



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR

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

62

DIRECTOR GENERAL

Dr. Luis Bérriez Pérez

EDITOR JEFE

M.Sc. Mario Alberto Arrastía Ávila

EDITORES

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez
Ing. Jorge Santamarina Guerra

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Luis Bérriez Pérez
M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez
Ing. Otto Escalona Pérez
Ing. Miguel González Royo
Ing. Dolores Cepillo Méndez

DISEÑO Y COMPOSICIÓN

Alejandro F. Romero Ávila

WEB MASTER

Jesús Guillermo Gil Delgado

RELACIONES PÚBLICAS

Mabel Blanco de la Cruz

CONSEJO ASESOR

Dra. Elena Vigil Santos
Dr. Conrado Moreno Figueredo
Dr. José Guardado Chacón
Dr. Deny Oliva Merecio
Dra. Dania González Couret
Lic. Bruno Henríquez Pérez
Lic. Ricardo Bérriez Valle
M.Sc. Mario A. Arrastía Ávila

FOTO DE PORTADA

M.Sc. Mario A. Arrastía Ávila

Eco Solar, no. 62 / 2017

Revista Científica de las
fuentes renovables de energía

Octubre-Diciembre, 2017

ISSN-1028-6004

RNPS-2220



CETER



DIRECCIÓN

Calle 20, No. 4113, e/ 18A y 47
Playa, La Habana, Cuba
TEL.: (53) 72040010; 72062061
E-MAIL: madelaine@cubasolar.cu
HTTP://www.cubasolar.cu



CONTENIDO

Cálculo de producción de biogás en las condiciones de Cuba.....	3
Dr.C. Roberto Sosa Cáceres, Dr.C. Alfredo Curbelo Alonzo y Dr.C. Milagros Acacia Sausedo Nardo	
Aumento de la producción de ajo y tomate por el uso de efluentes de biodigestores en la producción porcina cubana.....	7
M. Sc. Teresa Fraser Gálvez, M. Sc. José Luis de la Fuente Arzolla, Dr. C.Roberto Sosa Cáceres, M. Sc. Clara García Ramos e Ing. Francisco Martínez	
Mitigación del cambio climático a nivel local. Contribución de experiencias de energización rural con energías renovables.....	12
M. Sc. Ing. Inocente Costa Pérez, M. Sc. Ing. Omar Gutiérrez Benítez, M. Sc. Ing. Pedro Rafael Pretel Olite	
Simulación de sistemas híbridos fotovoltaico/biogás/diésel con inyección a red en la ronera central, empleando la herramienta computacional Homer.....	17
Ing. Inoel Águila Bernal, M. Sc. Mayra Guzmán Villavicencio, M. Sc. Carlos Rafael Soto Castellón