que interactuar, tanto a nivel de demanda de calor, como a nivel de disponibilidad solar.

En el modelo desarrollado, se han considerado dos posibles bases de datos climáticas. Por un lado, datos para Zamora procedentes de Energy Plus® (<http://apps1.eere.energy.gov>) y por otro, datos procedentes del proyecto INNPACTO (IPT-120000-2010-22) DEPOLIGEN en el que se obtuvo un fichero de datos climáticos para Zamora.

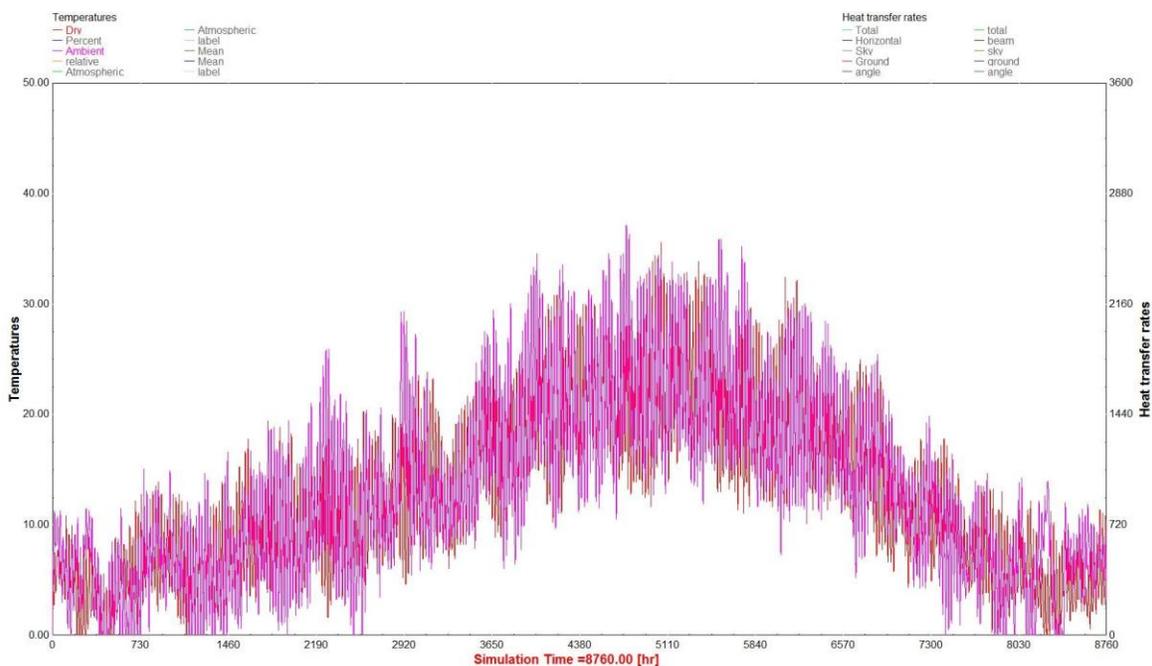


Figura 4. Comparación de temperaturas

En Figura 4 se comparan los valores de temperatura de ambos y en la Figura 5 los valores de radiación.

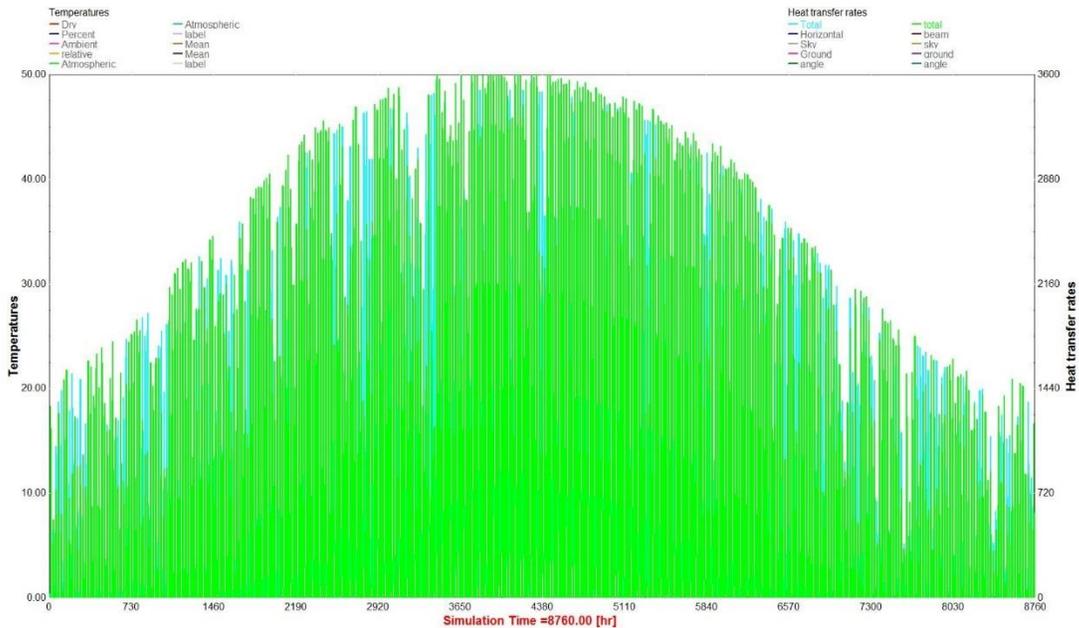


Figura 5. Comparación de radiación global [kJ/h-m2].

Como se puede ver, son valores muy semejantes, por lo que se ha decidido emplear los valores procedentes de Energy Plus.

En la Tabla 1 se muestran los valores de temperatura media, máxima y mínima mensuales siendo los valores extremos 35,6°C de máxima y -3,9°C de mínima.

Tabla 1. Temperaturas notables mensuales [° C]

Temperaturas	Media	Máxima	Mínima
Enero	4,31	12,80	-3,90
Febrero	6,29	13,90	-1,10
Marzo	8,26	18,90	0,00
Abril	10,45	20,60	1,70
Mayo	14,0,	23,90	4,40
Junio	18,45	31,10	8,3
Julio	21,75	35,60	11,70
Agosto	21,30	33,90	11,10
Septiembre	18,65	32,80	10,60
Octubre	13,42	25,00	4,40
Noviembre	8,06	17,80	-1,10
Diciembre	4,85	12,20	-0,60

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS

Con el fin de poder evaluar de manera fiable la demanda eléctrica de las bombas, y con ello el tamaño de la instalación fotovoltaica, se ha establecido el cálculo de la pérdida de carga que se produce en la instalación. Para ello se han considerado los modelos hidráulicos para cada uno de los tramos de tubería y se ha determinado los valores que se tienen en cada caso, en función de cada una de las demandas que en cada momento estén activas. Se han multiplicado por 2 para considerar tanto el tramo de ida como el de vuelta, suponiendo que no hay grandes diferencias entre ambos trazados.

A partir de los valores obtenidos se ha realizado una estimación de los diámetros de las tuberías en los diferentes tramos, calculando además las pérdidas de carga. Los resultados se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Dimensionado de la red de tuberías.

Origen	Final	Caudal [kg/h]	Veloc. [m/s]	Diám. [m]	Pérdida [mca/m]	Long [m]	total [mca]
Central	Deriv1	50.434	1,73	0,14	0,0181	130	2,353
Deriv1	Piscina	21.823	1,8	0,09	0,0444	9	0,400
Piscina	Casa deporte	6.874	1	0,05	0,014	120	1,68
Casa deporte	Centro Piragüismo	4.554	0,9	0,04	0,02	40	0,800
Deriv1	Pabellón verde	28.611	1,6	0,11	0,0278	100	2,780
Pabellón verde	Pabellón azul	21.480	1,1	0,08	0,012	110	1,320
Pabellón azul	Oficinas	15.465	1,2	0,065	0,019	70	1,330
							7,783

La pérdida de carga total, se ha determinado como la suma de la parte común, junto con el mayor de los dos ramales.

DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FV Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

De manera previa al dimensionado de la instalación fotovoltaica, el cual estará condicionado por el tipo de estrategia generación-demanda adoptada, se ha realizado una valoración de la producción por 1 kWp de instalación, suponiendo un "performance ratio" medio del 78 % y cuya evolución temporal se puede ver en la Figura 6.

Respecto a la producción anual, hay que indicar que los módulos fotovoltaicos producen 1.746 kWh/kWp año, de los que se pueden llegar a aprovechar 1.362 kWh/kWp año.

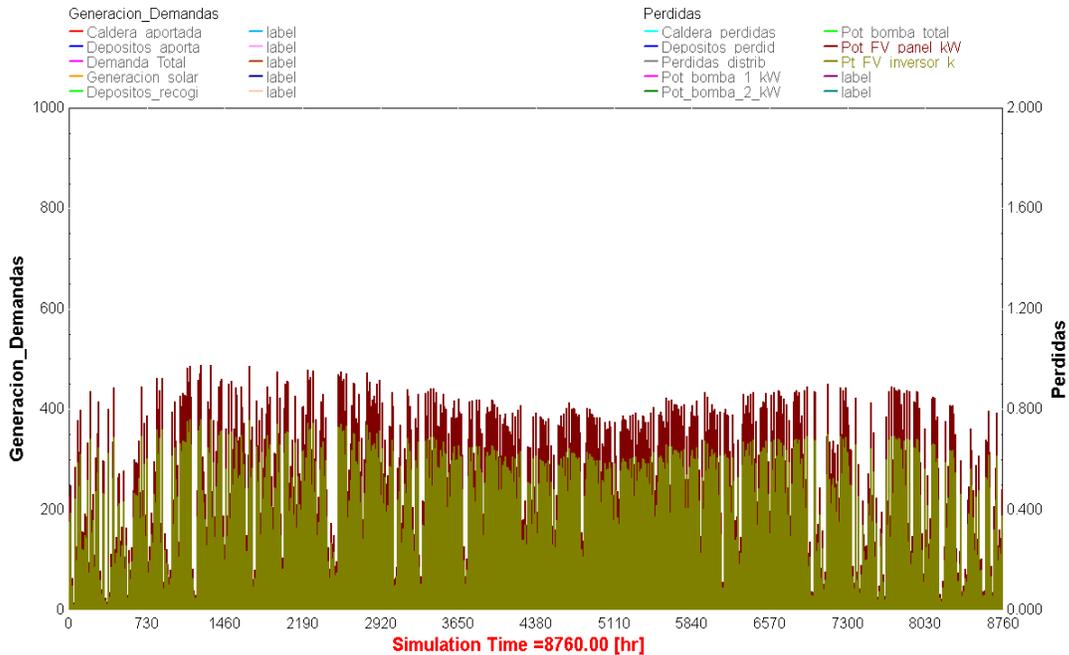


Figura 6. Potencia fotovoltaica de referencia (1kWp)

Para el cálculo del consumo de las bombas, se supone un horario de demanda de 24 horas, 365 días al año. Las pérdidas de carga, calculadas anteriormente, son de 8 mca para las dos bombas. Se ha supuesto que el conjunto motor eléctrico-bomba, tiene un rendimiento del 60 %.

En estas condiciones, en la tabla 4 se muestran los resultados de la simulación.

Tabla 4. Potencias y energía de bombeo

	Potencia [kW]	Energía anual [kWh/año]
Bomba primario	0,796	5.219
Bomba secundario	1,519	13.085
Total	2,314	18.550

Para estimar el tamaño de la instalación fotovoltaica, se consideran tres posibles escenarios:

- Autoconsumo con balance neto (inyección a red de excedentes)
- Autoconsumo sin balance neto.
- Instalación aislada de red (almacenamiento).

AUTOCONSUMO CON BALANCE NETO

En este tipo de esquema, el punto de interconexión de la instalación fotovoltaica, está aguas debajo del de suministro de la compañía. En este caso, la compañía eléctrica permite verter los excedentes de producción de la fotovoltaica, siendo recuperados estos en el momento en el que no hay producción suficiente. Este esquema es conceptualmente como una instalación con almacenamiento, en el que la propia red cumple esta función y no hay pérdidas energéticas.

Para el cálculo de la instalación el criterio es puramente energético, obteniendo de manera directa que la potencia de la instalación fotovoltaica debería ser:

$$P_{ABN} = \frac{18.554 \text{ kWh/año}}{1.362 \text{ kWh/kW}_p \cdot \text{año}} = 13 \text{ kW}_p$$

En estas condiciones, la instalación produciría 17.706 kWh, cubriendo el 95 % de la demanda.

AUTOCONSUMO SIN BALANCE NETO

En este esquema de funcionamiento, la instalación también se conecta aguas abajo del punto de suministro de la compañía, pero a diferencia del caso anterior, la energía excedentaria se pierde, bien porque se coloca un limitador de potencia de producción, o bien porque se "regala" a la compañía eléctrica.

En este caso, el criterio de dimensionado debe ser que en las mejores condiciones de producción fotovoltaica, no se supere la demanda mínima en potencia de la instalación.

- La demanda mínima que se produce en la instalación se corresponde con 1,519 kW ya que no se da el caso de que la bomba de primario esté en marcha con la bomba del secundario detenida.
- La instalación fotovoltaica de 1 kW_p, da una potencia máxima de 0,76 kW (el 20 de febrero).
- La instalación debería ser de 2 kW_p de potencia, lo que arrojaría 2.724 kWh, que cubriría un 15 % de la demanda.

INSTALACIÓN AISLADA DE RED

En este caso, la instalación no dispone de la ayuda de la red, por lo que tiene que ser capaz de producir toda la demanda y compensar las pérdidas del almacenamiento elegido.

Aunque el mundo de las baterías está sufriendo una auténtica revolución en cuanto a tecnologías disponibles, con el fin de tener un cálculo conservativo se va a realizar el dimensionado con baterías de plomo-ácido, de forma que cualquier otra opción que se considere, dará resultados menos exigentes.

Se supone que la batería tiene un rendimiento del 90 %. Por otro lado, la demanda máxima de la potencia es de 2,314 kW que es un valor despreciable frente a la potencia que previsiblemente tenga la instalación. Se ha establecido autonomía para una semana (168 h) sin radiación solar. Considerando que la potencia es 2,314 kW, la energía que debería almacenar el sistema es de 388,75 kWh.

En estas condiciones, para cubrir la demanda total, se necesitarían:

$$388,75 \text{ kWh}/0,9 = 431,94 \text{ kWh}$$

La potencia de la instalación seguiría siendo la potencia de la instalación en el caso de balance neto de 13 kW, con un almacenamiento de 431,94 kWh.

CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el cálculo del consumo eléctrico de las bombas del sistema district heating diseñado dentro del proyecto SMARTZA, y partiendo de esta información se ha abordado el dimensionado y estudio energético de una instalación fotovoltaica con el objetivo de cubrir dicho consumo energético mediante un sistema fotovoltaico. Dicho estudio se ha abordado bajo diferentes perfiles, sistema de autoconsumo con balance neto, sistema aislado sin balance neto y sistema aislado sin balance neto pero con sistema de almacenamiento en baterías. El segundo sistema se ha demostrado factible como apoyo a la reducción del consumo del sistema, pero inviable para garantizar cubrir la demanda completa. Por el contrario los otros dos planteamientos permiten cubrir la demanda completa, aunque debido al sistema de almacenamiento, la rentabilidad del sistema con almacenamiento con baterías penaliza mucho su rentabilidad económica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto SMARTZA (IPT-2012-1173-120000), que es un proyecto científico-tecnológico perteneciente al plan INNPACTO 2012, cofinanciado con Fondos FEDER y subvencionado por el MINECO de España.

ARQUITECTURA DE UNA RED INTELIGENTE RURAL¹⁰

Francesc Girbau Llistuella¹, Andreas Sumper¹, Francisco Díaz González¹, Antoni Sudrià Andreu¹,
Fernando Castro Cervera², Ramon Gallart Fernández³

1. Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos (CITCEA-UPC), Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de Catalunya. EU d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, C. Comte d'Urgell, 187, Pl. 1, 08036 Barcelona, España. francesc.girbau@citcea.upc.edu, sumper@citcea.upc.edu, francisco.diaz-gonzalez@citcea.upc.edu, sudria@citcea.upc.edu.
2. ZIV Communications, c/Antonio Machado, 78, ed. Australia, 08840-Viladecans, España
3. Estabanell Energia, responsable de Xarxes Intel·ligents, c/ Rec, 28 - 08401 Granollers, España.

RESUMEN

El trabajo presentado se enmarca en el proyecto europeo del programa FP-7 Smart Rural Grid que tiene como objetivo desarrollar la red rural inteligente y explorar las mejores maneras de hacer la transición de las actuales redes de distribución en zonas rurales a las nuevas redes inteligentes utilizando las nuevas tecnologías y conceptos de negocio asociados. El proyecto reconsidera la arquitectura de la red de distribución rural actual, acomodando telecomunicaciones, tecnologías de control, almacenamiento y otros sistemas y dispositivos para renovar las estructuras existentes y -probar el nuevo concepto desarrollado, basado en incrementar entre otros, la resiliencia de la red dando lugar a una nueva estructura de red pseudomallada.

INTRODUCCIÓN

La electricidad se caracteriza por ser un producto que debe ser generado, transmitido y consumido en el mismo momento, asimismo también puede ser almacenado, sin embargo el precio y la eficiencia de los sistemas de acumulación los hacen poco habituales. Desde principios de siglo XX la estructura de la red eléctrica se ha caracterizado por los grandes puntos de generación que transforman energía primaria en electricidad; los sistemas de transporte que transportan grandes cantidades de energía salvando largas distancias; los sistemas de subtransporte que interconectan las redes de distribución con la red de transporte; y finalmente los sistemas de distribución que distribuyen la electricidad a los consumidores. En función del tipo de consumidor las redes de distribución son primarias o secundarias, la distribución primaria da cobertura a los consumidores industriales y también a la distribución secundaria, y la distribución secundaria da cobertura a consumidores residenciales, comerciales y pequeños consumidores industriales.

¹⁰ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

Desde sus inicios el consumo eléctrico ha experimentado un crecimiento sostenido, convirtiéndose en un producto de primera necesidad. Además, los consumidores exigen más calidad, forzando a los legisladores a dictar leyes sobre la continuidad y calidad de suministro. Por otro lado, numerosos nuevos retos tales como la integración de los recursos energéticos renovables y distribuidos, el compromiso con la reducción de las emisiones de carbono, las nuevas tecnologías de la información y comunicación (como los contadores inteligentes), están obligando a evolucionar las redes tradicionales hacia las redes inteligentes o *Smartgrids* en inglés. Por lo tanto, una red inteligente integra tecnologías de comunicación, información, control y monitorización permitiendo la interacción de los elementos que la componen y la transferencia de información en tiempo real. Todo ello para aumentar la calidad de suministro y la fiabilidad, mejorar la eficiencia del sistema y la sostenibilidad ambiental, y crear nuevos servicios y oportunidades de negocio.

El proyecto europeo FP-7 Smart Rural Grid [SmartRuralGrid, 2014] que se inició a principios de 2014 tiene como objetivo desarrollar una red rural inteligente explorando nuevas formas para evolucionar la red convencional de distribución a microrredes de distribución inteligentes con nuevos conceptos de negocio asociados. El proyecto rediseña la arquitectura de la red rural en una red rural inteligente formada por varias microrredes, integrando telecomunicaciones y tecnologías de la información, de monitorización y de control. Además se presentarán los enrutadores de potencia para mejorar la calidad de suministro y su fiabilidad, los cuales gestionan diferentes recursos energéticos distribuidos. Todo ello gestionado localmente a través de un controlador central y supervisado remotamente por el operador de la red inteligente. El proyecto está formado por un consorcio de siete socios; Estabanell y Pahisa Energía, CITCEA-UPC, ZIV Communications, Xarxa Oberta de Comunicació i Tecnologia de Catalunya, KISTERS, Stadtwerke Rosenheim Netze, CG Power Systems Ireland y Smart Innovation Østfold. Dentro del proyecto, CITCEA-UPC está desarrollando el módulo de gestión energética de las microrredes y los enrutadores de potencia que serán instalados en la red rural de distribución de Estabanell y Pahisa Energía en Vallfogona del Ripollès, Catalunya. Por lo tanto los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Desarrollar y probar la tecnología de los Intelligent Distribution Power Router (IDPR) en la red piloto.
- Desarrollar y probar una nueva tecnología PLC para redes de distribución rurales.
- Desarrollar una red de comunicaciones robusta para la red piloto.
- Desarrollar los agentes de gestión de la red piloto.
- Integrar todas estas novedades en una misma red piloto.
- Demostrar y validar el funcionamiento del sistema a gran escala, en particular en dos regiones europeas (España y Alemania) para evaluar la viabilidad tecnológica y económica de esta nueva plataforma.

El objetivo del artículo es mostrar la arquitectura propuesta para la red rural inteligente. El artículo presenta y define el sistema o red actual, así como las actuaciones que se llevarán a cabo para transformar la red de distribución en una red inteligente de distribución. Complementariamente, describe el nuevo enrutador desarrollado y sus funcionalidades. Finalmente, el artículo muestra la arquitectura de la red inteligente y de las comunicaciones.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA

La red piloto es donde se integran las diferentes soluciones del proyecto Smart Rural Grid. Ésta es propiedad de EyPESA que es una compañía distribuidora en Cataluña que cuenta con más de la mitad de sus clientes en un entorno rural. Para ellos, se considera una apuesta importante la conversión de su red a una red inteligente en pos de la modernización de la misma [Estabanell Enegia, 2015].

La red de prueba piloto donde se van a probar estas nuevas tecnologías, es el tramo final de una red de distribución de 5 kV, ubicada en un área rural de baja densidad de población, en una zona de montaña boscosa con difícil acceso y localización de fallos. En concreto, ésta da cobertura a 22 clientes repartidos entre cuatro subestaciones secundarias o centros de transformación. Cabe destacar que la mayoría de éstos está concentrados en la primera subestación. La red piloto es de tipo radial, en una zona con unas condiciones climáticas generalmente adversas, es únicamente gestionable de forma manual a través de seccionadores y seccionadores-interruptores, y la seguridad en la operación es a través elementos de protección pasivos tales como rupto-fusibles y fusibles. Además, las telecomunicaciones en la zona son muy limitadas o nulas.



Figura 1. Red piloto y sus subestaciones secundarias [Google, 2015]

ACTUACIONES EN EL SISTEMA

Llevar a cabo la transformación de la red de distribución normal a una red inteligente se fundamenta en las siguientes premisas, en primer lugar se espera que la presencia recursos energéticos distribuidos (*Distributed Energy Resources* (DER), en inglés), en los próximos años aumente, principalmente por una reducción sensible del coste de las tecnologías asociadas (por ejemplo, el caso de los paneles fotovoltaicos); y en un esperable incremento del coste de la energía. En segundo lugar, la disponibilidad mayor de recursos energéticos en las zonas rurales, que en las zonas urbanas. Finalmente, porqué en las zonas rurales existe un gran potencial de mejora en términos de eficiencia, sobre todo en la continuidad del suministro. Por esas razones, se cree conveniente llevar a cabo diferentes acciones para transformar la red de distribución rural en una red inteligente de distribución rural, que integré eficazmente nuevos recursos energéticos distribuidos y proporcione una mayor calidad del suministro a los consumidores. En definitiva, el proyecto adopta las siguientes actuaciones:

- Incrementar el número de recursos distribuidos. Esta primera actuación consiste en incentivar y promover la aparición de los nuevos recursos energéticos distribuidos, los cuales permitirán

reducir la dependencia de los clientes de los recursos exteriores. Paralelamente, se integrará una nueva tecnología de enrutadores de potencia con el fin de favorecer una eficaz integración de los DERs de los consumidores, asegurar la estabilidad de la red y posibilitar que la red piloto trabaje junto con la red externa o bien de forma independiente.

- Integrar tecnologías de la información y control. Esta actuación consiste en transformar la red tradicional estática, en una red inteligente de distribución flexible. Para ello, la estrategia adoptada es la de integrar unidades de medida y sensores en las diferentes subestaciones y substituir los elementos pasivos protección de baja tensión por los interruptores de potencia automatizados y controlados de forma remota. Además de automatizar los elementos de maniobra de media tensión, los cuales son hoy todavía manuales.
- Desplegar una red de telecomunicaciones con el objetivo de garantizar la integración y la gestión eficiente de los nuevos recursos energéticos distribuidos, la gestión de los elementos maniobra y conocer el estado de la red piloto.

En la Figura 2 se presenta un esquema de la red piloto final. En primer lugar se puede notar que solo en dos de los cuatro centros de transformación se instalarán sistemas almacenamiento, en inglés *Battery Energy Storage System (BESS)*, ya que las dos restantes instalaciones son en poste, como se puede apreciar en la Figura 1. Los sistemas de almacenamiento son fundamentales para el funcionamiento y estabilidad de la microrred, ya que equilibrarán la generación y la demanda durante el funcionamiento isla. Estos sistemas de almacenamiento estarán controlados unos nuevos enrutadores de potencia, los cuales son desarrollados principalmente por el centro tecnológico CITCEA-UPC, y que adoptarán el nombre anglosajón *Intelligent Distribution Power Routers (IDPRs)*. También se integrará un generador de soporte diésel de emergencia con el fin de apoyar la operación en isla en caso de no disponer de recursos de almacenamiento y/o de generación. También destacar que los equipos de medida y elementos de maniobra serán gestionados en cada subestación a través de un *Remote Terminal Unit (RTU)*. Dichos RTU estarán interconectados con el sistema LEMS, un pc industrial, un sistema SCADA en el centro de control y el sistema de gestión GEMS, interconectado gracias a dispositivos de telecomunicaciones. Finalmente destacar que se instalará un *Uninterrupted Power Supply (UPS)* para asegurar la continuidad de suministro a la red de telecomunicaciones, a los sistemas de control, de medida, y a los de maniobra, bajo cualquier eventualidad.

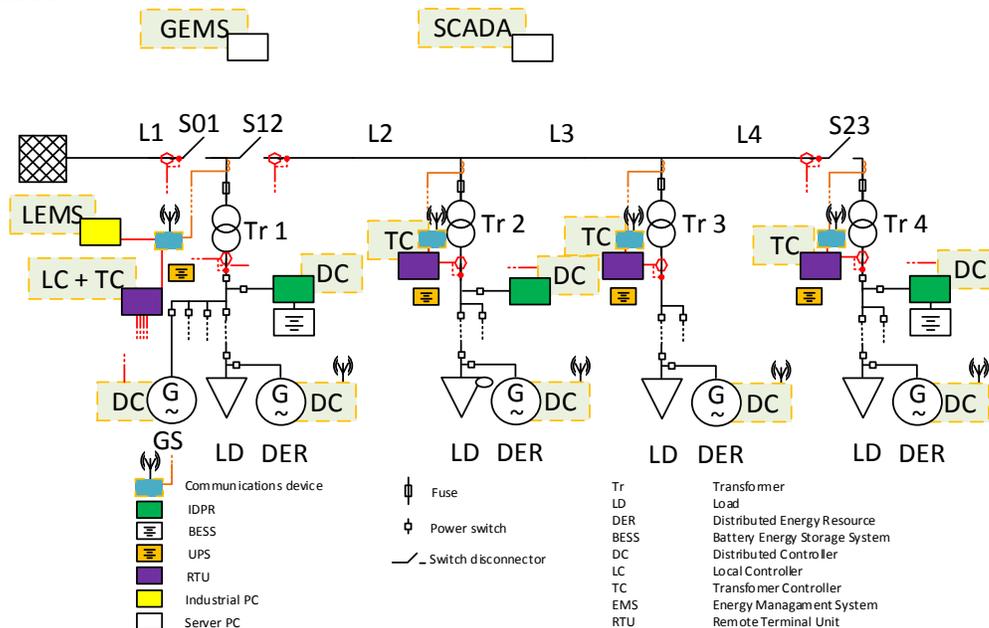


Figura 2. Esquema de la red piloto final

LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS Y EL IDPR

Los recursos energéticos distribuidos o generación distribuida, o *Disturbed Energy Resources* (DER) en inglés, son pilares fundamentales para la microrred. Esta generación distribuida se puede clasificar según si es renovable, según el coste de generación, o según si es programable, entre otros criterios. Un aspecto importante de la generación distribuida es la interacción del generador con la red. Es decir, si es a través de una máquina eléctrica rotatoria o bien a través de la electrónica de potencia, siendo la interacción a través de la electrónica de potencia una opción más atractiva para la microrred, por su flexibilidad de control [DNV GL Energy, 2014].

En este proyecto un elemento clave para la integración de los recursos energéticos y que contribuye a la conversión de la red de distribución, es el enrutador de potencia o *Power Router* (IDPR) en inglés. El enrutador de potencia es un dispositivo que permite controlar los flujos de energía en la red, además de gestionar la información adicional como el emisor, el destinatario, el coste, la huella de carbono, etc. Éste es uno de los últimos avances en microrredes ya que facilita la integración de la generación distribuida y de los sistemas de almacenamiento, y que además puede capacitar a la microrred para su operación en isla. Hay varios grupos de investigación en Japón, EEUU y Europa que trabajan en este concepto revolucionario que puede transformar la manera de construir las redes de distribución en el futuro [Abe, Taoka & McQuilquin, 2011], [Huang, et. Al., 2011].

Estos flujos de energía pueden ser enviados entre microrredes o incluso dentro de la propia microrred, en este sentido, un aspecto importante es que los enrutadores de potencia pueden ser conectados en paralelo o en serie a la red. Los enrutadores de potencia en paralelo son dispositivos menos críticos que mejoran la calidad de suministro, pueden integrar sistemas de almacenamiento y gestionar la energía e incluso generar redes. En cambio, los enrutadores en serie además de lo anterior, permiten también la interconexión asíncrona de microrredes síncronas.

En este proyecto se desarrolla el IDPR, que es un enrutador de potencia en paralelo. El IDPR es un convertidor de potencia capaz de mejorar la calidad de la energía y, al mismo tiempo si se asigna un sistema de almacenamiento de energía, también gestionar paquetes de energía, como se observa en el esquema de la Figura 3. En particular en la parte derecha de la Figura 3, se observa el bloque de potencia del IDPR de 34 kVA, que en términos de calidad de energía, equilibra las corrientes de las fases R, S, T y N de forma que el consumo visto desde aguas arriba es como un consumo trifásico equilibrado, con cero potencia reactiva y un contenido armónico prácticamente nulo. Además el IDPR, equipado con un sistema de almacenamiento, puede almacenar los excedentes de la generación distribuida y proporcionarla durante las horas pico o durante horas de baja o nula generación. Finalmente el IDPR puede restablecer el suministro, de forma local y después de una incidencia o eventualidad severa. Por lo tanto el IDPR puede funcionar en dos modos:

- **Esclavo:** actúa como una fuente de corriente, que entrega o consume la energía deseada, según los puntos de ajustes fijados por el operador mejorando la calidad de la energía, es decir cuando opera junto a la red.
- **Master:** actúa como una fuente de tensión, fijando la tensión y frecuencia del conjunto de la red local, es decir crea una red. Notar que este modo se iniciará después de un cero de tensión y después de que se haya determinado la ubicación de fallo en la red.

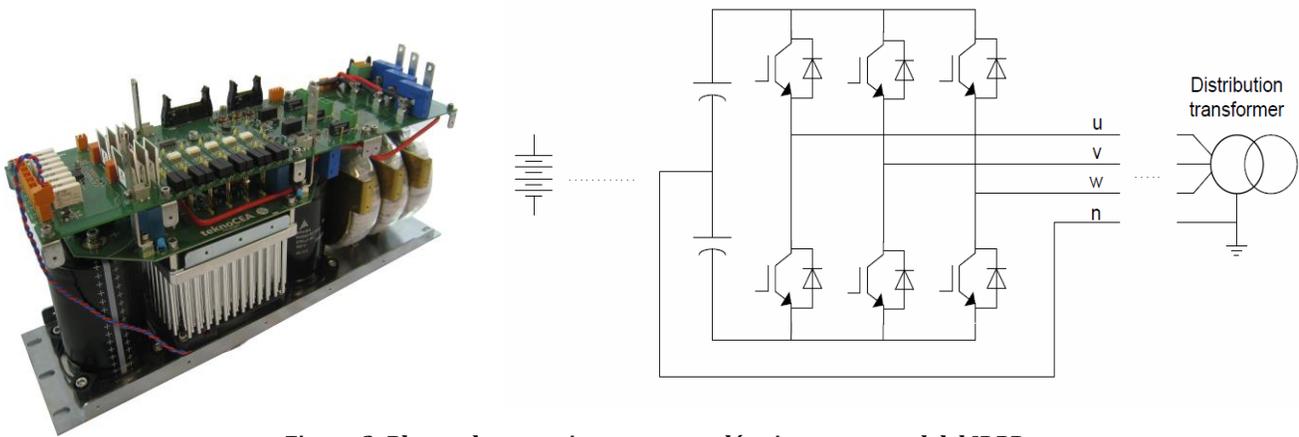


Figura 3. Bloque de potencia y esquema eléctrico conceptual del IDPR

LOS AGENTES Y LA JERARQUÍA DEL SISTEMA

La red piloto está gestionada por diferentes agentes, en particular, hay cinco actores: GEMS, SCADA, LEMS, LC y TC. En la Figura 4 se muestra la jerarquía e intercambios de información entre estos actores.

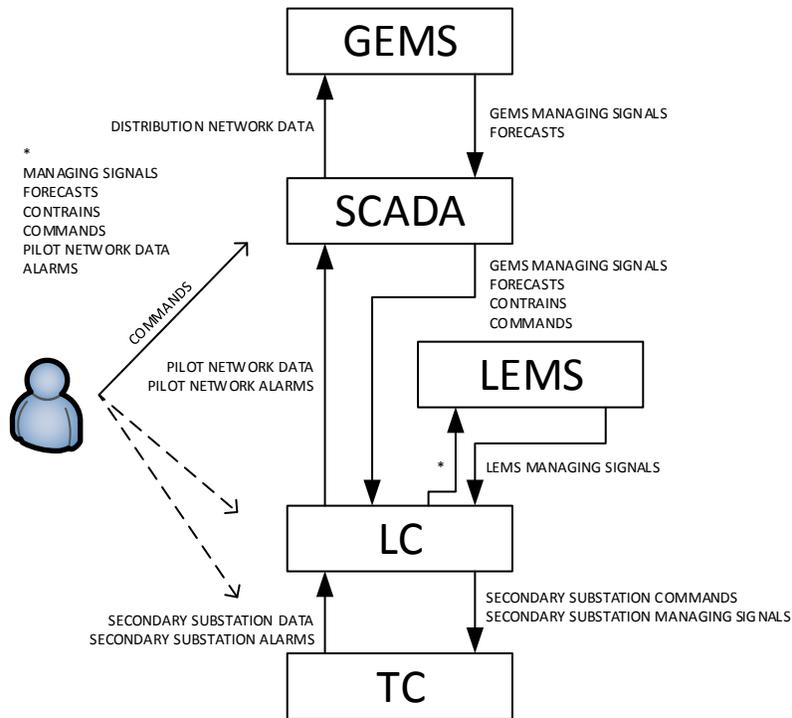


Figura 4. Jerarquía de los agentes de control

Empezando de arriba abajo, el primer elemento es el **Global Energy Management System** (GEMS). El principal cometido del GEMS es proporcionar las consignas que gestionan los recursos distribuidos de la red piloto, las previsiones de consumos y generación, y los costes asociados de la misma. Por lo tanto, un módulo del GEMS es el encargado de estimar los perfiles de consumo y predecir el perfil de generación de los recursos energéticos distribuidos y otro modulo es el encargado de determinar las consignas cuarto-horarias de acuerdo al estado de la red de distribución, a las previsiones y a los datos del mercado. Este software se comunica a través de la SCADA vía ficheros de valores separados por comas cada 15 minutos mandados a través FTP sobre TCP/IP siendo GEMS el cliente y la SCADA el servidor.

A continuación hay el **Supervisory Control And Data Acquisition** (SCADA) que monitoriza toda la red de distribución (incluida la red piloto). El SCADA se encuentra en el centro de control del operador y es indispensable para el funcionamiento correcto del sistema. De las diferentes acciones llevadas a cabo por la SCADA, hay que destacar que procesa los datos del GEMS y distribuye a la red piloto los que le conciernen, generando un nuevo fichero de valores separados por comas que será mandado al LC a través de FTP sobre TCP/IP, donde la SCADA es el cliente y LC es el servidor. Además la SCADA controla y gestiona la red piloto mandando los comandos de operación y leyendo la base de datos del LC vía IEC-60870-5-104, en adelante IEC-104, sobre TCP/IP, siendo la SCADA el master y el LC el esclavo. Finalmente recoge de los datos de medida de la red de distribución, y genera un nuevo un fichero de valores separados por comas que es enviado al GEMS vía FTP sobre TCP/IP, donde la SCADA es el cliente y el GEMS el servidor.

Seguidamente se encuentra el **Local Energy Management System** (LEMS). El LEMS es un software específicamente desarrollado para gestionar los recursos distribuidos de la red piloto, este se ejecuta en un ordenador industrial ubicado en la propia red piloto. La tarea principal de LEMS es proporcionar la serie final de comandos que gestionarán los recursos distribuidos de la red piloto, en función de los comandos del GEMS, las restricciones de la SCADA y toda la información obtenida de la red piloto. Por lo tanto, el LEMS leerá la base de datos con toda la información referente a la red piloto y escribirá las consignas finales en el LC, vía Modbus sobre TCP/IP, donde LEMS es el master y el LC es el esclavo. Por otra parte el LEMS recibe el fichero que proviene de la SCADA y GEMS vía FTP sobre TCP/IP, donde el LC es el cliente y el LEMS el servidor. Finalmente, el LEMS también se encarga de registrar la información referente a los dispositivos de la red piloto, tales como estados, órdenes, los procesos, las alarmas, los mensajes de error y advertencias, etc. y a su vez también almacena los datos de los elementos de medida en sus históricos.

El **Local Controller** (LC) es un software que se ejecuta en una de las *Remote Terminal Units* (RTU) instaladas en la red piloto y es el que controla el funcionamiento de la red piloto a nivel local. En concreto gestiona los comandos enviados por el SCADA vía IEC 104 sobre TCP/IP y las señales de ajuste del LEMS recibidas vía Modbus sobre TCP/IP siendo él el esclavo. Es decir que transfiere los diferentes comandos a los TCs vía protocolo IEC-104 sobre TCP/IP, siendo él el master y los diferentes TCs (definidos más abajo) los esclavos. A su vez el LC actualiza su base de datos, leyendo toda la información del sistema en las bases de datos de los diferentes TCs, también vía IEC-104 sobre TCP/IP, para que posteriormente esta pueda ser consultada por el SCADA y LEMS. Por ultimo cabe destacar que el LC proporciona la seguridad cibernética a la red piloto ya que es el vínculo con el mundo exterior.

El **Transformer Controller** (TC) es un software que se ejecuta en todas RTU. Este se encarga de que los dispositivos que cuelgan de él ejecuten los comandos, también de actualizar su base de datos leyendo el estado de sus dispositivos y la información que estos proporcionan. El TC se comunica con todos estos dispositivos a través de Modbus RS485.

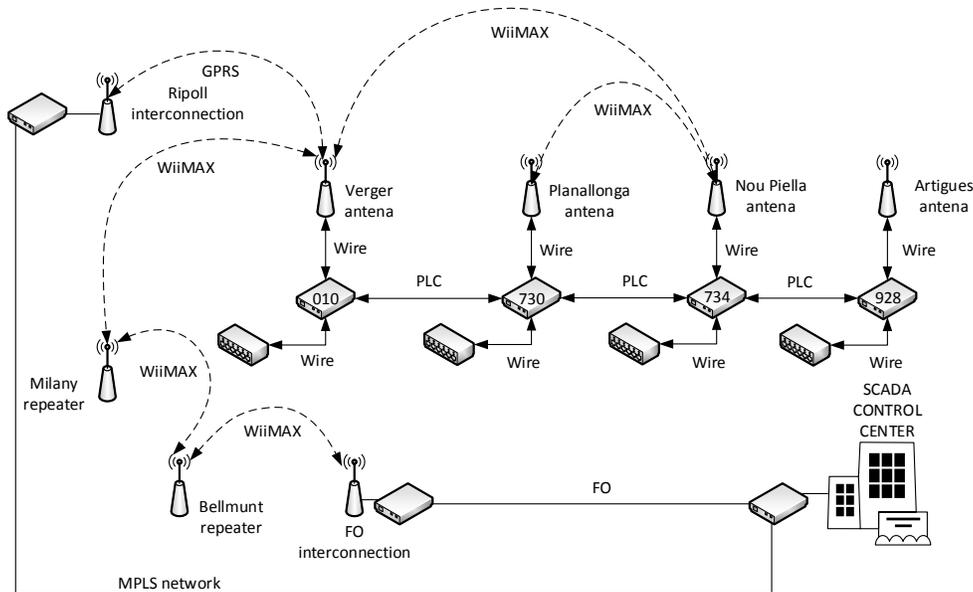


Figura 5. Arquitectura de la red de comunicaciones

ARQUITECTURA DE LAS COMUNICACIONES

En la actualidad la red de comunicaciones es una infraestructura esencial para el funcionamiento eficiente del sistema, ya que la red de comunicaciones será la encargada de transmitir los datos de la red eléctrica al operador y a su vez los comandos de operación a los actuadores de la red eléctrica. La arquitectura actual suelen estar caracterizada por una serie de enlaces de transmisión, de capacidad relativamente baja, que se ajustan al volumen de la información transmitida. Cabe destacar que la red piloto, debido a sus características, no dispone de una red de comunicaciones, y por lo tanto se ha definido una de acuerdo con sus necesidades de calidad de servicio. En particular, ésta se utilizará para transmitir los comandos de control y maniobra, el conjunto de consignas para los recursos distribuidos, avisos y alarmas, las mediciones remotas e información del sistema, así como la información de los contadores inteligentes. Las tecnologías más típicas utilizadas en sistemas eléctricos para la transmisión de la información son:

- **Comunicaciones de Fibra Óptica (FO)** utiliza pulsos de luz a través de una fibra óptica para la transmisión de información
- **Wireless communication o comunicaciones inalámbricas**, se basa en utilizar las tecnologías de radio para realizar la transferencia de información entre dos o más puntos.
- **Power Line Communication (PLC)** es una tecnología que utiliza líneas de distribución y cables del sistema eléctrico como un canal de transmisión.

Las comunicaciones a través de fibra óptica son las de mayor capacidad llegando a cientos de Gb/s, sin embargo conllevan un gran impacto económico y de obra civil, por lo que suele restringirse a redes de transporte o en redes de entorno urbano. Los sistemas inalámbricos pueden alcanzar velocidades de transmisión del orden de decenas o incluso cientos de Mb/s, sin embargo la señal puede experimentar una degradación como consecuencia de las condiciones meteorológicas y presentar limitaciones para llegar a todas las zonas rurales remotas. Finalmente PLC presenta un buen compromiso entre la capacidad de transmisión que va desde algunas decenas de valor a cientos de kb/s, su principales atractivos es la robustez frente a las deficiencias de los canales y que utiliza los canales de transmisión ya existentes que son de la propiedad del distribuidor.

La arquitectura de las comunicaciones propuesta para la red piloto está representada en la siguiente Figura 5. Básicamente, ésta se puede dividir en tres áreas, la primera área es la comprendida por el propio centro de transformación y sus clientes. En particular, para dar cobertura a los clientes se ha instalado en cada subestación una antena que utiliza la tecnología del WiMAX, también a nivel de subestación las comunicaciones serán cableadas, bien se basen en el protocolo Modbus RS-485 o en el TCP/IP. A nivel del conjunto de la red piloto se han establecido dos canales: el canal principal, que utiliza la tecnología PLC; y el canal secundario que proporciona redundancia es a través de la tecnología WiMAX. Finalmente la red piloto se comunica con el centro de control a su vez por dos canales. El canal principal se basa en la tecnología WiMAX. En este canal principal, a través de dos repetidores se alcanza una red privada de comunicaciones por fibra óptica. El canal secundario utiliza las comunicaciones GPRS hasta interconectarse a la red pública de comunicaciones.

CONCLUSIONES

Este proyecto comenzó el pasado Febrero de 2014, actualmente una vez definidas arquitecturas, jerarquías y agentes, se encuentra en la fase de implementación, validación e integración y se espera que dentro de un año se empiecen las pruebas de validación y se puedan presentar sus resultados. El presente trabajo describe y presenta la arquitectura del sistema, la cual permite integrar correctamente a los diferentes actores del sistema con la red eléctrica y de telecomunicaciones. Por lo tanto la arquitectura de la Smart Rural Grid es una buena propuesta para este tipo de redes de distribución rurales.

AGRADECIMIENTOS

The research leading to these results has received funding from the European Union seventh framework program FP7-ICT-2013-11 under grant agreement 619610 (Smart Rural Grid). Website: <http://smartruralgrid.eu/>

REFERENCIAS

- Estabanell Energia, "Els orogens d'Estabanell Energia" URL: <https://www.estabanell.cat/corporativa/orogens/> consultado en noviembre 2015
- Google "Google Earth" URL: <https://goo.gl/maps/25aqVDPBj3F2> consultado en noviembre 2015
- Smart Rural Grid (2014): Web proyecto FP7 "Smart Rural Grid". Grant agreement: 619610. URL: <http://smartruralgrid.eu/>
- DNV GL Energy "A review of Distributed Energy Resources" September 2014
- Abe, R.; Taoka, H.; McQuilkin, D., "Digital Grid: Communicative Electrical Grids of the Future," in Smart Grid, IEEE Transactions on, vol.2, no.2, pp.399-410, June 2011
- Huang, A., Crow, M., Heydt, G., Zheng, J., & Dale, S. (2011). The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet. Proceedings of the IEEE, 99(1), 133-148

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MICRORRED ELÉCTRICA DE CEDER-CIEMAT¹¹

Jorge Mírez Tarrillo⁽¹⁾, Luis Hernández Callejo⁽²⁾

- (1) Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, jmirez@uni.edu.pe;
jorgemirez2002@gmail.com
- (2) Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER-CIEMAT) – Universidad de Valladolid (Campus Universitario Duques de Soria), luis.hernandez@ciemat.es;
luis.hernandez.callejo@uva.es

RESUMEN

Es una gran ventaja tener instalaciones experimentales de generación distribuida del tipo microrred con equipamiento en el que podamos hacer mediciones según escenarios de trabajo de los diferentes equipos, sin embargo, es también de gran ayuda para comprender mejor el funcionamiento de los mismos, el poder modelar estos equipos e instalaciones modelarlos matemáticamente para que luego sean simulados computacionalmente en lenguajes de alto nivel. El presente trabajo describe las actividades realizadas para el modelamiento y simulación realizado con la microrred existente en CEDER – CIEMAT y vamos a describir las ventajas y desventajas de dicho trabajo, así mismo los objetivos del mismo, una descripción de las actividades realizadas para el modelamiento y simulación numérica de los diferentes equipos que constituyen la microrred.

Palabras clave: *Generación Distribuida, Microrred.*

GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y MICRORREDES

Alrededor del mundo, los sistemas de potencia convencional están enfrente a los problemas de la gradual depleción de los recursos de combustibles fósiles, pobre eficiencia de energía y polución del medio ambiente. Estos problemas han llevado a una tendencia de generación de potencia localmente en el nivel de voltaje de distribución por uso de fuentes de energía renovables o no convencionales tales como: gas natural, biogás, potencia eólica, células solares fotovoltaicas, celdas de combustible, sistemas de energía y calor combinados (CHP), microturbinas y motores Stirling y lograr su integración dentro de la red de distribución de las empresas. Este tipo de generación de potencia es denominado: Generación Distribuida (DG) y las fuentes de energía son denominadas: Fuentes de Energía Distribuida (DERs). El término Generación Distribuida ha sido ideado para distinguir este concepto de generación que es diferente al de la generación convencional centralizada. La red eléctrica de distribución llega a ser activa con la integración de la DG y llega a ser denominado como: red de distribución activa.

¹¹ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

Las redes de electricidad están en un era de la mayor transición desde redes de distribución estables pasivas con transporte de electricidad unidireccional hacia redes de distribución activas con transporte de electricidad bidireccional. Las redes de distribución sin ninguna unidad de DG son pasivas dado que la potencia eléctrica es suministrada por la red de energía nacional hacia los usuarios inmersos en la red de distribución. En cambio es activa cuando unidades de DG son agregadas al sistema de distribución permitiendo el flujo de potencia bidireccional en las redes.

El concepto fundamental de una microrred puede ser asumido como el siguiente: un sistema de energía integrado consistente de recursos de energía distribuidos y múltiples cargas eléctricas como un simple, red autónoma sea en paralelo o aislada de la existente red eléctrica de las empresas. Las microrredes pueden ser vistas como los bloques de construcción de las Smart Grid o como una alternativa trayectoria de las muchas hiperinteligentes "SuperGrid".

Hay principalmente dos tipos de métodos de control en microrredes: Una que requiere comunicación entre generadores – o un control centralizado, y la otra que establezca la necesaria potencia activa y reactiva autónomamente:

- Microrred con Control Centralizado: Control de generación, despacho, desconexión de carga y gestión de servicios auxiliares son realizados a través de un controlador centralizado. Medios de comunicación necesitan ser colocados entre fuentes por medio de cableado o por wireless. Este esquema de control es más alineado con el concepto de "SmartGrid".
- Microrred con Control Autónomo: Bajo este esquema de control, la demanda es compartida entre generadores en proporción a sus respectivas "caídas (droops)" de potencia activa y reactiva, como en un tradicional sistema de potencia.

El futuro de la industria eléctrica se basa en la necesidad para el desarrollo de un infraestructura del sistema eléctrico inteligente y altamente flexible la cual facilite substancialmente las grandes cantidades de energías renovables que habrá en comparación a lo que hay en los sistemas de energía de hoy. Esta infraestructura flexible e inteligente es un prerrequisito para lograr las metas establecidas por IPCC en el 2007 sobre las reducciones de CO₂ (mitigación del cambio climático) como también asegurar la seguridad futura del suministro de energía en todas las regiones del mundo.

Hemos asumido el reto de contar con un modelo matemático de una microrred, en el cual se definan diferentes escenarios de funcionamiento y sean contrastados con la respuesta de las máquinas y elementos existentes a fin de que podamos comprender mejor el funcionamiento de los mismos.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PRESENTE TRABAJO

- Presenta la ventaja de costos reducidos en la realización del modelamiento y simulación.
- Con el criterio adecuado se puede construir modelos matemáticos y computacionales simplificados que brinden información relevante de las principales variables a estudiar, lo cual constituye una ventaja si se tiene los conocimientos previos adecuados. De hecho, al realizar un modelo matemático se tiene en cuenta sólo la información necesaria y definida para las variables de entrada y de salida del modelo de un sistema en estudio dado.
- El área física para realizar el modelamiento y simulaciones se ve reducido a ambientes de estudio u oficinas de trabajo, en comparación a la parte experimental que requiere de instalaciones especiales.
- Tiene la ventaja de que los resultados del modelo pueden ser analizados y/o comparados con los obtenidos en otros grupos de investigación sea de modelamiento o experimentales, centrándonos específicamente en las variables de salida del sistema en estudio.

- La desventaja principal está asociada al coste computacional de los modelos. A modelos más sofisticados se requiere mejores sistemas computarizados para obtener tiempos de respuesta razonables y precisión en los resultados adecuados.
- Otra de las desventajas es que los comportamientos modelados son aproximados a los reales. En ese criterio de aproximados prima mucho el software utilizado, la calidad de los datos utilizados, la complejidad del comportamiento de algunos elementos en que criterios de matemática estocástica y de probabilidades son necesarios.

OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO

El presente trabajo persiguió varios objetivos:

- Conocer y caracterizar cada componente de la microrred.
- Modelar cada componente/equipo de la microrred.
- Integrar componentes/equipos para así formar subsistemas (bloques) de la microrred.
- Integrar todos los componentes y subsistemas en un todo general con el que se lograría el modelo completo de la microrred.

MICRORRED CEDER

El Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER-CIEMAT) de Lubia, situado a escasos kilómetros de Soria capital, se creó en 1987 como centro nacional para la investigación, desarrollo y fomento de las energías renovables. Esta instalación en Castilla y León del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Organismo Público de Investigación adscrito al Ministerio de Economía y Competitividad a través de la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación; está considerada como pionera en España en el campo de la investigación relacionada con el aprovechamiento energético de la biomasa, además de ser una de las mejores dotadas de Europa en instalaciones, medios materiales y humanos para la experimentación en energía eólica de pequeña potencia y generación distribuida con fuentes renovables en redes eléctricas.

CEDER-CIEMAT se presenta como un entorno idóneo para la demostración y experimentación aplicada de elementos de generación distribuida, almacenamiento, electrónica de potencia e inteligencia distribuida, pasando de las pruebas de laboratorio a pruebas en un espacio real. Una de las principales ventajas de CEDER-CIEMAT es que todos los elementos se encuentran ya desplegados y son propiedad de CIEMAT, lo que posibilita cualquier tipo de maniobra y/o ensayo. En la Figura 1 se muestra una parte de las 640 hectáreas de CEDER-CIEMAT.



Figura 1. Foto aérea de CEDER-CIEMAT

La totalidad de los edificios existentes en CEDER-CIEMAT se encuentra comunicados con el centro de proceso de datos mediante tecnología Ethernet, por medio de dispositivos de capa 2 y capa 3. De esta manera, se puede enviar y recibir información desde cualquier sitio de CEDER-CIEMAT donde se realice vida normal, y poderla procesar de manera descentralizada en cualquier otro punto del centro. El centro incorpora dispositivos de capa 2 en los centros de transformación, lo que permite la realización de pruebas de comunicación contra equipos desplegados en estos lugares, e incluso la realización de pruebas de comunicación paralelas, y así poder validar otras tecnologías diferentes a Ethernet.

La compañía distribuidora suministra a 45 kV, y mediante un transformador a la entrada del centro se pasa a 15 kV. El elemento transformador de entrada es de 45/15 kV - 1000 kVA, mientras que el resto de elementos de transformador, todos dentro de envoltura prefabricada, excepto los de CT-PEPA I. Las denominaciones de los centros de transformación son:

- CT-SUB E01-Arfrisol: 15/0,4 kV 250 kVA.
- CT-1 E02: 15/0,4 kV 630 kVA.
- CT-2 E03: 15/0,4 kV 630 kVA.
- CT-LEVI E07: 15/0,4 kV 630 kVA.
- CT-PEPA I: existen dos transformadores, 15/0,4 kV 50 kVA; 15/0,4 kV 500 kVA.
- CT-PEPA II: 15/0, 4 kV 630 kVA.
- CT-PEPA III: 15/0, 4 kV 50 kVA; 15/0, 4 kV 630 kVA.

El modelado y simulación empleados para este estudio contempla los elementos instalados en el CT-PEPA III. A continuación se enumerarán los elementos existentes en dicho centro de transformación, los cuales serán posteriormente modelados.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN CT-PEPA III

A continuación, se enumeran las instalaciones de generación distribuida renovable que CEDER-CIEMAT dispone en CT-PEPA III:

- Instalación fotovoltaica de 15 kW orientables, con 3 inversores monofásicos de 5 kW y ubicados en transformador de 50 kVA de CT-PEPA III.
- Instalación fotovoltaica de 15 kW orientables, con 1 inversor trifásico de 15 kW ubicado en transformador de 630 kVA de CT-PEPA III.

- Mini-central hidráulica con turbina Pelton (Figura6) y generador asíncrono trifásico acoplado directamente al rodete de la turbina Pelton, potencia eléctrica máxima generada 40 kW. Situada en transformador de 630 kVA de CT-PEPA III.



Figura 2. Mini-turbina hidráulica Pelton con generador asíncrono

CONSUMOS EN CT-PEPA III

Mediante tubería diferente a la del turbinado, se plantea la posibilidad de bombear agua desde un depósito inferior hasta otro superior, mediante dos grupos SIHI motor-bomba series AKH 6100 (6103), potencia eléctrica 18,5 kW cada uno (Figura 3) y conectado en PEPA III. Al disponer de un sistema de turbinado y bombeo, se podrá optimizar la energía, y además, emplear el grupo de bombeo como carga controlable. Tanto la turbina hidráulica como el sistema de bombeo estarán conectados en el transformador de 630 kVA de CT-PEPA III.



Figura 3. Sistema de bombeo hidráulico con dos bombas centrífugas multietapa de 18.5 kW por unidad

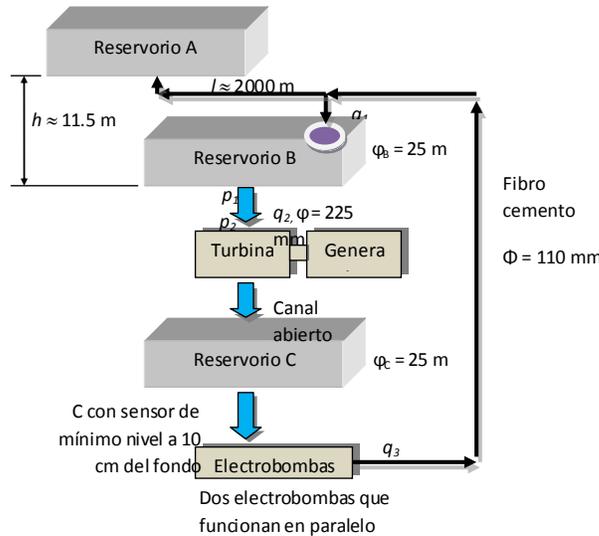


Figura 5. Diagrama de la instalación con principales variables a modelar

En la figura 6 muestra el modelo en computadora desarrollado bajo entorno Matlab/Simulink del subsistema de la turbina Pelton, reservorios y electrobombas para un tiempo equivalente de 24 horas, para ello el usuario programa potencia y tiempo de operación de turbina, tiempo de funcionamiento de electrobombas, el modelo da como resultados finales los flujos y volúmenes en los reservorios y las potencias eléctricas involucradas.

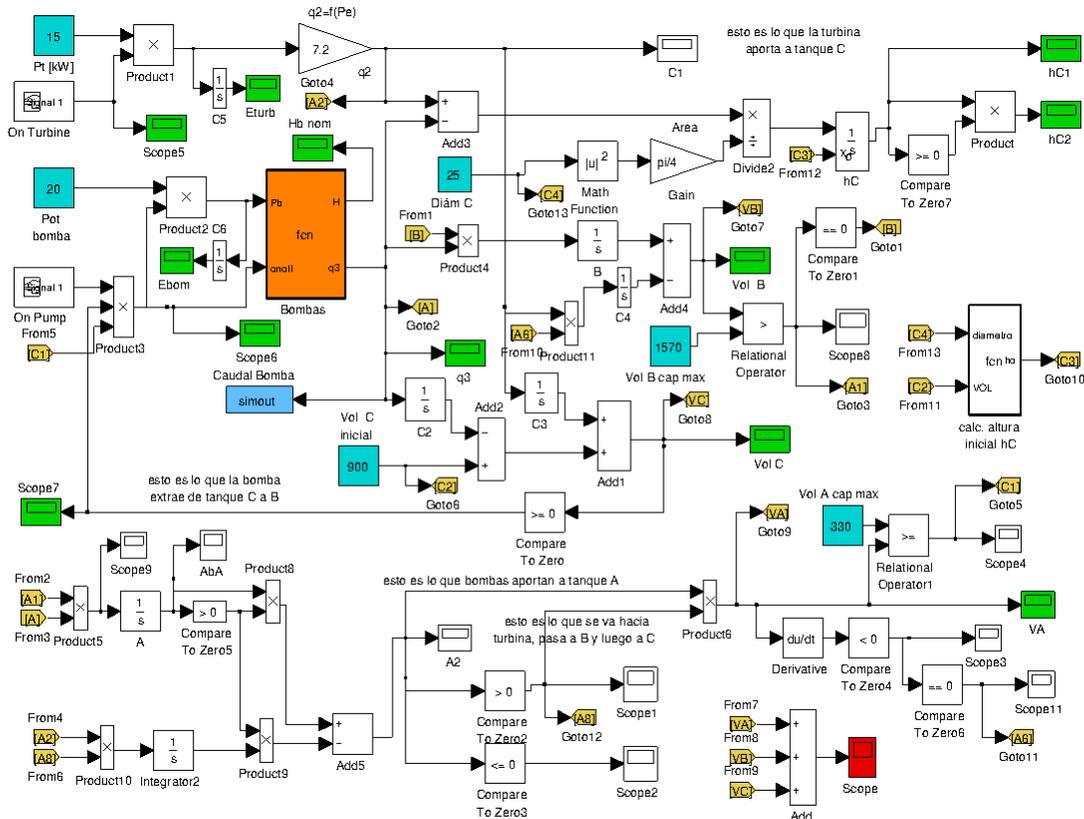


Figura 6. Un primer modelo de subsistema Turbina Pelton, electrobombas y reservorios

DATOS DE IRRADIACIÓN SOLAR PARA LA DETERMINACIÓN DE PRODUCCIÓN EN PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Se considera el día 09 de junio el día número 160 del año, dado que de ese día se tomaron lecturas en la estación meteorológica del CEDER. Aquel día se hizo mediciones de irradiación solar a fin de que sean útiles para los modelos teóricos y computacionales de los paneles solares monocristalinos y policristalinos. La figura 6 muestra los valores medios y máximos y la curva de irradiación teórica calcula para este día del año y con las coordenadas geográficas del CEDER. Aquel día hacia la tarde hubo nubes y una fuerte lluvia.

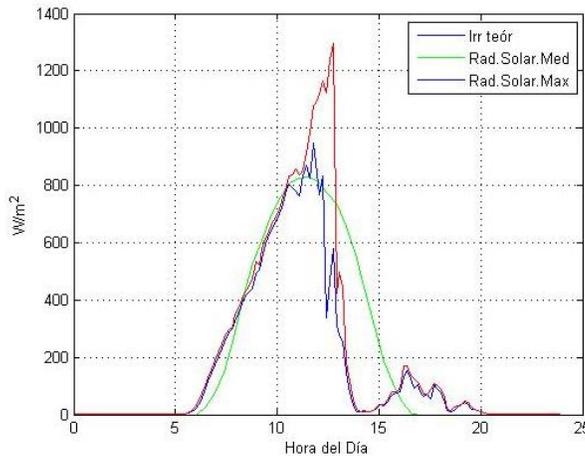


Figura 7. Curva de irradiación teórica y datos captados por estación meteorológica del CERER el 09 de junio del 2015

TARIFAS POR CONSUMO DE ELECTRICIDAD SUMINISTRADA A CEDER

La figura 7 muestra la distribución según horas del día (eje horizontal del 1 al 24) y durante los meses del año (desde M1 hasta el M12) del costo por concepto de consumo de energía eléctrica en CEDER. Hay una distribución de costos según horario aparte para lo que son sábados, domingos y festivos nacionales. Son tres tarifas entre barato, medio y caro. Por lo tanto, se desea turbinar agua para generar parte del consumo cuando la tarifa es cara y bombear agua en horas que la tarifa es la más barata. La no uniformidad de las tarifas durante el día y lo largo del año se han considerado en los modelos computacionales.

Tarifa 3.1 A del Calendario Energético 2013 Peninsular INDESO
Horas del día comienza a partir de 0, es decir, 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, etc.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
M1	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2															
M2	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2															
M3	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2															
M4	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M5	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M6	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M7	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M8	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M9	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M10	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
M11	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2															
M12	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2															

P3 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2

Sábados, Domingos y Festivos Nacionales

P1	Punta (caro)
P2	Llano (medio)
P3	Valle (barato)

Figura 8. Cuadro de tarifas por concepto de energía eléctrica consumida en CEDER

RESULTADOS ESPERADOS Y PREVIOS

El modelo ha sido elaborado considerando las características propias del consumo de energía eléctrica y de funcionamiento de la red eléctrica del CEDER. Dicha información ha sido captada en campo, sistematizada y ordenada a fin de plasmarla matemáticamente en el modelo luego de reuniones de trabajo y coordinación con el personal CEDER. Un primer modelo se basa en definir qué horas y en que potencia trabaja la turbina y de manera similar con las electrobombas, para ello, se asume datos de consumos constantes y aleatorios para visualizar el estado y cambios en las capacidades de los reservorios y hacer un balance de potencias y energías del sistema. Un segundo modelo, continuidad del primero, involucra el usar datos recopilados desde los medidores inteligentes e ingresarlos al sistema junto con las horas y potencia de funcionamiento de turbina y horas de encendido – apagado de electrobombas y evaluar el balance de potencias y energías del sistema. Para ello, no sólo información desde medidores inteligentes son necesarios, sino también los datos provenientes desde instrumentos de medición de la irradiación solar, los que permiten cuantificar y cualificar el rendimiento de las diferentes plantas solares y sus respectivos inversores. Un tercer modelo tipo sería aquellos que buscan la optimización de la microrred, para ello el modelo tendrá ajustes y buscará un punto óptimo de funcionamiento mediante técnicas que durante la investigación serán determinadas. Un cuarto y final modelo tipo involucra la predicción del comportamiento de la microrred y la toma de decisiones adecuada, en esta parte, es probable que se haga muchos diferentes escenarios de simulación en función a los primeros modelos tipo descritos con la finalidad de visualizar y analizar resultados. En todo esto, la operación de la microrred será un buen referente para el ajuste y evaluación de los resultados; algunos días será posible configurarlo de acuerdo a los parámetros de funcionamiento de los equipos en el modelo; y en otras veces, se tendrá data recolectada más información de la forma de operación de los equipos y con ello se hará un proceso inverso de reproducir los mismos resultados en el modelo computacional en base a lo experimentado.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado gracias al auspicio de la Red Telemática CYTED en Microrredes de Energía, así mismo, agradecer al personal del CEDER y al Dr. Manfred Horn del Centro de Energías Renovables – CER de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.

REFERENCIAS

- Morales-Guzmán, P. (1992): "ONGD y Desarrollo". V Coloquio de Cooperación al Desarrollo. Actas y Comunicaciones. Servicio de publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 43-59.
- Nargo Martínez, A. (2001): La Educación para el Desarrollo en las universidades españolas. Ariel, Madrid, 465 pp.
- Peter Asmus, Adam Cornelius, Clint Wheelock. "Microgrids: Islanded Power Grids and Distributed Generation for Community, Commercial and Institutional Applications". Research Report. Pike Research LLC. 2009.
- René Martínez. "Renewable-Driven Microgrids in Isolated Communities". Thesis for Master of Science in Electrical Engineering. University of Puerto Rico .2009
- Riso National Laboratory for Sustainable Energy. "Riso Energy Report 8 – The intelligent energy system infrastructure for the future". Technical University of Denmark. 2009.
- Schmidt, P. (2003): Entwicklungshilfe. GeoFocus (Editorial), 6: 1-10.
- S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley. "Microgrids and Active Distribution Networks". IET Renewable Energy Series 6. United Kingdom. 2009.

Torst, F. y Guillaume, J. (2005): La coopération Internationale. En: D. High y D. Slow (Ed.), International Cooperation. Cooper and Baker, Londres, pp. 279-296.

Ui, P.Y. y Gau, S. (2005): Fair Trade. International Journal of Cooperation, 20 (1): 53-67.

GESTIÓN DE UNA MICRORRED MEDIANTE TECNOLOGÍA PLC-PRIME: EL ROL DE LAS COMUNICACIONES¹²

Noelia Uribe Pérez ⁽¹⁾, Luis Hernández ⁽²⁾, David de la Vega ⁽³⁾, Itziar Angulo ⁽³⁾ y Amaia Arrinda ⁽³⁾

(1) Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER-CIEMAT), España. Correo-e: noelia.uribe@ciemat.es

(2) Universidad de Valladolid (Campus Universitario Duques de Soria, UVA), España. Correo-e: luis.hernandez.callejo@uva.es

(3) Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España. Correos-e: david.delavega@ehu.es (D.V.); itziar.angulo@ehu.es (I.A.); amaia.arrinda@ehu.eus (A.A.)

RESUMEN

La progresiva introducción de los recursos distribuidos, tanto generación como almacenamiento, en las redes de baja tensión está poniendo en evidencia un hecho que hasta ahora no se había tenido en cuenta: la necesidad de monitorizar y controlar esa sección del sistema eléctrico. La introducción de las tecnologías de la información y comunicación en el nuevo paradigma eléctrico de las Redes Inteligentes y más concretamente, en las microrredes, será un elemento clave para el correcto desarrollo de las mismas. En este trabajo se describe el papel de los sistemas de comunicaciones en el contexto eléctrico y se presenta la novedosa instalación del CEDER: una microrred en un entorno real con un amplio despliegue de dispositivos Smart Metering. Además, se abordan las funcionalidades derivadas de dicho despliegue como son la monitorización y gestión de la microrred, la gestión de la carga y el análisis de ruido, entre otros, con el objetivo de reducir costes, mejorar la eficiencia energética y promocionar el uso de energías renovables.

Palabras clave: *Microrred, Power Line Communications, Smart Metering, Sistema de Comunicaciones.*

INTRODUCCIÓN

En el sistema eléctrico convencional pueden distinguirse cuatro partes diferenciadas: generación, transporte, distribución y consumo. Las redes en baja tensión (*Low Voltage, LV*), que formarían parte de la distribución y el consumo, han sido históricamente las grandes olvidadas dentro de la gestión y el monitoreo del sistema eléctrico. Hasta ahora esto no había supuesto ningún problema ya que el sistema eléctrico ha venido siguiendo un modelo centralizado en los puntos de generación y las redes *LV* eran redes pasivas en las que su gestión sencillamente no se consideraba. Sin embargo, con la progresiva introducción de los recursos renovables, *Renewable Energy Resources (RES)*, y la generación y almacenamiento distribuidos, *Distributed Generation (DG)* y *Distributed Storage (DS)*, respectivamente, el correcto mantenimiento y gestión de las redes *LV* se torna crucial.

¹² Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

En este contexto, la figura de las redes eléctricas inteligentes o *Smart Grids* (SGs) y muy especialmente las microrredes, han emergido con fuerza con el objetivo de aprovechar al máximo los recursos locales y ser los agentes del cambio de modelo eléctrico hacia uno más eficiente, justo y respetuoso con el medio ambiente. Las microrredes destacan especialmente por su potencial en términos de gestión y control de las redes LV (Fernández et al., 2011; Hatziaargyriou et al., 2007).

Además, son numerosos los estudios que apuntan que el cambio en el sistema eléctrico pasa necesariamente por la introducción de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en el contexto eléctrico, antes tradicionalmente separados y que han sufrido evoluciones históricas muy distintas (Laverty et al., 2010; Yan et al., 2013; Gao et al., 2012). Entonces, la arquitectura de comunicaciones del sistema eléctrico se convierte en la herramienta clave para monitorizar y gestionar adecuadamente la generación, el transporte y el almacenamiento eléctricos. De hecho, es difícil imaginar una red eléctrica futura sin su correspondiente sistema de comunicaciones. Los primeros despliegues de contadores digitales sentaron las bases de la gestión de las redes LV y dieron pie a lo que se conoce como medida inteligente o *Smart Metering*, considerado como una evolución de los sistemas de telediagnóstico convencionales, y que ofrece comunicaciones bidireccionales, capacidades en tiempo real como la conexión en remoto y el envío de señales de control, entre otros (Sendin et al., 2014).

La evolución del modelo eléctrico y de su correspondiente sistema de comunicaciones puede verse de manera sintética en la Figura 1, donde el flujo de energía y de comunicaciones pasa de un funcionamiento unidireccional (Figura 1.a) a otro bidireccional (Figura 1.b).

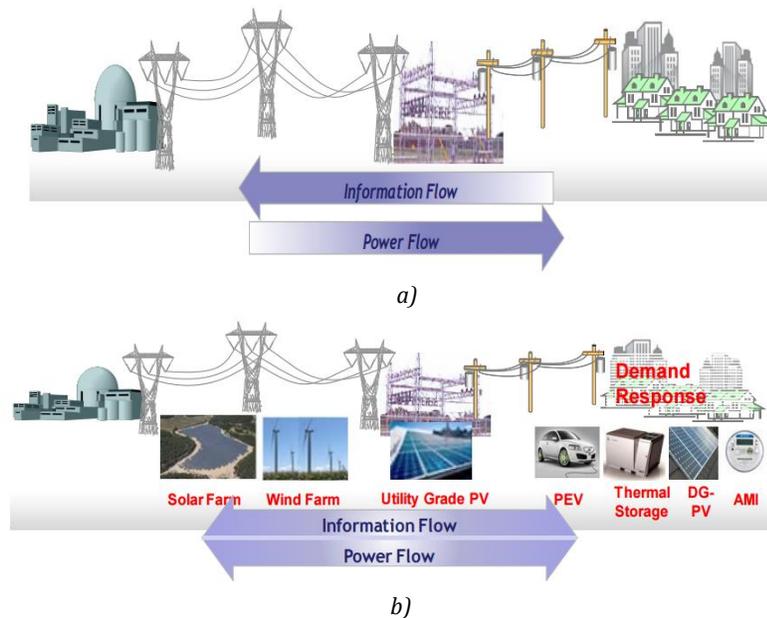


Figura 1. Evolución del flujo de energía y comunicación en el sistema eléctrico
a) Unidireccional b) Bidireccional (Rahimi et al 2010)

SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN REDES ELÉCTRICAS

El sistema de comunicaciones de una microrred lo forman el despliegue de dispositivos y herramientas TIC en el contexto eléctrico fundamental para la consecución de todas las funcionalidades que se esperan de una microrred tales como *Smart Metering*, respuesta a la demanda, gestión DG, DS y RES, etc.

De manera genérica, el sistema de comunicaciones de una microrred se puede definir en forma de capas o subredes, entre las que destacan tres (Kuzlu *et al.*, 2014):

- Entorno del usuario; pudiendo ser redes domésticas o *Home Area Network (HAN)*, redes en edificios o *Building Area Network (BAN)* o redes en entorno industrial o *Industrial Area Network (IAN)*.
- Entorno de un conjunto de usuarios, y dentro de éste redes de vecindario o *Neighborhood Area Networks (NAN)*, o redes de área extensa o *Field Area Network (FAN)*. También pueden considerarse aquí redes de área local o *Local Area Network (LAN)*.
- Entorno más allá del vecindario: redes de área extensa o *wide area network (wan)*.

El principal requisito que se le exige a una microrred en términos TIC es la *autoconfiguración*. Es decir, ha de ser capaz de gestionar automáticamente el direccionamiento, la descripción de los dispositivos de la red así como su registro y su localización. La Tabla 1 recoge un listado completo de requisitos adicionales (Eger, 2013).

Tabla 1. Listado de requisitos específicos del sistema de comunicaciones de una microrred.

Autoconfiguración	<ul style="list-style-type: none"> · Configuración de la red · Descripción de los dispositivos · Registro y búsqueda · Registro y búsqueda
Escalabilidad	<ul style="list-style-type: none"> · Adaptación a distintos tamaños y/o configuraciones
Interoperabilidad	<ul style="list-style-type: none"> · Uso de estándares · Aplicabilidad del sistema de control y gestión de la microrred
Gestión de datos	<ul style="list-style-type: none"> · Bus de datos. · Sistemas de bases de datos.
Automatización	<ul style="list-style-type: none"> · Organización automática · Coordinación
Procesado	<ul style="list-style-type: none"> · Alta demanda de recursos de computación y procesado. · Gestión de la demanda basada en cargas críticas.
Fiabilidad y disponibilidad	<ul style="list-style-type: none"> · Para el sistema · Para las comunicaciones
Resiliencia	<ul style="list-style-type: none"> · Modularidad de los dispositivos <i>hardware</i> · Modularidad de los dispositivos <i>software</i>
Servicios de comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> · Peticiones y respuestas. · Sincronización temporal.
Calidad de servicios, QoS	<ul style="list-style-type: none"> · Latencia. · Ancho de banda. · Pérdida de paquetes. · Prioridad.
Gestión	<ul style="list-style-type: none"> · Control remoto del equipamiento. · Gestión de tareas.
Interfaz de usuario	<ul style="list-style-type: none"> · Vista topológica.
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> · Garantía de privacidad.

La Figura 2 muestra una propuesta de sistema de comunicaciones global para un microrred. Esto significa que la infraestructura de comunicaciones no sólo soporta *Smart Metering* y aplicaciones derivadas de éste (como las tienen lugar en las redes domésticas o *Home Area Networks – HAN*) sino también la automatización del transporte y la distribución de la red eléctrica y las futuras aplicaciones que de ello se deriven (Wenpeng et al., 2010). Los autores resumen las potenciales aplicaciones del sistema de comunicaciones como sigue:

- Infraestructura *Smart Metering*.
- *Smart Metering* mediante contadores inteligentes o *Smart Meters (SM)* residenciales.
- *Smart Metering* mediante *SMs* comerciales e industriales.
- Gestión de subestaciones.
- Gestión de *feeders*.
- Monitorización y control de la red.
- Automatización de servicios (monitorización y control remotos de reguladores, baterías de condensadores, etc.)
- Monitorización de interruptores.
- Monitorización y control de subestaciones eléctricas.
- Gestión de productores independientes de energía y recursos distribuidos.
- Establecimiento de una red *LAN* corporativa en subestaciones.
- Monitorización y control de estaciones generadoras.
- Control del tráfico corporativo.
- Aplicaciones avanzadas:
- Video vigilancia en subestaciones eléctricas.
- Accesibilidad de voz y datos para los dispositivos móviles.

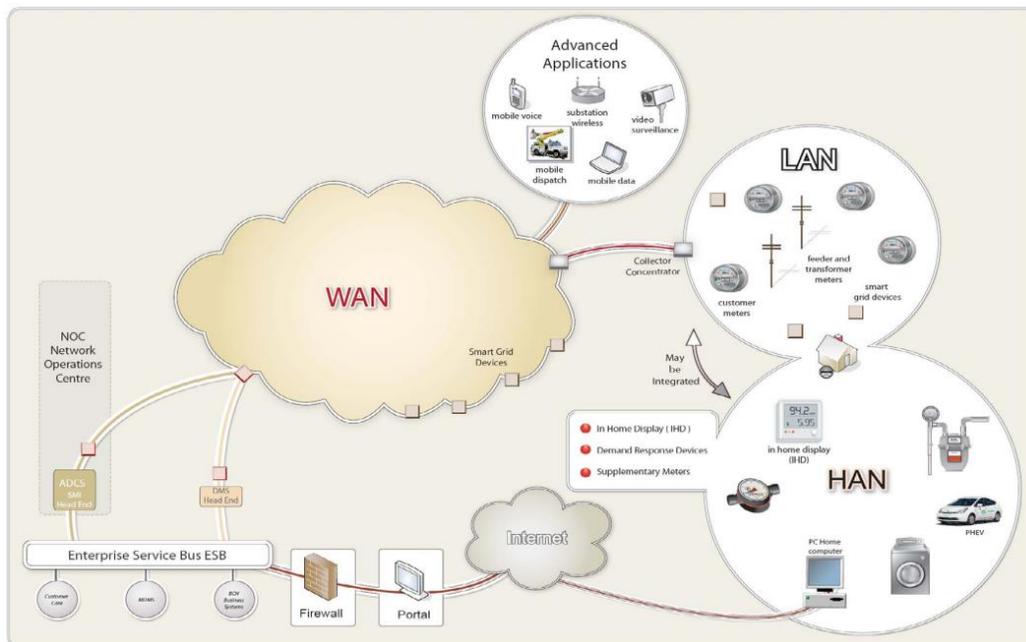


Figura 2. Infraestructura de comunicaciones global (Wenpeng et al., 2010)

GESTIÓN DE UNA MICRORRED MEDIANTE PLC-PRIME

Esta sección describe el control y gestión de una microrred mediante la tecnología *PLC-PRIME*. En concreto, la microrred forma parte del *Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER)*, ubicado en la provincia de Soria, España. Se trata de un centro nacional para la investigación, el desarrollo y la promoción de las energías renovables que a su vez forma parte del *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)*, dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad.

CARACTERÍSTICAS DE LA MICRORRED

El centro tiene una potencia contratada de 135 kW, dentro de la tarifa 3.1A. La compañía distribuidora suministra electricidad a 45 kV, que desciende hasta a los 15 kV gracias a un transformador situado a la entrada del centro. El *CEDER* cuenta con un total de cinco centros de transformación con siete transformadores (dos de los centros tienen dos transformadores) instalados en distintos puntos. La microrred del centro está formada por un amplio despliegue de recursos *DG* y *DS*, tal y como se listan en la Tabla 2.

Además, una característica destacable del sistema eléctrico del centro es que adopta una configuración en anillo, como se muestra en la Figura 3. Dado que hay distintos transformadores instalados, sus correspondientes áreas pueden ser analizadas de manera independiente. Este aspecto se ve favorecido por el amplio despliegue de contadores inteligentes o *Smart Meters (SMs)*, tal y como se explica más adelante.

En lo que al sistema de comunicaciones se refiere, el *CEDER* dispone de un centro de control (*CC*) al que se conectan todos los edificios del centro mediante *Ethernet*, de forma que los datos pueden ser enviados y recibidos en cualquier punto del centro y ser procesados de manera descentralizada a posteriori. La microrred cuenta en la actualidad con un total de 53 *SMs* monofásicos y trifásicos y 9 concentradores de datos o *Data Concentrators (DCs)*. Cada centro de transformación aloja un *DC* y aquellos con doble transformador incorporan un segundo *DC*, en configuración maestro-esclavo. Los *SMs* obtienen datos de corriente y tensión (en las 3 fases para los modelos trifásicos), potencia activa, potencia reactiva en los cuatro cuadrantes, energía activa bidireccional, energía reactiva en los cuatro cuadrantes y factor de potencia instantáneo en los cuatro cuadrantes. Todos los dispositivos mencionados incorporan la tecnología *PRIME*, descrita en el siguiente apartado.

Tabla 2. Listado de recursos *DG* y *DS* en la microrred del *CEDER*.

Centros de Transformación	kV	kVA	DG asociado			DS asociado		
			Tipo	Cantidad	Potencia /Capacidad	Tipo	Cantidad	Potencia /Capacidad
PT-SUB E01	15/0.4	250	FV Tejado	1	12 kW	-	-	-
PT-1 E02	15/0.4	630	-	-	-	-	-	-
PT-2 E03	15/0.4	630	FV Tejado	1	8.28 kW	-	-	-
PT-LEVI E07	15/0.4	630	-	-	-	Bat. Li.	1	2x50 Ah
PT-PEPA I	15/0.4	50	Aero	1	50 kW	Bat. Pb ácido	1	826 Ah
	15/0.4	500	Aero	1	3 kW			
PT-PEPA II	15/0.4	630	Aero	1	1.5 kW	Bat. Pb ácido	1	595 Ah
			Aero	1	3.2 kW			
			Aero	1	3 kW			
PT-PEPA III	15/0.4	50	Pérgola FV	4	5 kW	Bat. Pb ácido Volante	1	660 Ah
	15/0.4	630	Microhidro	1	40 kW		1	25 kW

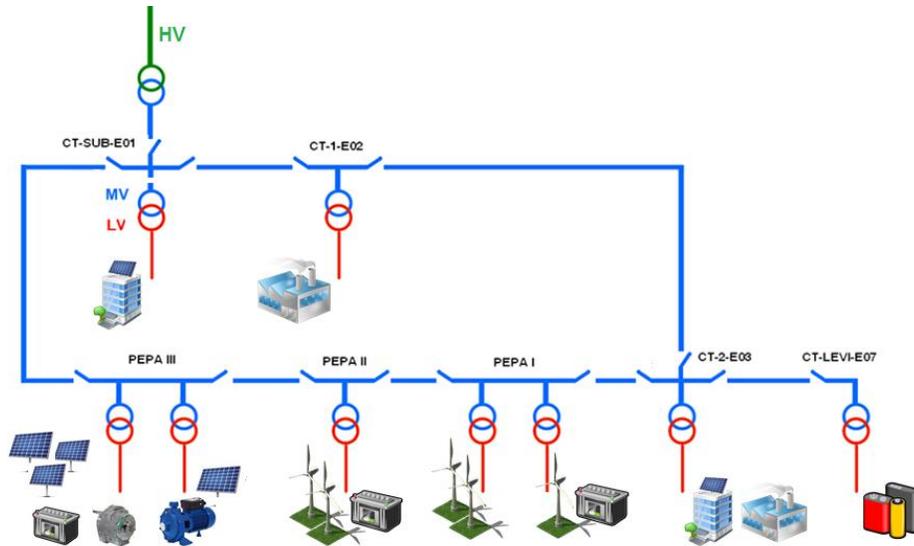


Figura 3. Configuración eléctrica de la microrred del CEDER y localización de recursos DG y DS

TECNOLOGÍA PLC-PRIME

El sistema de comunicaciones de la microrred implementa *PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME)*, una tecnología que emplea el cableado eléctrico convencional para la transmisión de datos o *Power Line Communication (PLC)*. *PRIME* es un estándar *PLC* de banda estrecha (*Narrow Band PLC, NB-PLC*) que define las especificaciones de las capas física y *MAC*. *PRIME* es abierto y su modelo de datos se basa en el estándar *DLMS/COSEM*, ampliamente utilizado en aplicaciones de medida (*PRIME Project, 2008*). Los *DCs* gestionan la subred formada por éste (que hace de nodo base) y los *SMs* (nodos de servicio), supervisan la red *LV* y recopilan la información de medida.

Capa física

La capa física *PRIME* está concebida para la comunicación sobre cableado eléctrico originalmente dedicado a la transmisión y distribución de electricidad a 50-60 Hz. Se basa en la modulación *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)* y permite hasta 96 subportadoras de datos entre 42 kHz y 89 kHz (en la versión 1.3.6 del estándar), de esta forma la señal dispone de unos 47 kHz de ancho de banda y se sitúa en la "mejor zona" de la banda CENELEC-A, ya que las redes eléctricas típicas de Europa generan problemas a frecuencias por debajo de los 40 kHz. Además, *PRIME* admite 3 tipos de modulación digital (*BPSK, QPSK, 8PSK*) y opcionalmente codificación convolutiva.

Capa MAC

Cada dispositivo viene de fábrica con una dirección *MAC* asignada que se utiliza durante el proceso de registro en la subred.

Las subredes *PRIME* se establecen de manera automática en forma de árbol, lo que facilita mucho el despliegue de contadores de forma masiva. Está formada por dos elementos fundamentales:

- **Nodo Base:** Es la "cabeza" de la subred y el que gestiona toda la topología y configuración de la misma. Sólo puede haber un Nodo Base por subred y están embebidos en los *DCs*, por lo que la dirección *MAC* de éste hará las veces de identificador de dicha subred. En un primer momento, cada Nodo Base forma la subred en sí misma. Los Nodos Servicio deberán pasar por una fase de registro para entrar a formar parte de la subred.

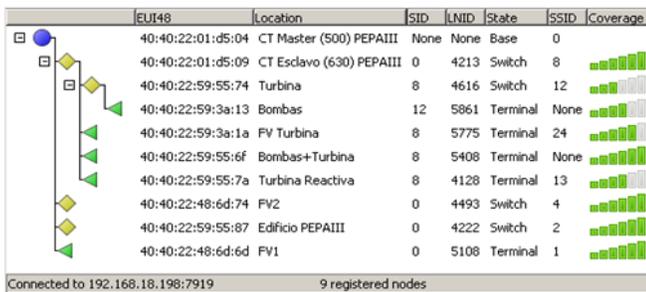
- **Nodo Servicio:** Son las hojas y raíces de la subred formada por el Nodo Base y, por lo tanto, con los que establecerá comunicación. Los Nodos Servicio están embebidos en los *SMs* y pueden tener a su vez tres estados principales: *desconectado*, es su estado inicial y durante éste no pueden comunicarse ni ejercer de repetidores de otros nodos, por lo que tratarán de buscar una subred a la que conectarse; *terminal*, en este estado pueden establecer conexiones y comunicarse pero no pueden reenviar información de otros nodos y *switch*, en este estado el Nodo de Servicio actúa como repetidor de nodos situados a niveles inferiores y además mantiene la funcionalidad del estado *terminal*.

GESTIÓN DE LA MICRORRED

El potencial de la microrred del *CEDER* no sólo reside en el amplio despliegue de *DG* y *DS* sino también en la flexibilidad que ofrece la configuración eléctrica con la que cuenta combinado con un importante despliegue de equipos *Smart Metering*. A continuación se describen los aspectos más importantes que se abordan en la microrred gracias a las características anteriormente descritas.

Monitorización

El beneficio inherente del despliegue de dispositivos de *Smart Metering* es la posibilidad de monitorizar la microrred. Es posible comprobar el estado topológico de la red y su evolución en el tiempo mediante *Web Services* y *software* específico. En concreto, la Figura 4a muestra gráficamente la configuración topológica y su cobertura mientras que la Figura 4b es una captura de los *logs* generados. Estas herramientas permiten analizar diferentes aspectos de la microrred tales como evolución de los roles de los dispositivos, disponibilidad de la red, disponibilidad de los *SMs*, dispositivos registrados/dados de baja y operación del protocolo *PRIME*.



a)

Time	MAC1	MAC2	MAC3	State	Time
2014/06/24 09:44:58	40:40:22:48:6d:74	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	disconnected	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:44:58	40:40:22:48:6d:74	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	registering	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:44:58	40:40:22:48:6d:74	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:00	40:40:22:01:d5:09	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:00	40:40:22:01:d5:09	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	98:40:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:05	40:40:22:48:6d:6f	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	disconnected	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:05	40:40:22:48:6d:6f	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	registering	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:05	40:40:22:48:6d:6f	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:07	40:40:22:48:6d:6e	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	04:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:07	40:40:22:48:6d:6e	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	98:40:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:11	40:40:22:59:55:6f	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	98:40:40:22:01:d5:04
2014/06/24 09:45:12	40:40:22:59:55:87	40:40:22:01:d5:04	40:40:22:01:d5:04	terminal	98:40:40:22:01:d5:04

b)

Figura 4. Monitorización de la microrred a) Configuración topológica y b) Captura de logs generados

Gestión de datos de medida

Los datos de medida se envían diariamente mediante tareas programadas a través de *Web Services* implementados en los *DCs*. De esta forma, los *DCs* interrogan aguas abajo a los *SMs* de su subred por la información especificada, los cuales forman ficheros *.xml* y los envían vía *FTP* al sistema central, donde se almacenan en bases de datos.

Las posibles aplicaciones de esta información son múltiples: verificación de simulaciones, entrenamiento de redes neuronales, diseño de patrones de consumo y generación, entre otros. Además, el centro ha implementado una interfaz en la que se representan gráficamente los consumos y la generación renovable con fines informativos para los y las trabajadores del centro (ver Figura 5). La información se actualiza desde los *SMs* cada minuto. Esta información también es muy útil para la simulación de

escenarios. En concreto, en el CEDER se han identificado 5 posibles escenarios: rural, industrial, barrio urbano, centro tecnológico y perfil *prosumer*. Para cada uno de ellos se han definido sus correspondientes recursos *DG* y *DS*, además de las cargas asociadas. Dado que cada uno de los siete transformadores puede ser virtualmente aislado, es posible estimar la correspondiente factura eléctrica (distinta a la contratada o no).

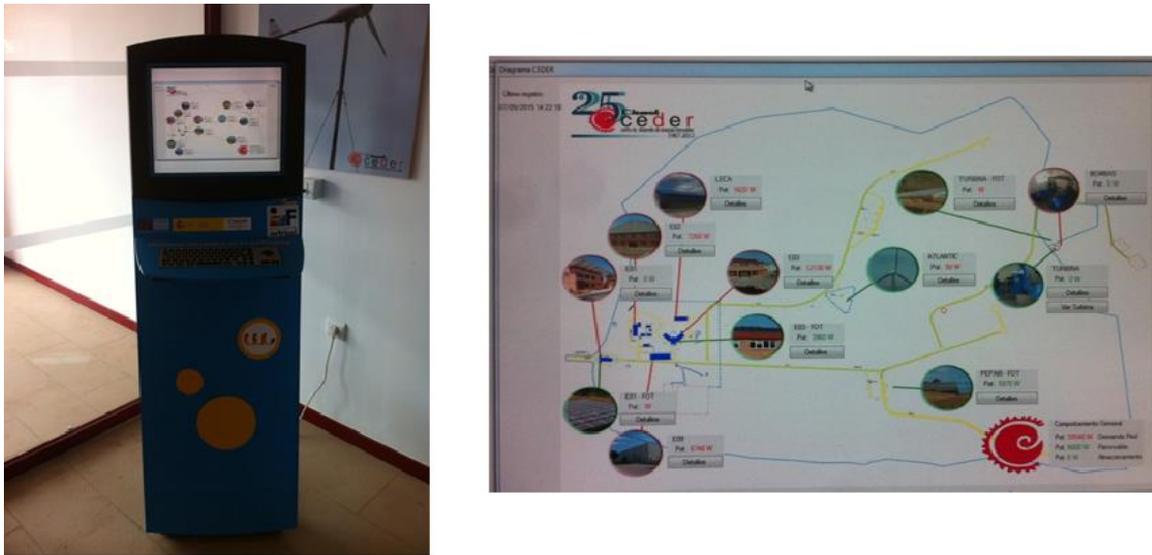


Figura 5. Representación de consumos y generación de la microrred del CEDER.

Gestión de la carga

Comparando la tarifa y facturas eléctricas del centro con las tarifas simuladas y los perfiles de carga, es posible diseñar patrones de comportamiento con el objetivo de reducir costes y mejorar la eficiencia energética. De hecho, un primer paso es la programación de la mini-hidráulica para que bombee en horas valle y así disponer de agua en los tanques superiores para poder turbinarla y generar electricidad en horas pico.

Además, caracterizando los perfiles de consumo de cada edificio y maquinaria del centro, se puede adaptar su operación a la discriminación horaria de la tarifa. Los dispositivos con mayor demanda energética serán desplazados a horas valle con baja demanda energética, de manera que la curva total del centro se podrá suavizar, siguiendo las técnicas representadas en la Figura 6.

Calidad de servicio: ruido e interferencias

Una microrred ofrece una mejora directa en la calidad del servicio ofrecido ya que la generación está más próxima a los puntos de consumo, por lo que las pérdidas en el cableado son menores. Sin embargo, es necesario un medio de comunicación fiable para una correcta gestión. En este caso, el cable eléctrico no es inocuo para las comunicaciones y puede generar interferencias (*Galli et. al., 2014*). Los efectos de esas señales interferentes pueden traducirse en alteraciones en la configuración de la red así como la pérdida de datos y de control de dispositivos en remoto. En concreto, la topología de la red puede verse afectada si la señal interferente hace que un Nodo de Servicio pierda su conexión con el Nodo Base. Las retransmisiones de tramas generarán un incremento del tráfico en el medio. El Nodo Base puede interpretar la falta de mensajes por parte de un Nodo de Servicio como una desconexión del mismo, por lo que podría provocar la reconfiguración de la red. En el peor de los casos, si el nodo afectado actuaba como *switch*, esta situación implicará que todos sus nodos aguas abajo se desconecten de la subred. En

cuanto a la pérdida de datos, esta puede ser temporal (si el nodo es capaz de retransmitirla de nuevo) o permanente. Finalmente, el ruido dificulta el acceso en remoto a los dispositivos, haciendo que éstos sean inaccesibles mientras dure la interferencia. Aunque el proceso de medida normalmente no se ve afectado por estas interferencias, la transmisión de esos datos de medida no podrá hacerse hasta que no se restablezca la comunicación con el Nodo Base. La Figura 7 muestra las principales interferencias existentes en el canal NB-PLC.



Figura 6. Técnicas para la gestión de la carga (Gellings et al., 2008)

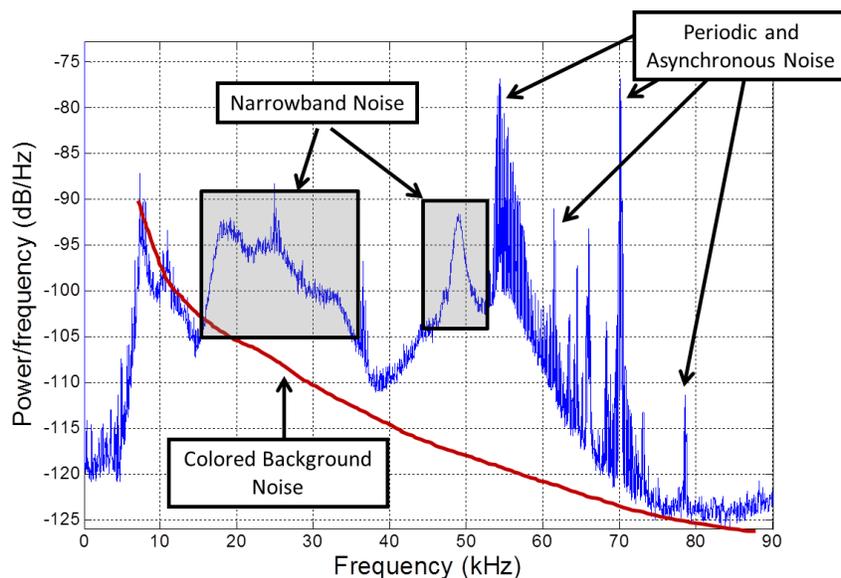


Figura 7. Principales tipos de ruido existente en el canal NB-PLC (Evans, 2011)

CONCLUSIONES

Este trabajo describe la relevancia del sistema de comunicaciones en una microrred como elemento clave para el correcto mantenimiento y gestión de la misma. Así mismo, se presenta la novedosa instalación de la microrred del CEDER, caracterizada no sólo por una configuración eléctrica que le proporciona flexibilidad sino también por un amplio despliegue de SMs y DCs estratégicamente localizados. Además, se aborda la monitorización y la gestión que estos dispositivos permiten, y las funcionalidades añadidas tales como la gestión de la carga y el análisis del ruido e interferencias generadas en las comunicaciones PLC. Por todo ello, la microrred del CEDER es un excelente campo de pruebas del control y gestión de una red inteligente en un entorno real.

AGRADECIMIENTOS

La investigación realizada en este tema ha sido parcialmente subvencionada por el Ministerio de Economía y Competitividad (proyecto TEC2015-67868-C3-1-R) y por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) mediante la convocatoria de contratación para la especialización de personal investigador doctor.

REFERENCIAS

Eger, K. (2013): "How to build a microgrid platform with future internet technologies", Joint Workshop of FINSENY & EIT ICT Labs, Berlin.

Evans, B.L. (2011): "Powerline Communications for Enabling Smart Grid Applications", SRC GRC Annual Review, Wireless Networking and Communications Group, University of Texas at Austin.

Fernández, G.; Trujillo, M.; Sanz, J. F. y Sallán, J. (2011): "Spanish microgrids: current problems and future solutions," International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11), Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

Galli, S.; Scaglione, A. and Wang, Z. (2011): "For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid", Proceedings of the IEEE, vol.99, no.6, pp.998, 1027.

Gao J.; Xiao, Y.; Liu, J.; Liang, W.; and Chen, C. P (2012): "A survey of communication/networking in Smart Grids". Future Generation Computer Systems, 28(2), 391-404.

Gellings, C. W. and Parmenter, K. E. (2008): "Demand-Side Management," in Energy Management and Conservation Handbook, ed. by F. Kreith D. Y Goswami, CRC Press.

Hatziargyriou, N.; Asano, H.; Iravani, R. y Marnay, C. (2007): "Microgrids," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 78-94.

Kuzlu, M.; Pipattanasomporn, M. and Rahman, S. (2014): "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN" in Computer Networks, vol. 67, pp. 74-88.

Laverty, D. M.; Morrow, D. J.; Best, R. y Crossley, P. A. (2010): "Telecommunications for smart grid: Backhaul solutions for the distribution network," in Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-6.

PRIME Project (2008). "Technology Whitepaper: PHY, MAC and Convergence layers". PRIME Alliance. Disponible online: http://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2014/10/PRIME-Spec_v1.4-20141031.pdf.

Rahimi, F. and Ipakchi, A., (2010): "Overview of Demand Response under the Smart Grid and Market paradigms," in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), pp.1-7, 19-21.

Sendin, A.; Urrutia, I.; Garai, M.; Arzuaga, T. and Uribe, N.(2014): "Narrowband PLC for LV smart grid services, beyond Smart Metering," Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 18th IEEE International Symposium on, pp.168-172.

Wenpeng, L., Sharp, D.; Lancashire, S., (2010): "Smart grid communication network capacity planning for power utilities," in Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, pp.1-4, 19-22.

Yan. Y.; Qian, Y.; Sharif, H. and Tipper, D. (2013): "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges". IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, No. 1.

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA Y ECONÓMICA DE UNA RED DE MICROGENERACIÓN ELÉCTRICA PARA EDIFICIOS CON ALMACENAMIENTO INTERMEDIO EN HIDRÓGENO¹³

Jesús Samaniego Muñoz⁽¹⁾, Fernando Frechoso Escudero⁽²⁾, Cristina de Torre Minguela⁽³⁾, Luis A. Bujedo Nieto⁽⁴⁾, Silvia Soutullo Castro⁽⁵⁾, José Antonio Ferrer Tevar⁽⁶⁾, M^a del Rosario Heras Celemín⁽⁷⁾, Roberto Carazo Álvarez⁽⁸⁾, Ángel Arranz Villafruela⁽⁹⁾, José Antonio Sánchez⁽¹⁰⁾, Javier Trujillo Henández⁽¹¹⁾ y José Hervás⁽¹²⁾

(1); (2) CARTIF. jessam@cartif.es; ferfre@cartif.es

(3); (4) CARTIF. critor@cartif.es; luibuj@cartif.es

(5); (6); (7) CIEMAT. silvia.soutullo@ciemat.es; ja.ferrer@ciemat.es; mrosario.heras@ciemat.es

(8) INGENIERIA IDEAS TX. r.carazo@ingenieriatx.es

(9) INZAMAC. angelarranz@inzamac.es

(10); (11) Universidad de Salamanca. jose.antonio@usal.es; javitrujillo@usal.es

(12) Grupo TECOPYSA. josehervas@he.grupotecopy.es

RESUMEN

En este artículo se ha desarrollado y evaluado el modelo de simulación dinámica bajo entorno TRNSYS de una red de microgeneración para el suministro eléctrico de cuatro edificios ubicados en el Parque Tecnológico de Boecillo (España) dentro del marco del proyecto DEPOLIGEN. Para abordar el máximo aprovechamiento del suministro energético renovable se han planteado un sistema de almacenamiento mediante la generación de hidrogeno a través de un electrolizador y su posterior aprovechamiento mediante un sistema de pila de combustible. Las simulaciones llevadas a cabo establecen la viabilidad técnica de los sistemas planteados y su factibilidad como sistemas aplicables a la demanda de edificios. Por el contrario en cuanto a viabilidad económica, los sistemas de almacenamiento en hidrogeno complican la rentabilidad de las mismas, ya que alargan los plazos de recuperación de la inversión, y con ello la rentabilidad final.

Palabras clave: *Poligeneración, microrred, almacenamiento en hidrógeno, TRNSYS.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente la micro-generación, entendida como el uso de pequeñas fuentes de generación eléctrica distribuidas se convierten en un sistema perfecto de cooperación con los grandes sistemas tradicionales de generación y que hacen que las instalaciones, poblaciones o industrias a las que dan servicio, sean más autosuficientes y requieran de menores potencias para su abastecimiento.

¹³ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

Están redes generalmente se fundamentan en el uso de energías renovables, principalmente solar fotovoltaica y eólica de pequeña potencia. La falta de control sobre la generación de energía basada en estos sistemas, obliga al empleo de elementos de almacenamiento, con los que poder hacer, que las curvas de producción y demanda se aproximen. Tradicionalmente como sistema de almacenamiento energético se emplean bancos o stack de baterías. Otra opción menos convencional es el almacenamiento intermedio mediante el uso del vector hidrógeno, generado mediante un sistema de electrolizador y almacenado a alta presión para su posterior uso mediante un sistema de pila de combustible.

La producción de hidrógeno se utiliza como un sistema de gestión de la demanda eléctrica, de manera que en los periodos en que ésta es inferior a la producción, los excedentes se utilicen para producir hidrógeno que pueda ser utilizado como combustible en los periodos de alta demanda.

El uso de pilas de combustible, junto con las energías renovables para la producción de hidrogeno, puede ser una interesante opción de futuro para la generación distribuida, permitiendo producir, almacenar y administrar la energía en el mismo lugar en el que se consume. Los edificios pueden convertirse en pequeñas centrales de generación distribuida, aprovechando las pilas de combustible para la generación de electricidad (y calor), junto con las energías renovables, productoras del hidrógeno necesario. De este modo el usuario se convierte en un elemento prosumidor, es decir, tanto productor como en consumidor de su propia energía.

Con esta forma de generación distribuida cada individuo a nivel personal podrá contribuir de forma activa en el uso más eficiente de la energía, en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, en el incremento del uso de fuentes de energía renovables y así conseguir un sistema energético más sostenible.

En el presente artículo se ha evaluado mediante simulación dinámica, tanto desde el punto de vista energético como económico, una red de microgeneración que pretende dar servicio a los edificios de tres empresas ubicadas en el parque tecnológico de Boecillo (España). En dicha red se ha abordado, junto a la inclusión de sistemas de generación basados en fuentes renovables, la integración de un sistema de almacenamiento intermedio basado en el Hidrogeno.

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

UBICACIÓN

El Parque Tecnológico de Boecillo, está ubicado en la provincia de Valladolid (España). Cuenta con una superficie de 118 hectáreas totalmente operativas destinadas a la instalación de empresas innovadoras de base tecnológica.

De forma concreta los edificios cuyo consumo eléctrico considerada la microrred son:

- Edificios de CARTIF (CARTIF I y II).
- Edificio de TECOPY.
- Edificio de INZAMAC.



Figura 1. Esquema con la disposición de los edificios (SYGPAC)

Con el fin de poder valorar las dimensiones de la conexión entre los tres edificios, la distancia medida en línea recta obtenida con el programa SYGPAC (Junta de Castilla y León). Para el trazado real de la red de distribución eléctrica que conectaría los tres edificios, y que dependería de los permisos y disponibilidad de paso para realizar la obra civil, se ha considerado un aumento del 30 % de estas distancias, obteniéndose los valores mostrados en la tabla 1:

Tabla 1. Distancias entre edificios

Origen	Destino	Distancia lineal [m]	Distancia real [m]
CARTIF	INZAMAC	100	130
CARTIF	TECOPY	320	416
TECOPY	INZAMAC	420	546

Aunque en el modelo de simulación no se han considerado, esas distancias establecen las pérdidas eléctricas por distribución, las caídas de tensión que se producen, y con ello el dimensionado de la red de distribución.

DEMANDA ENERGÉTICA DE LA MICRORRED

Para la evaluación energética de la red se ha considerado la demanda conjunta horaria a lo largo de todo un año del consumo de los tres edificios. La información se ha recogido a partir de las curvas cuarto horarias registradas en los contadores eléctricos de cada edificio salvo en el caso del edificio de INZAMAC, en el que no se pudo acceder estas curvas. Por el contrario si se disponía de los registros de un analizador de red en varios días en diferentes épocas del año, lo cual ha permitido regenerar la curva de demanda horaria del edificio.

SISTEMAS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Para generar el modelo de simulación sobre el que valorar las diferentes configuraciones y tamaños de equipo, y dado que el objetivo es analizar el comportamiento de diferentes sistemas y potencias instaladas dentro de la microrred, se han considerado para cada sistema unidades base de generación con una potencia para garantizar una demanda mínima. Modificando su número se puede conseguir los valores de potencia deseados en cada caso de simulación.

Los modelos usados están basados en los tipos de TRNSYS ajustados de acuerdo a modelos reales. De forma resumida los sistemas bases introducidas en el modelo son:

- Sistema fotovoltaico base. Instalación de silicio cristalino de 22 módulos en serie, y 3 ramas en paralelo, con una potencia nominal de 5 kW.
- Sistema eólico base. Aerogenerador con una potencia base de 20 kW, en el que se ha considerado una curva de potencia genérica, y una altura de buje de 25 m.
- Sistema generación de hidrógeno base. Electrolizador alcalino con una potencia nominal de 28,4 kW (referidos a su consumo eléctrico), y trabajando a una presión de 7 bares.
- Sistema pila combustible base. Pila de combustible tipo PEM, con una potencia base por stack de 13,9 kW.

Así mismo se han incluido en el modelo las instalaciones fotovoltaicas existentes en los dos edificios de CARTIF:

Tabla 2. Características de las instalaciones fotovoltaicas.

Nombre	Ubicación	Orientación/ inclinación	Potencia Panel [W]	Número paneles	Potencia nominal [kW]
Fotovoltaica 1	CARTIF 1	S/35°	120	36	3,8
Fotovoltaica 2	CARTIF 1	S/35°	130	36	3,8
Marquesina Solar	CARTIF 1	SE/10°	120	80	7,5
Fotovoltaica 3	CARTIF 2	S/30°	165	525	35
Muro Fotovoltaico	CARTIF 2	SE/90°	104/117	14/42	4,65

En la Figura 3 se muestra el perfil horario de las instalaciones fotovoltaicas operando en conjunto.

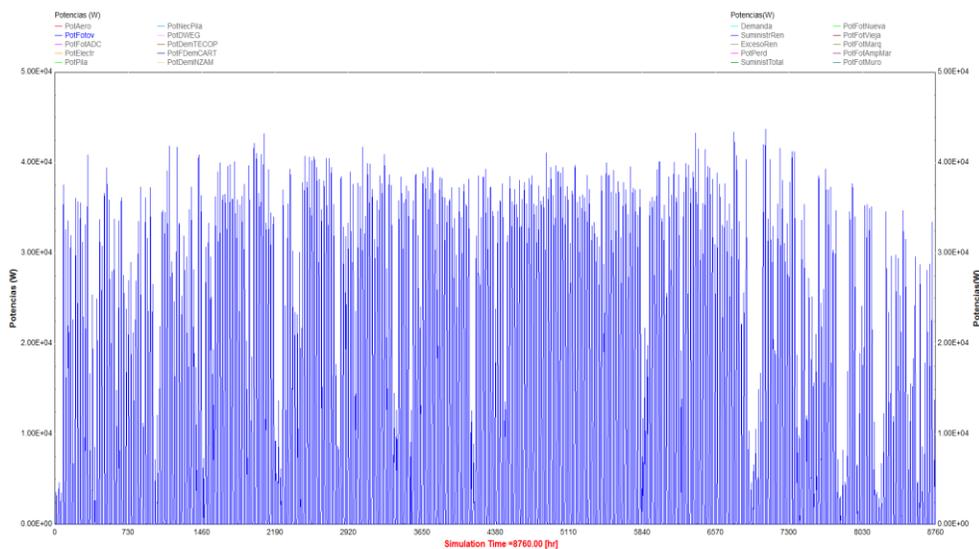


Figura 3. Potencia de salida de las fotovoltaicas existentes

MODELO EN TRNSYS DE INSTALACIÓN

El sistema se ha diseñado para tratar de cubrir la demanda eléctrica total de los cuatro edificios, la cual es considerada como entrada al modelo. La generación de los sistemas renovables eólico y fotovoltaico, son consideradas también como entradas al sistema de gestión y su valor va a depender de las condiciones meteorológicas en cada instante.

De forma adicional, se dispone de un sistema de almacenamiento intermedio en hidrógeno, el cual consta de un electrolizador y de un depósito de almacenamiento de hidrogeno a alta presión y de un sistema de pila de combustible, que permitirá generar electricidad a partir del hidrógeno almacenado y que servirá de apoyo a los sistemas de generación anteriormente descritos.

El control implementado en el modelo, analiza y compara en cada instante la demanda solicitada y la generación disponible (eólica + fotovoltaica + cogeneración). En el caso de que la generación sea mayor que la demanda, el exceso de potencia es enviado al sistema de producción de hidrógeno, el cual entrará en funcionamiento cuando este exceso sea superior al 20 % de la potencia nominal del sistema electrolizador (rango mínimo de funcionamiento del mismo), y el depósito esté por debajo del 90 % de su capacidad. Si la potencia excedente es superior al valor admitido por el sistema electrolizador (valor de potencia nominal), el exceso es considerado como energía perdida por el sistema y no aprovechada (teóricamente debería disiparse en algún sistema adicional no considerado).

Por el contrario, cuando la potencia demandada es superior a la generada, se solicitaría este defecto de potencia al sistema de pila combustible, entrando este en operación cuando el nivel del depósito de hidrógeno esté por encima del 20% de su capacidad. La energía generada por la pila de combustible vendrá limitada por la potencia instalada, con lo que en las ocasiones en las que la demanda sea superior a dicho valor, no se cubrirá el 100% de la demanda solicitada.

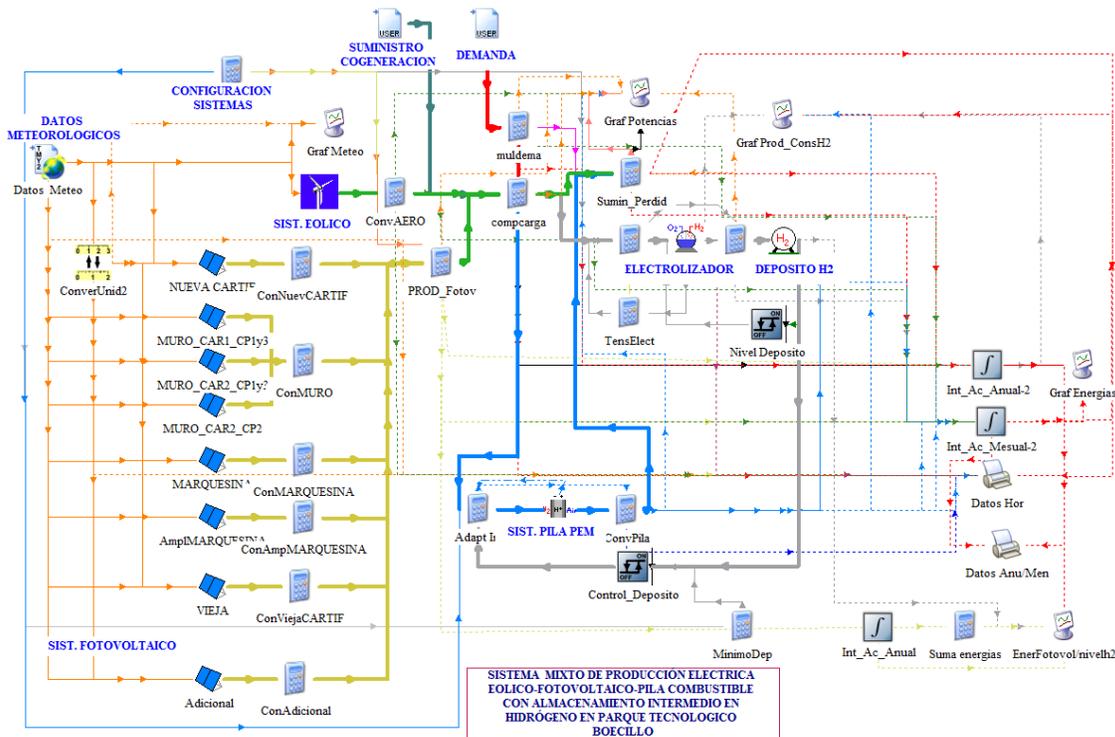


Figura 4. Modelo en TRNSYS de sistema de generación con almacenamiento en H2

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE GESTIÓN

De acuerdo a las especificaciones del modelo, las variables de entrada y salida del sistema que aborda la gestión de los diferentes sistemas de la microrred eléctrica considera la demanda de los edificios, así como el aporte energético de los elementos de generación (cogeneración, fotovoltaica, eólica, pila de combustible y electrolizador). Con ello se establecen las acciones de control sobre el electrolizador, y la pila de combustible.

ESCENARIOS DE ESTUDIO

Con el objetivo de identificar cual sería el dimensionado más adecuado, se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre configuración de los sistemas de la microrred eléctrica, variando de forma unitaria y colectiva los diferentes sistemas de generación:

- Potencias de generación renovable eólica y fotovoltaica.
- Potencia del electrolizador.
- Potencia de la pila de combustible.

Se han realizado simulaciones con un horizonte temporal de un año. En cada simulación se han considerado y analizado las siguientes variables:

- Demanda [kW]
- Generación eólica [kW]
- Generación fotovoltaica [kW]
- Aporte sistema pila combustible [kW]
- Consumo del electrolizador [kW]
- Energía perdida [kW]
- Suministro total o demanda cubierta [kW]

A partir de dicha información se obtiene los siguientes indicadores de referencia para cada simulación:

- Generación renovable sobre la demanda solicitada.
- Demanda cubierta por renovables (incluido el aporte del sistema Pila PEM)
- Demanda cubierta exclusiva por el sistema Pila PEM.
- Energía renovable usada por el electrolizador en la generación de hidrógeno.
- Energía renovable que no es aprovechada.
- Demanda cubierta por los sistemas de generación renovable.

Para el caso de los valores del cálculo de la tasa de retorno y el periodo de la recuperación de la posible inversión, se han usado los costes en euros por kW de potencia instalado indicados en la Tabla 3. Así mismo comentar que en las simulaciones se ha usado un depósito de almacenamiento de 5 m³ a 200 bares de presión, cuyo coste no se ha tenido en cuenta, el cual sería un coste fijo a añadir en todos los casos.

También indicar que se han considerado los costes de mantenimiento anuales de las instalaciones a lo largo de su vida útil como un 2,5% de la inversión inicial, y un incremento de la energía anual del 8%, así como un interés financiero del 2%.

Tabla 3. Costes económicos por unidad de energía instalada

Costes equipos [€/kW Instalado]	
Pequeña eólica	1800
Gran eólica	750
Fotovoltaica	1200
Fuel Cell	2800
Cogeneración motor Gas	1000
Electrolizador	1200
Compresión	1500

RESULTADOS

El análisis de los resultados mostrados permite obtener las siguientes valoraciones:

- La eólica posee un aporte energético bajo en relación a la potencia instalada, lo cual es debido a los bajos vientos existentes, a la altura a la que se pueden instalar los aerogeneradores de las potencias seleccionadas, provocando un aumento importante en la tasa de retorno.
- Los sistemas fotovoltaicos presentan buenos rendimientos energéticos y periodos de rentabilidad adecuados según lo establecido para estos sistemas, disminuyendo estos tiempos de retorno de inversión a medida que aumenta la potencia instalada.
- El aprovechamiento del exceso de energía por parte del electrolizador, está muy relacionado con la potencia de los sistemas renovables instalados. Es necesario que haya energía excedente para poder valorar su aprovechamiento. El análisis también indica que el máximo aprovechamiento para el mismo valor de potencia renovable instalada se produce con un mayor valor de potencia de electrolizador instalada, aunque a nivel económico no es la opción más idónea, pues la tasa de retorno de inversión se dispara. A priori aparece como valor más adecuado que la potencia de electrolizador sea 1/5 de la potencia renovable instalada.
- En todos los casos la demanda cubierta por el sistema PEM, es relativamente bajo, rondando entorno al 1-1,5 % en los casos más favorables, teniendo en cuenta la potencia instalada de acuerdo al hidrógeno disponible (generado). El aumento de potencia instalada de estos sistemas aumenta considerablemente el coste de inversión y con ello las tasas de retorno respecto a la mejora energética conseguida.
- De forma particular destaca comentar el análisis de los resultados de dos casos en los que hay instalada la misma potencia eólica y fotovoltaica, pero con la diferencia que en el caso primero se dispone de un sistema con almacenamiento intermedio en hidrógeno, con las dimensiones que parecen más óptimas para el caso de la microrred, y en el segundo únicamente se dispone de un sistema fotovoltaico sin aprovechamiento de la energía excedente. Analíticamente, la demanda en el primer caso es del 48,34% frente al 47% en el segundo caso. Por su parte la energía generada desaprovechada es del 10% en el primer caso, frente al 29% en el segundo caso. Analizando los tiempos de retorno, por el contrario son bastante mejores en el segundo caso, que en el primero, siendo de 9 años frente a los 13 del segundo caso. De todas formas, no hay que olvidar que si se tiene en cuenta la vida útil de la instalación, considerada en este caso como 20 años, el interés en ambos es interesante, rondando en el primer caso el 5,14% y en el segundo el 9,89 %.

- Aunque inicialmente se había planteado en el estudio, se ha descartado la consideración de un sistema de cogeneración como sistema de apoyo energético, pues no parece adecuado instalar un sistema de este tipo dentro de la microrred, por lo que el déficit de energía hasta cubrir la demanda solicitada, se obtiene de la red eléctrica.

CONCLUSIONES

Se han realizado diferentes simulaciones dinámicas con los sistemas planteados de generación renovable y almacenamiento de energía intermedio, con el objetivo de aprovechar el excedente de energía generada que en algún momento estos sistemas puedan producir, utilizando para ello sistemas de generación de hidrógeno y producción de electricidad a partir del mismo.

Como conclusiones del análisis de dichas simulaciones se establece la viabilidad técnica de los sistemas planteados y su factibilidad como sistemas aplicables a la demanda de un edificio. Quizá cabe destacar como punto problemático las necesidades de espacio, tanto para los sistemas de generación como de almacenamiento energético, dependiendo de las características y ubicación de los edificios donde sea aplicable.

Por el contrario en cuanto a viabilidad económica, los sistemas de almacenamiento de energía complican la rentabilidad de la misma, ya que alargan los plazos de recuperación de la inversión, y con ello la rentabilidad final.

La previsible bajada de los costes de los mismos a medida que la tecnología alcance su madurez y el constante incremento del coste de la energía eléctrica, permite estimar que estos valores mejoren y hagan también factible la implementación de este tipo de sistemas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto DEPOLIGEN (IPT-120000-2010-22), que es un proyecto científico-tecnológico perteneciente al plan INNPACTO, cofinanciado con Fondos FEDER y subvencionado por el MICINN de España.

NUEVOS MERCADOS Y MODELOS DE NEGOCIO EN MICRORREDES: PROYECTO EMPOWER¹⁴

*Pol Olivella Rosel¹, Rafael Pacheco Bubi, Roberto Villafáfila Robles, Andreas Sumper,
Antoni Sudrià-Andreu*

Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos (CITCEA-UPC), Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de Catalunya. EU d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, C. Comte d'Urgell, 187, Pl. 1, 08036 Barcelona, España. pol.olivella@citcea.upc.edu, r.pachecobubi@gmail.com, roberto.villafafila@citcea.upc.edu, sumper@citcea.upc.edu, sudria@citcea.upc.edu

RESUMEN

El presente artículo analiza el estado del arte de los micromercados y presenta el proyecto EMPOWER, cuyo objetivo es la creación de micromercados eléctricos locales en los que la figura del prosumer (productor-consumidor) dispondrá de gran importancia dentro del mercado eléctrico, pues permitirán una mayor eficiencia del sistema eléctrico y una reducción en las emisiones de CO₂. Las tecnologías de la infomación y la comunicación (TICs) son imprescindible para implementar los micromercados. Por ese motivo, también se presenta la arquitectura que se está desarrollando dentro del proyecto, para la que se ha seguido el Smart Grid Architecture Model (SGAM).

Palabras clave: *Micromercados, prosumer, recursos energéticos distribuidos, redes inteligentes*

INTRODUCCIÓN

Al día de hoy, el principal problema de los actuales mercados eléctricos basados en el sistema de *pool* es la participación de generadores de electricidad mediante fuentes de energía renovables sin costes de operación, tales como turbinas eólicas o sistemas fotovoltaicos. Dichos generadores ofrecen energía a precio cero esperando que el precio de casación sea mayor que cero. Cuando la cantidad de energía a precio cero no es significativa, el precio permanece similar al precio sin generadores mediante energías renovables. Sin embargo, en caso de que la energía ofrecida por generadores sin costes de operación sea igual o superior a la energía consumida, el precio de casación es igual a cero y los generadores renovables no pueden recuperar su inversión inicial. Esta situación aparece en países donde ha habido un despliegue de la generación renovable significativa. A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra los precios del Mercado Diario Ibérico del 2 de febrero de 2013 donde el precio de la energía fue cero desde la hora 3 hasta la hora 18 de dicho día.

¹⁴ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

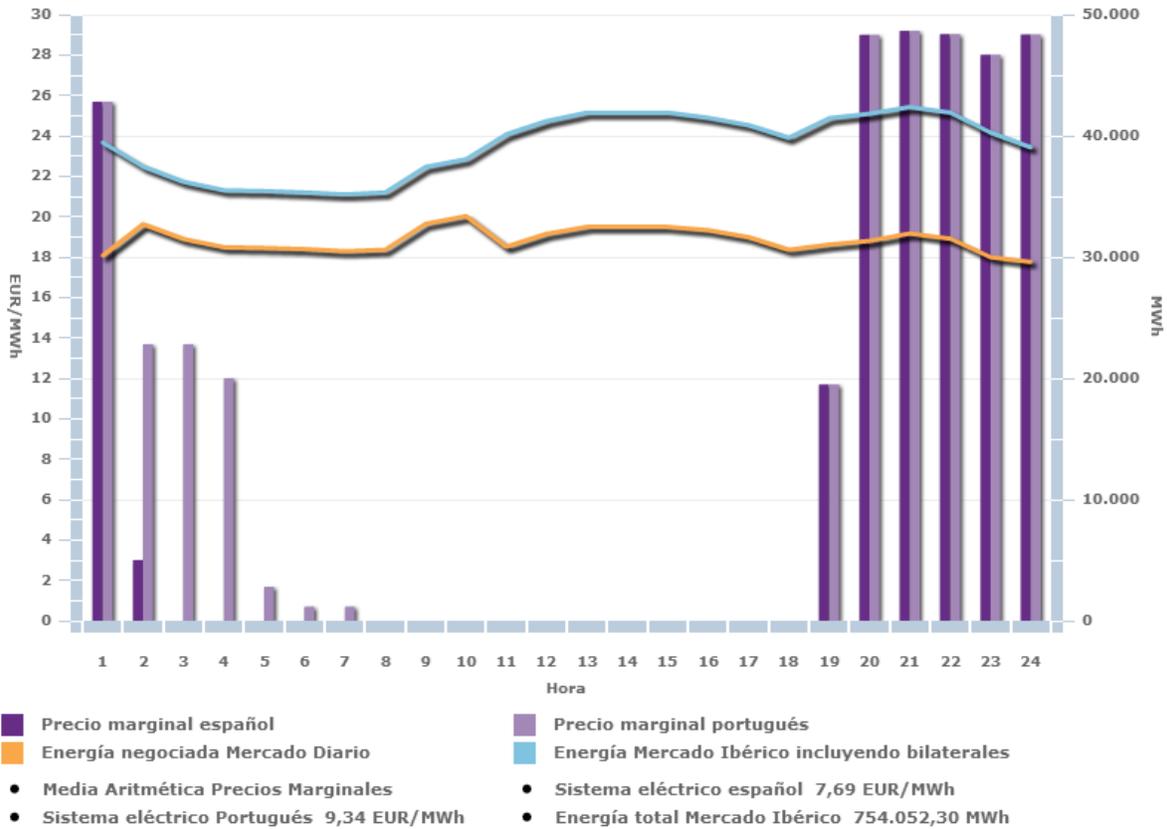


Figura 1. Energía negociada y precio de la energía del Mercado Diario Ibérico 2 de febrero del 2013.
Fuente: OMIE. Precio horario del mercado diario

Además, otro problema de los mercados eléctricos es que las restricciones de la red provocan que las configuraciones establecidas en el mercado no sean técnicamente factibles. Debido a esta situación el precio final de la energía aumenta en los mercados técnicos.

Hay diferentes propuestas para resolver los problemas de la integración en el mercado de los generadores renovables. La solución tradicional consiste en expandir las redes para asegurar el transporte y distribución de energía. Sin embargo, esta solución suele ser cara y complicada de llevar a cabo, debido a la creciente oposición social: efecto *NIMBY* (*Not In My Back Yard*), también conocido como efecto *SPAN* (*Sí, Pero Aquí No*). La alternativa consiste en la creación de micromercados, que tienen en cuenta las restricciones de la red, evitando así ineficiencias en el mercado al por mayor. Además, como la escala del problema en un micromercado es menor, se puede calcular el flujo de cargas óptimo.

MICROMERCADOS ELÉCTRICOS

Un micromercado es la unión de generadores locales y demandas de una comunidad (*"neighbourhood"*) que permite resolver las restricciones de la red de forma local. Además, un micromercado puede permitir la creación de ofertas de compra y de venta de energía en el mercado al por mayor considerando las restricciones de la red.

Los procedimientos de casación podrían ser: cooperativos, basados en costes, o competitivos, basados en ofertas de compra y de venta. La ventaja de los procedimientos basados en costes es que el gestor del micromercado (agregador) podría determinar fácilmente la configuración mínima de operación, pero con el inconveniente de que en caso de haber varios propietarios generadores se puede manipular fácilmente el sistema si alguno de los generadores declara costes diferentes a los reales. Por otro lado, la ventaja de un sistema competitivo es que cada generador no tendría necesidad de declarar costes y el punto de operación se determinaría en función de ofertas de compra, de venta y del punto de conexión a red, si se consideran las restricciones de la red. El inconveniente de un sistema competitivo reside en que haya un generador con gran participación en el mercado que condicione la participación del resto de participantes. En resumen, los sistemas de cooperación parecen ser más apropiados para sistemas con propietarios únicos y los sistemas competitivos serían más adecuados para sistemas con varios propietarios con suficiente participación que eviten posiciones predominantes.

La estructura de los micromercados presenta la ventaja de permitir la integración de diferentes propietarios con total privacidad a diferencia de los sistemas de control centralizado. Asimismo, los beneficios de los micromercados en sistemas de distribución son:

- Implementación de flujos de cargas óptimos para reducir costes y pérdidas.
- Se pueden operar las unidades de almacenamiento de forma óptima considerando restricciones económicas y técnicas.
- Disponen de una mayor resiliencia, pudiendo adaptarse fácilmente a situaciones inesperadas.
- La calidad de suministro puede aumentar con controles locales.
- Las características de los micromercados son:
- Estimulan la competencia y no son discriminatorios.
- El sistema puede participar en mercado al por mayor mediante un agente de mercado virtual.
- Los objetivos de los compradores y vendedores son estrictamente económicos.
- La subasta general que debe ser enviada al mercado al por mayor puede incluir las restricciones del mercado con tal de asegurar un punto de casación factible.
- La respuesta de la demanda puede ser implementada en el micromercado y los agentes de mercado pueden enviar ofertas a los micromercados.
- Los micromercados dependen de:
- La configuración de los sistemas de potencia local.
- El objetivo de los accionistas involucrados.
- Las características de los mercados participantes.
- Y los factores que influyen en el diseño de los micromercados son:
- Grado de competitividad: un gran participante puede controlar el precio de la energía sin tener en cuenta al resto de participantes.
- Horizonte de negociación: el mercado diario requiere gran precisión en las previsiones. Por otro lado, los mercados en tiempo real, en una escala de minutos, son un mecanismo de equilibrio.
- Intervalos de envío: los intervalos cortos de envío reducen las desviaciones de la energía prevista.
- Coste de la estructura para los participantes.
- La generación y el consumo coordinado puede realizarse orientado a conseguir diferentes objetivos, como pueden ser:
- Apoyo de nivel de tensión.

- Control de frecuencia.
- Provisión de reserva de potencia activa.
- Servicios complementarios.

PROYECTO EMPOWER

La creación de micromercados eléctricos locales para promover la figura del *prosumer* (productor-consumidor) y de las microrredes en las redes inteligentes es el principal objetivo del proyecto europeo iniciado en enero de 2015 y con nombre EMPOWER: Local Electricity Retail markets for Prosumer Smart Grid Power Services. Este proyecto se encuentra en el marco el Horizonte 2020 (H2020), que tiene como objetivo la construcción de un escenario energético con bajas emisiones de CO₂ y con una mayor participación de las redes inteligentes, y está financiado por la Comisión Europea y supervisado por la *Innovation and Networks Executive Agency*.

El consorcio está integrado por las siguientes entidades: *Schneider Electric*, referencia en el control de la energía eléctrica y automatizaciones industriales; *SmartIO-Smart Innovation Østfold*, que gestiona el NCE (*Norwegian Center of Expertise*), clúster de empresas e instituciones académicas con foco en los mercados energéticos; *eSmart*, que desarrolla soluciones IT; la distribuidora noruega *Fredrikstad Energi Nett, FEN*; la *University of St. Gallen, UNISEG*, con experiencia en el desarrollo de modelos de negocio; el *Centro de Innovación Tecnológica* de la *Universidad Politécnica de Cataluña, CITCEA-UPC*, con experiencia en los ámbitos de la mecatrónica y la enertrónica; *Malta Intelligent Energy Management Agency, MIEMA*, agencia energética que centra su investigación en promover la eficiencia energética y la integración de energías renovables; y *New En Projects GmbH*- subsidiaria del grupo *Diersch & Schröder (DS)*, compañía energética con divisiones en el mundo del petróleo, energías renovables y servicios IT.

El *know-how* de estas ocho entidades se unirá para desarrollar y verificar los micromercados eléctricos, incluyendo el modelo de negocio, los métodos de operación que promuevan la microgeneración y la participación activa de los *prosumers*, proporcionando un beneficio más repartido de todos los conectados a las redes locales y microrredes.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA LAS ESPECIFICACIONES DE COMUNICACIÓN

La propuesta del proyecto EMPOWER permite a los *prosumers* organizarse de forma eficiente para el cambio a una generación de energía distribuida, operando en un mercado abierto y competitivo. La propuesta coloca a los *prosumers* coordinados en el centro de un futuro modelo de mercado eléctrico. De este modo, los micromercados serán de gran importancia en el futuro.

En un futuro los *prosumers* dispondrán de mejoras en términos de flexibilidad, lo cual seguramente se traducirá en una mayor democratización del mercado eléctrico. El aumento en el control de la demanda propia y un fácil acceso a la información del mercado harán posible un cambio rápido entre importaciones y exportaciones de energía en un ámbito local.

En el proyecto se tiene como tema principal el diseño de nuevos modelos de negocio y roles en el mercado eléctrico de un *Smart Energy Service Provider (SESP)* que serviría como una entidad legal que combina la función de agregador de los *prosumers* y un rol de servicio. El *SESP* facilita, dentro de una comunidad, la generación, consumo y almacenamiento de energía mediante el uso de tecnologías de la información y la comunicación.

Esto se puede ver ilustrado en la parte derecha de la Figura 2, donde se muestran los principales elementos que requiere el *SESP* en el micromercado local: nube de control (control cloud), nube de medida (metering cloud) y todos los sistemas y tecnologías necesarios para su funcionamiento. La parte izquierda de la Figura 2 muestra las soluciones tecnológicas a emplear para la medida y control de los diferentes perfiles de los potenciales participantes en el micromercado: consumidor doméstico o industrial, con o sin cargas gestionables, con o sin generación propia, sistemas de almacenamiento, vehículos eléctricos.

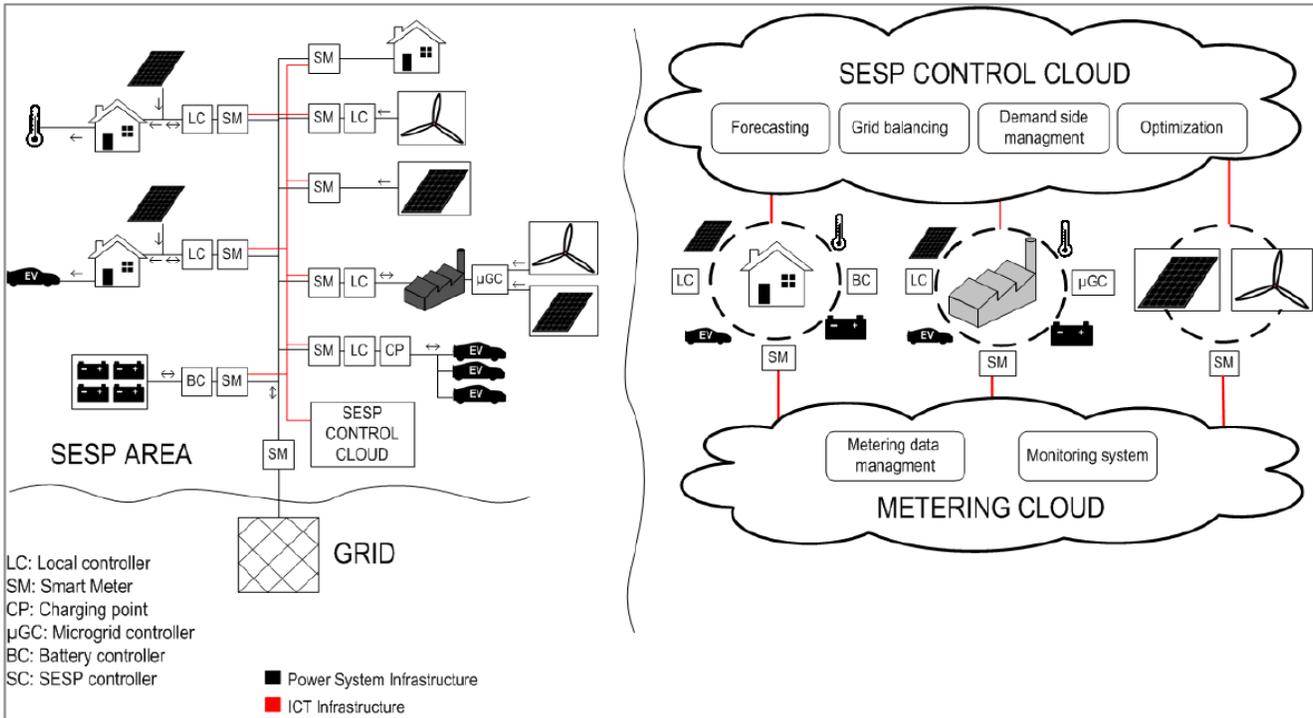


Figura 2. Esquema conceptual del proyecto EMPOWER

Para desarrollar el esquema conceptual representado en la Figura 2, se requiere el uso de las tecnologías de la comunicación y la información (TICs) y el establecer protocolos de comunicación eficientes. Para la definición de la arquitectura de comunicación a emplear se basa en SGAM (*Smart Grid Architecture Model*), un sistema de arquitectura tridimensional (ver Figura 3) que permite la representación de los elementos esenciales, participantes e interacciones en una Smart Grid. Los tres ejes de SGAM son:

- Zonas: los niveles jerárquicos de administración de energía del sistema.
- Dominios: que cubren la cadena de conversión de la energía eléctrica.
- Capas de interoperabilidad.

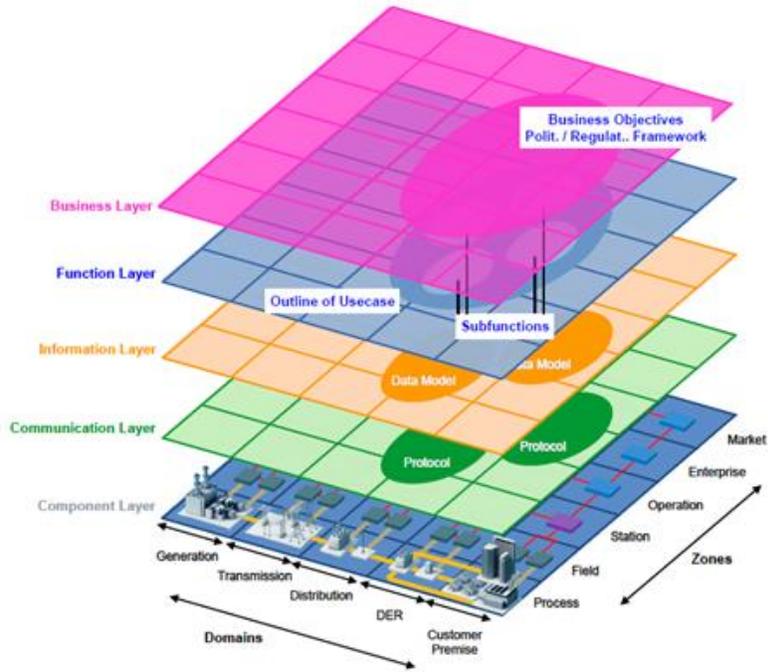


Figura 3. Smart Grid Architecture Model (SGAM)

Siguiendo el modelo SGAM, se ha definido para el proyecto la arquitectura de comunicación que se muestra en la Figura 4:

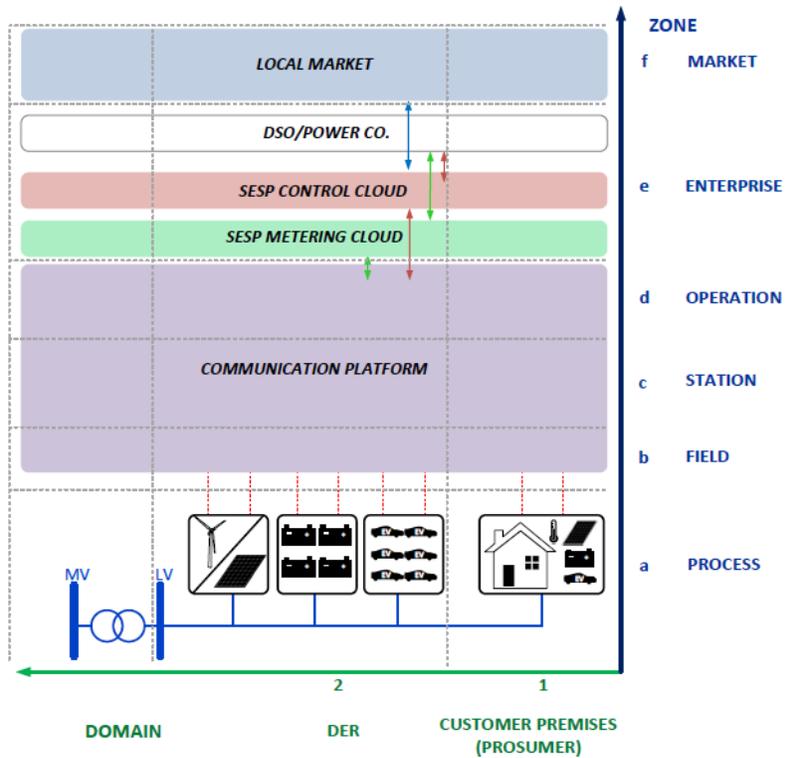


Figura 4. Arquitectura de comunicación basada en SGAM utilizada en el proyecto EMPOWER

El primer nivel de la arquitectura, Zona a – Process, es el lugar donde se produce el intercambio de energía y donde se encuentran los participantes en el micromercado: consumidores y recursos energéticos distribuidos (*DER* en inglés).

La plataforma de comunicaciones está situada en el segundo nivel, que corresponde a las Zonas b, c y d (Field, Station y Operation, respectivamente), y su responsabilidad es la de recibir información de los diferentes equipos y transmitir dicha información a un sistema *SESP*, y viceversa, que llegue la información desde el *SESP* hacia los participantes. En esta plataforma es donde se encuentra el equipamiento instalado para la medida (contadores inteligentes) y el control de los participantes.

La plataforma de comunicaciones interactúa con dos *nubes*, una de medida y otra de control, a la que tienen acceso el *SESP* y la empresa propietaria de la red de distribución donde se encuentran conectados los participantes. Esto se corresponde con la Zona e – Enterprises del diagrama.

Finalmente, se encuentra la Zona f – Market, en el cual el *SESP* realizará la casación económica del micromercado en base a la información de que dispone, tanto de la red local como del mercado central. En base a los resultados, establecerá las consignas que serán enviadas a los participantes.

CONCLUSIONES

El despliegue de los recursos energéticos distribuidos y las microrredes mejorarán la eficiencia global del sistema eléctrico. En un entorno liberalizado, el precio de la energía eléctrica se establece en mercados. El desarrollo de micromercados puede permitir una mayor participación de los usuarios y *prosumers*, así como facilitar la resolución de restricciones técnicas que surjan resultado de los mercados eléctricos centralizados. El proyecto EMPOWER está proponiendo como deben de ser estos micromercados y los requisitos técnicos para llevarlo a cabo.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto EMPOWER ha recibido financiación del programa Horizon 2020 Research and Innovation de la Unión Europea con el Grant Agreement No 646476. (EMPOWER project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme under Grant Agreement No 646476).

REFERENCIAS

M. Ampatzis, P.H Nguyen, and W. Kling. Local electricity market design for the coordination of distributed energy resources at district level. In Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES, pages 1–6. IEEE, 2014.

E. Buchmann, S. Kessler, P. Jochem, and K. Bohm. The costs of privacy in local energy markets. In Business Informatics (CBI), 2013 IEEE 15th Conference on, pages 198–207. IEEE, 2013.

W. Cox and T. Considine. Energy, micromarkets, and microgrids. Grid-Interop 2011, 2011

T. Cui, Y. Wang, S. Nazarian, and M. Pedram. An electricity trade model for microgrid communities in smart grid. In Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES, pages 1–5. IEEE, 2014.

W El-Baz and P Tzscheutschler. Co-simulation of a smart home model based on a micro electricity market. In Fifth German-Austrian IBPSA Conference, 2014

EMPOWER project, <http://empowerh2020.eu/>

D. Geelen, M. Vos-Vlamings, F. Filippidou, A. van den Noort, M. van Grootel, H. Moll, A. Reinders, and D. Keyson. An end-user perspective on smart home energy systems in the powermatching city

demonstration project. In Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, pages 1–5. IEEE, 2013.

P. Nyeng, K. Kok, S. Pineda, O. Grande, J. Sprooten, B. Hebb, and . Nieuwenhout. Enabling demand response by extending the european electricity markets with a real-time market. In Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, pages 1–5. IEEE, 2013.

EMPLAZAMIENTO Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE NUEVAS FUENTES DE ERNC, EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, CONSIDERANDO OBJETIVOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES¹⁵

Rodrigo Castro Gonzalez¹, Luís García Santander¹, Lorena Pradenas²

- (1) Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Chile
rodrigocastro@udec.cl; luis.garcia@udec.cl
- (2) Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Industrial, Chile
lpradenas@udec.cl

RESUMEN

Para responder a la creciente demanda energética en el mundo, se ha vuelto prominente la incorporación de nuevas fuentes de generación a base de energías renovables (ER) en los sistemas de distribución (SD). Esta tendencia mundial, supone un escenario futuro en el cual se espera existan altos impactos técnicos, económicos, sociales y medioambientales. Es así, como en el presente trabajo, se propone una metodología basada en algoritmos genéticos (AG) que permita emplazar de manera eficiente en los SD las nuevas fuentes de ER o también denominadas generación distribuida (GD). Se define una función objetivo que minimiza los costos totales del sistema, se evalúa su aceptación social y se disminuyen tanto sus pérdidas técnicas como su impacto medioambiental. El algoritmo propuesto se ensayó en red standard IEEE de 33 barras. El análisis de su desempeño muestra ser altamente eficaz en la resolución del problema, obteniendo resultados satisfactorios.

Palabras Claves: *Algoritmo Genético, Emplazamiento Óptimo, Metaheurística, Generación Distribuida.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la incorporación de nuevas fuentes de generación distribuida (GD) a base de energías renovables (ER), se ha vuelto una solución prominente para satisfacer la creciente demanda energética en el mundo. Se sabe que una alta penetración de esta GD tiene impactos en aspectos técnicos, económicos, sociales y medioambientales. En este escenario, se hace necesario generar herramientas que ayuden a incorporar y explotar, de manera adecuada, esta GD. Entre ellos podemos por ejemplo, determinar aquel emplazamiento que permita reducir las pérdidas en los sistemas de distribución (SD). El emplazamiento de GD, puede ser formulado como un problema de optimización, permitiendo la utilización de diversas metodologías con diferentes objetivos. En general, las metodologías que se encuentran en la literatura, se dividen en tres categorías: métodos analíticos, métodos computacionales y métodos de inteligencia artificial. Los autores *Tan, Hassan et al.(2013)*, *Upadhyay & Sharma (2014)*, *Shukla et al. (2010)* y *Moradi & Abedini (2012)* consideran para emplazamiento óptimo, técnicas asociadas a algoritmos genéticos (AG), algoritmos de enjambre de partículas (PSO), donde buscan minimizar las

¹⁵ Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto MIGEDIR: Microrredes con Generación Distribuida de Renovable (código 713RT0468), del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
This work has been partially supported by MIGEDIR: Microgrids with Renewable Distributed Generation (project 713RT046), funded by the Science and Technology for Development Iberoamerican Program (CYTED).

pérdidas técnicas presentes en la red. Por otro lado *Doagou-Mojarrad et al. (2013)* plantean un problema multiobjetivo el cual se resuelve a través de un algoritmo evolutivo híbrido, el cual minimiza las pérdidas energéticas totales, el costo energético total y la emisión total de contaminantes. En *Aman et al. (2013)* y *Babaei et al. (2014)*, también se propone un enfoque multiobjetivo, basado en un algoritmo PSO y NSGA_II respectivamente. Por otro lado *Charles & Odero (2013a)* propone una metodología híbrida (GA/PSO) y en *Charles & Odero (2013b)* éste se combina con un análisis de sensibilidad en las barras para acotar la búsqueda.

Se observa que las investigaciones apuntan a resolver el emplazamiento y dimensionamiento óptimo de unidades de GD en SD desde un punto de vista técnico y económico, olvidando los impactos sociales y medioambientales que los sistemas eléctricos conllevan.

El presente artículo, propone una metodología basada en un AG, para resolver el emplazamiento y dimensionamiento óptimo de unidades de GD en SD considerando restricciones técnicas, económicas, sociales y medioambientales.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Como se presentó en la sección anterior, el problema se resolvió mediante un AG. Este, se debió combinar con la herramienta de flujo de potencia MATPOWER (Zimmerman et al., 2011) y formular un problema de optimización, considerando, junto con las restricciones operacionales, objetivos técnicos, económicos, sociales y medioambientales.

A continuación en ecuación (1) se describe la función objetivo $F_{obj}(x)$ que representa el costo total asociado al sistema que debe minimizarse. Por su parte, las ecuaciones (2), (3) y (4) muestran en detalle cada una de las subfunciones que la componen.

$$F_{obj}(x) = (CP(x) + CMA(x)) * AS(x) \quad (1)$$

Con:

$CP(x)$: Costo total de las pérdidas en potencia activa del sistema, determinado por ecuación (2):

$$CP(x) = C_p * \sum_{i=1}^{N_{br}} R_i * |I_i|^2 \quad (2)$$

$CMA(x)$: Costo total de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del sistema, determinado por ec. (3):

$$CMA = SCC * \left(\sum_{j=1}^{NDG} (P_{DGj} * E_{DGj}) + \sum_{i=1}^{NG} (P_{Gi} * E_{Gi}) \right) \quad (3)$$

$AS(x)$: Aceptación social del sistema (Aravena et al., 2012), determinada por ecuación (4):

$$AS(x) = \begin{cases} 0,8 & \text{si } \left(\frac{\sum_{i=1}^{NER} S_{ERi}}{\sum_{k=1}^{NG} S_{Gk} + \sum_{j=1}^{NDG} S_{DGj}} \right) \geq 0,9 \\ 1,0 & \text{si } \left(\frac{\sum_{i=1}^{NER} S_{ERi}}{\sum_{k=1}^{NG} S_{Gk} + \sum_{j=1}^{NDG} S_{DGj}} \right) < 0,9 \end{cases} \quad (4)$$

Sujeto a las siguientes restricciones de operación:
Regulación de tensión dada por ecuación (5):

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{m\acute{a}x}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (5)$$

Operación en isla expresada en ecuación (6):

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_{DG}} S_{DG_i} + \sum_{k=1}^{N_G} S_{G_k} < \sum_{j=1}^{N_{bus}} S_{L_j} \quad (6)$$

Potencia compleja suministrada por las unidades de GD, dada por la ecuación (7):

$$S_{DG_i}^{min} \leq S_{DG_i} \leq S_{DG_i}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{DG} \quad (7)$$

Emplazamiento de las unidades de GD, expresada en ecuación (9):

$$1 \leq loc_i \leq N_{bus}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{DG} \quad (9)$$

Balace de la potencia compleja del sistema dada por ecuación (10):

$$\sum_{i=1}^{N_{bus}} (S_{G_i} - S_{L_i} + S_{DG_i}) - S_p = 0 \quad (10)$$

ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO

Para resolver el problema formulado en la sección anterior, se implementó en MATLAB^{MR}, un AG combinado con la herramienta de flujo de potencia MATPOWER Zimmerman et al. (2011). Se utiliza operador de recombinación *crossover*, sumado a un operador de mutación. Luego, se aplica selección probabilística de los hijos, y finalmente, se utiliza estrategia de reemplazo generacional. Para asegurar una adecuada velocidad de convergencia y capacidad de búsqueda del AG propuesto, la parametrización de éste fue realizada en base a las experiencias encontradas en la literatura Hutter et al. (2007) y Thalbi (2009).

En Figura 1, se presenta un diagrama del pseudocódigo del AG implementado.

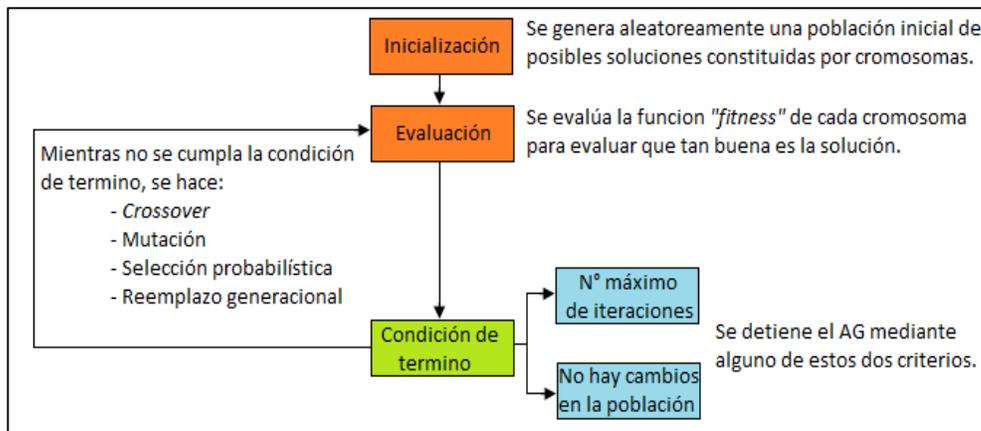


Figura 1. Diagrama del pseudocódigo del algoritmo genético. (Elaboración propia)

La representación de la solución utilizada en este estudio, se presenta en Figura 2.

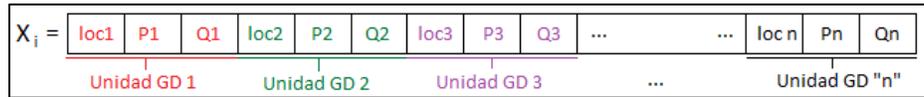


Figura 2. Codificación cromosómica de las soluciones. (Elaboración propia)

De Figura 2, se observa que cada solución se representa como un vector X_i con $N_{DG} \times 3$ componentes, donde "i" es la cantidad de elementos en la población y N_{DG} es el número de unidades a emplazar. Cada una de estas unidades se representa además, dentro del vector, mediante 3 genes que corresponden a sus variables de decisión. Estas son: Barra a la cual se conecta (loc n), Potencia activa inyectada (P_n) y Potencia reactiva inyectada (Q_n). De donde, "n" corresponde al total de unidades de GD a emplazar en el sistema.

En Tabla 1, se resumen los restantes parámetros del AG implementado.

Tabla 1. Parámetros del AG implementado (Hutter et al., 2007).

Tipo de Selección	Tipo de Crossover	Proporción de Crossover	Tipo de Mutación	Proporción de Mutación
Estocástica uniforme	Heurístico	1,2	Uniforme	0,01

Para el criterio de término, se utiliza ecuación propuesta en Hutter et al.(2007), la cual determina el número máximo de generaciones en función del caso de estudio en el cual se implemente el algoritmo.

$$N^{\circ} \text{ máx. de gen.} = 200 * \sqrt{N_{Bus}} \quad (13)$$

Se asume un valor de 1×10^{-12} para la función de tolerancia Hutter et al. (2007). Los resultados determinan un tamaño de la población de 50 cromosomas por generación Shukla et al. (2010). Tamaño que asegura una búsqueda exhaustiva del algoritmo, en tiempos computacionales eficientes.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El algoritmo propuesto, se ensayó para diferentes instancias en red standard IEEE de 33 barras. Para evaluar el efecto de incluir la potencia reactiva como variable de decisión, se definieron dos tipos de unidades de GD. Estas, se presentan en Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de unidades de GD a emplazar en la red de prueba del IEEE

Tipo	Red de 33 barras	
	Límites de P [MW]	Límites de Q [MVAR]
1	$0 \leq P \leq 5$	$Q = 0$
2	$0 \leq P \leq 5$	$0 \leq Q \leq 3$

Las instancias propuestas se evaluaron en dos etapas. En la primera, con el fin de evaluar el desempeño del algoritmo mediante una comparación con la literatura, sólo se consideraron objetivos técnicos y económicos. Posteriormente, en una segunda, luego de haber evaluado el desempeño del algoritmo propuesto, se incorporaron los objetivos sociales y medioambientales.

Para esta segunda etapa, en la cual se requirió incorporar los objetivos sociales y medioambientales, se definieron los tipos de unidades de GD, a base de ER, a considerar. Junto con esto, se definieron además

las emisiones de CO_{2e} correspondientes a cada uno de estas unidades y por la red general original *Baldwin & Post (2006)*. Esto, se resume en Tabla 3.

Para poder evaluar económicamente los impactos medio ambientales, las emisiones de CO_{2e} se valorizaron en 35 [US\$/Ton] *Litterman (2013)*, junto con esto, los impactos técnicos se evaluaron valorizando las pérdidas en potencia en 438.000 [US\$/MW/año] *Shukla et al. (2010)*.

Además, para evaluar los impactos sociales, a partir de ecuación (4) de la sección anterior, la aceptación social se valorizó en un valor correspondiente al 20% de los costos totales *Aravena et al. (2012)*.

Tabla 3. Emisiones de CO₂ de las unidades a base de ER y del sistema. Baldwin & Post (2006)

Fuente de energía de la unidad	Emisión de CO _{2e} [Ton/MW/Año]
Solar	508,1
Eólica	35,04
Hidráulica de pasada	43,8
Hidráulica de embalse	87,6
Biomasa	814,68
SD en general	8077,4

RED DE 33 BARRAS DEL IEEE

El sistema de prueba es una red radial que consta de una subestación principal y una carga total de 3,72 [MW] y 2,3 [MVAR]. El flujo de potencia entrega pérdidas de 216 [kW] y 143 [kVAR].

Los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo propuesto en la primera etapa, se presentan y son comparados con los de la literatura en Tabla 4.

En Figura 3 se presenta el perfil de voltaje para cada una de las instancias ensayadas en la primera etapa de evaluación.

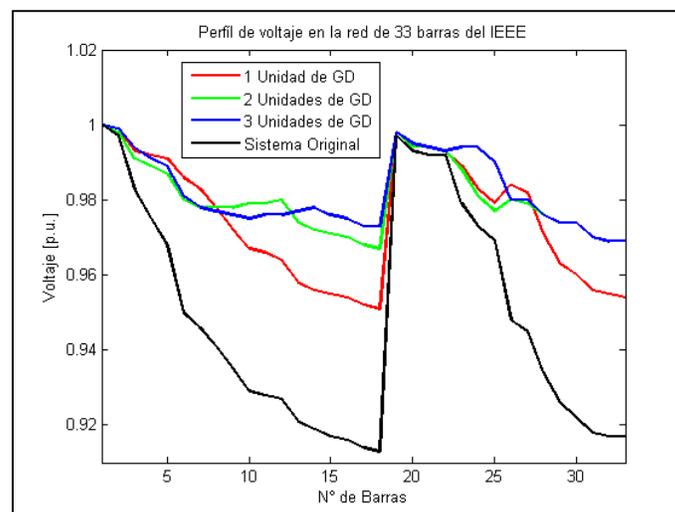


Figura 3. Perfil de voltaje en red de 33 barras

En Tabla 4 se presenta la dimensión y ubicación óptima entregada por el AG propuesto para cada unidad de GD (Tipo 1 y 2) a emplazar. Se observa que, emplazando una unidad de GD de tipo 1 se obtiene una reducción de pérdidas del 48,2% en potencia activa y 51,1% en potencia reactiva. En cambio, si se

emplaza una unidad de GD tipo 2, se obtiene una reducción de pérdidas del 69,7% en potencia activa y 65,0% en potencia reactiva. Además se observa que, cuando se emplazan tres unidades de GD a la vez, si son del tipo 1, se alcanza una reducción de pérdidas similar a las obtenidas emplazando una sola unidad del tipo 2. Sin embargo, si son del tipo 2, la reducción de pérdidas es del 91,5% en potencia activa y 86,0% en potencia reactiva. Junto con esto, en Tabla 4, se verifica la efectividad del AG propuesto, al presentar iguales o mejores resultados que las metodologías disponibles en la literatura, siendo sólo superado por el método híbrido PSO/IA *Kansal et al. (2016)*. Por otro lado, en Figura 3 se presenta el perfil de voltaje para cada una de las instancias propuestas con las unidades de GD tipo 2. Se observa que el perfil de voltaje mejora al ir aumentando el número de unidades de GD emplazadas en el sistema. Los resultados obtenidos en la etapa 2 para las instancias de la red de 33 barras, considerando objetivos técnicos, económicos, sociales y medioambientales, se presentan en Tabla 5.

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos para la red de 33 barras

Metodología	N° Barra	Tamaño del PMGD		Pérdidas		Reducción de pérdidas	
		P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]	P [%]	Q [%]
Heurística (Shukla et al., 2010)	6	2.490	0	0.1328	-	38.5	-
GA (Shukla et al., 2010)	6	2.380	0	0.1326	-	38.6	-
Grid Search (Aman et al., 2013)	6	2.591	0	0.1120	0.0830	48.1	41.9
GA/PSO(Moradi & Abedini, 2012)	32	1.200	0	0.1034	-	52.1	-
	16	0.863	0				
	11	0.925	0				
PSO 2 (Charles & Otero, 2013a)	6	2.551	1.755	0.0680	0.0550	68.5	61.5
GA-IPSO(Charles & Otero, 2013a)	6	2.563	1.739	0.0662	0.0554	69.3	61.2
PSO/IA (Kansal et al., 2016)	13	0.873	0	0.0117	-	94.41	-
	24	1.186	0				
	30	1.431	0				
PSO/IA (Kansal et al., 2016)	12	0	0.436	0.0285	-	86.49	-
	13	0.828	0				
	30	1.114	1.036				
AG propuesto Tipo 1	6	2.575	0	0.1041	0.0700	48.2	51.1
AG propuesto Tipo 2	6	2.545	1.750	0.0615	0.0500	69.7	65.0
AG propuesto Tipo 1	12	0.970	0	0.0861	0.0600	60.1	58.0
	30	1.114	0				
AG propuesto Tipo 2	7	1.960	1.018	0.0356	0.0300	83.5	79.0
	30	0.642	0.774				
AG propuesto Tipo 1	14	0.754	0	0.0715	0.0500	66.9	65.0
	30	1.071	0				
	24	1.100	0				
AG propuesto Tipo 2	30	0.953	0.752	0.0184	0.02	91.5	86.0
	13	0.712	0.531				
	24	1.328	1.076				

Tabla 5. Resultados en la segunda etapa de evaluación para la red de 33 barras.

Cantidad de PMGD	Tipo de unidad	N° Barra	Tamaño de los PMGD [MW + jMVAR]	Costo total anual [MUS\$]	Aceptación Social anual [MUS\$]	Costo anual medio-ambiental [MUS\$]	Costo pérdidas anuales [MUS\$]	Ahorro anual en pérdidas eléctricas [MUS\$]
Uno	H. de pasada	6	2,560 + j1,809	0,302	0,0756	0,351	0,0269	0,067
Dos	H. de pasada	27	2,194 + j1,244	0,509	0,1018	0,487	0,0219	0,073
	Biomasa	15	0,243 + j0,346					
Tres	H.de pasada	13	0,723 + j0,134	0,180	0,0450	0,213	0,0121	0,082
	Biomasa	24	0,216 + j0,916					
	Solar	30	1,375 + j1,344					

La evolución porcentual de los costos medioambientales, costos técnicos y beneficios económicos en la red de 33 barras, al ir incorporando unidades de GD a base de ER, se presenta en Figura 4.

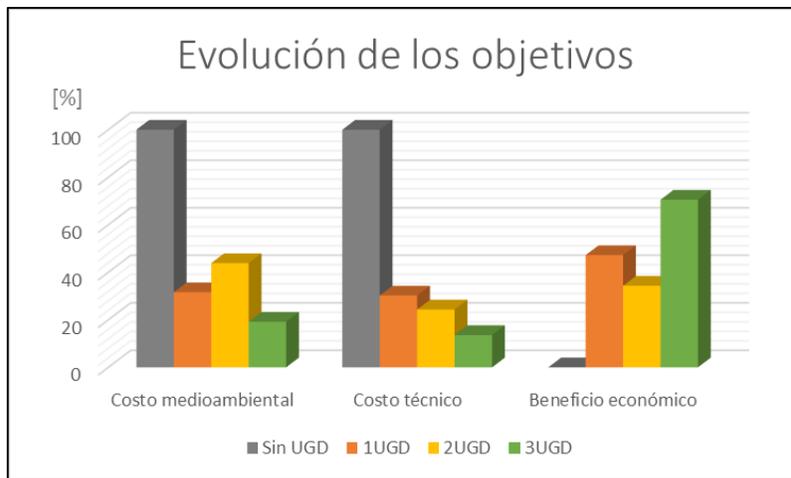


Figura 4. Evolución de los costos y beneficios al incorporar unidades de GD

El porcentaje de generación de las nuevas fuentes de GD al ir incorporándose en a la red de 33 barras, se presenta en Figura 5, además, los resultados obtenidos son comparados en términos técnicos y medioambientales en Tabla 6.

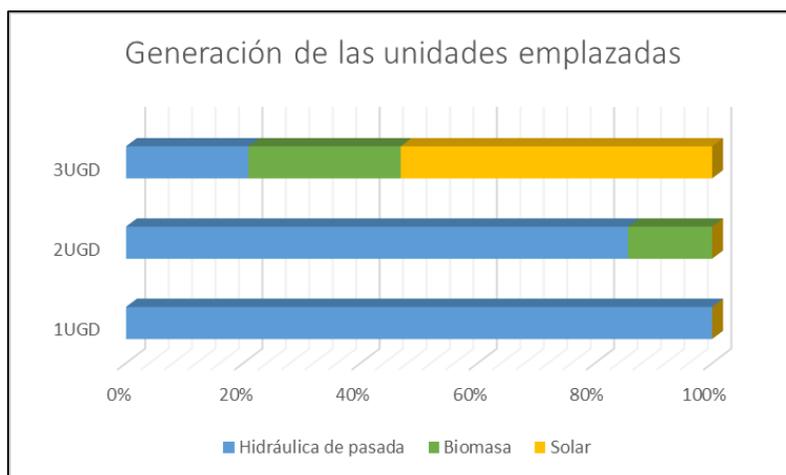


Figura 5. Porcentaje de generación de unidades de GD al incorporarse en la red de 33 barras

Respecto de la segunda etapa de evaluación, la Figura 4 presenta la evolución porcentual de las consideraciones técnicas, económicas, sociales y medioambientales. En esta, se observa que al incrementar el número de unidades de GD a base de ER, los costos técnicos disminuyen. Respecto de los costos medioambientales y los beneficios económicos, se observa que estos también disminuyen, salvo en el caso que se emplazan dos unidades de GD. Junto con esto, en Figura 5, se presenta como varía la participación porcentual, en las inyecciones del sistema, de las unidades de GD en cada una de las instancias. En esta se observa que la unidad de biomasa posee una participación aproximada de un 25-20% en las inyecciones y no sufre variaciones considerables, por otro lado, se aprecia que la unidad hidráulica de pasada posee una participación relevante de aproximadamente un 80% de las inyecciones, hasta el momento en que se incorpora la unidad solar la cual alcanza un porcentaje de participación aproximado de un 60% de las inyecciones, dejando así a la unidad hidráulica de pasada en un porcentaje aproximado del 20%. Finalmente en Tabla 6 se presenta la dimensión y ubicación óptima entregada por el AG propuesto, al incorporar las consideraciones sociales y medioambientales en la resolución del problema. En esta se observa que la ubicación óptima prácticamente no varía en comparación con la entregada en la etapa 1. Sin embargo, no es posible afirmar lo mismo respecto de la potencia inyectada por las unidades de GD la cual si varía tanto en potencia activa como reactiva. Además, se conserva que, en la etapa 2, las pérdidas en potencia son mayores a las obtenidas en la etapa 1 y que las emisiones de CO₂ son considerablemente menores a las de la etapa 1.

Tabla 6. Comparación de los resultados de la etapa 1 con los de la etapa 2 para la red de 33 barras

Metodología	N° Barra	Tamaño del PMGD		Pérdidas en potencia		Emisiones de CO ₂ [Ton/Año]
		P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]	
GA propuesto Tipo 2 Etapa 1	6	2,545	1,750	0,0615	0,050	30,570
GA propuesto Tipo 2 Etapa 2	6	2,560	1,809	0,0620	0,050	10,017
GA propuesto Tipo 2 Etapa 1	7	1,960	1,018	0,0356	0,030	34,910
	30	0,642	0,774			
GA propuesto Tipo 2 Etapa 2	27	2,194	1,244	0,0500	0,040	13,928
	15	0,243	0,346			
GA propuesto Tipo 2 Etapa 1	30	0,953	0,752	0,0184	0,02	31,120
	13	0,712	0,531			
	24	1,328	1,076			
GA propuesto tipo 2 Etapa 2	13	0,723	0,134	0,0280	0,02	6,097.4
	24	0,216	0,916			
	30	1,375	1,344			

CONCLUSIONES

La metodología propuesta permitió emplazar de manera eficiente nuevas fuentes de GD, a base de ER, considerando la minimización de los costos totales del sistema, evaluando su aceptación social y disminuyendo tanto sus pérdidas técnicas como su impacto medioambiental.

Los resultados respecto a la primera etapa validan que al considerar una adecuada selección del GD, un emplazamiento óptimo y una apropiada potencia inyectada, se pueden reducir las pérdidas y mejorar el perfil de voltaje. Por otro lado, respecto de la segunda etapa, se observa que se logró una relación solidaria entre todos los objetivos, manteniendo la aceptación social, al disminuir las pérdidas técnicas y los impactos medioambientales.

Finalmente, se concluye que la metodología propuesta es una balanceada herramienta para la integración eficiente nuevas fuentes de generación, a base de ER, en los SD, sin embargo, es necesario evaluar el desempeño de ésta en instancias reales.

ANEXOS

Nomenclatura de ecuaciones 2 – 10:

- C_p : Costo anual por MW perdido en las líneas.
- N_{br} : Número total de líneas.
- R_i : Resistencia de la i -ésima línea.
- I_i : Corriente que circula por la i -ésima línea.
- SCC : Costo anual por tonelada de CO₂ emitida.
- N_{DG} : Número total de unidades de GD a emplazar en el sistema.
- P_{DGj} : Potencia activa, en MW, generada por la j -ésima unidad de GD emplazada.
- E_{DGj} : Toneladas anuales emitidas, por MW generado, de la j -ésima unidad de GD emplazada.
- N_G : Número total de unidades generadoras del sistema.
- P_{Gi} : Potencia activa, en MW, generada por la i -ésima unidad generadora del sistema.
- E_{Gi} : Toneladas anuales emitidas, por MW generado, de la i -ésima unidad generadora del sistema.
- N_{ER} : Número total de las unidades de GD, a base de ER, a emplazar.
- S_{ERi} : Potencia aparente generada por la i -ésima unidad de GD, a base de ER, emplazada en el sistema.
- S_{Gk} : Potencia aparente generada por la k -ésima unidad generadora del sistema.
- S_{DGj} : Potencia aparente generada por la j -ésima unidad de GD emplazada en el sistema.
- V_{min} : Corresponde al mínimo valor de voltaje, en por unidad, es decir, 0,94.
- $V_{máx}$: Corresponde al máximo valor de voltaje, en por unidad, es decir, 1,06.
- V_i : Corresponde al valor de voltaje, en por unidad, de la i -ésima barra del sistema.
- S_{DGi} : Potencia aparente generada por la i -ésima unidad de GD a emplazar.
- S_{Lj} : Potencia aparente demandada por las cargas en la j -ésima barra del sistema.
- S_{Gk} : Potencia aparente generada por la k -ésima unidad generadora del sistema
- S_{DGi}^{min} : Mínima capacidad de generación de potencia compleja de la i -ésima unidad de GD a emplazar.
- $S_{DGi}^{máx}$: Máxima capacidad de generación de potencia compleja de la i -ésima unidad de GD a emplazar.
- S_{DGi} : Potencia compleja generada por la i -ésima unidad de GD a emplazar.
- N_{bus} : Número total de barras del sistema.
- loc_i : Barra en la cual se conecta la i -ésima unidad de GD.
- S_{Gi} : Potencia compleja inyectada, por las unidades generadoras, en la i -ésima barra del sistema.
- S_{Li} : Potencia compleja demandada, por las cargas, en la i -ésima barra del sistema.
- S_{DGi} : Potencia compleja inyectada, por las unidades de GD, en la i -ésima barra del sistema.
- S_p : Pérdida total de potencia compleja en las líneas del sistema.

REFERENCIAS

- Aman, M. M., Jasmon, G. B., Bakar, A. H. A., & Mokhlis, H. (2013). A new approach for optimum DG placement and sizing based on voltage stability maximization and minimization of power losses. *Energy Conversion and Management*, 70, 202–210. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.015>
- Aravena, C., Hutchinson, W. G., & Longo, A. (2012). Environmental pricing of externalities from different sources of electricity generation in Chile. *Energy Economics*, 34(4), 1214–1225. <http://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.11.004>
- Babaei, E., Galvani, S., & Nejabatkhah, F. (2014). Optimal Placement of DG Units Considering Power Losses Minimization and Voltage Stability Enhancement in Power System. *International Journal of Automation and Control Engineering*, 3(1), 1. <http://doi.org/10.14355/ijace.2014.0301.01>
- Baldwin, S., & POST. (2006, October). Carbon footprint of electricity generation. Parliamentary Office of Science and Technology. London. Retrieved from www.parliament.uk/post
- Charles, J. K., & Odero, D. N. A. (2013a). A GA/IPSO based approach for system loss reduction and voltage profile improvement employing arithmetic crossover and mutation. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) ISSN*, 5(7), 0975–5462.
- Charles, J. K., & Odero, D. N. A. (2013b). Effects of distributed generation penetration on system power losses and voltage profiles. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP) ISSN*, 3(12).
- Doagou-Mojarrad, H., Gharehpetian, G. B., Rastegar, H., & Olamaei, J. (2013). Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm. *Energy*, 54, 129–138. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.043>
- Hutter, F., Hoos, H. H., & Stützle, T. (2007). Automatic algorithm configuration based on local search. In *AAAI (Vol. 7, pp. 1152–1157)*. Retrieved from <http://www.aaai.org/Papers/AAAI/2007/AAAI07-183.pdf>
- Kansal, S., Kumar, V., & Tyagi, B. (2016). Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 75, 226–235. <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.002>
- Litterman, B. (2013). What is the right price for carbon emissions? *Regulation, The CATO Review of Business & Government*, 36(2), 38–43.
- Moradi, M. H., & Abedini, M. (2012). A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 34(1), 66–74. <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.08.023>
- Shukla, T., Singh, S., & Naik, K. (2010). Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(3), 94–106.
- Tan, W.-S., Hassan, M. Y., Majid, M. S., & Abdul Rahman, H. (2013). Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 626–645. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.039>
- Thalbi, E.-G. (2009). *METAHEURISTICS, From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, Inc.
- Upadhyay, S., & Sharma, M. P. (2014). A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 47–63. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057>
- Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, C. E., & Thomas, R. J. (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12–19. <http://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>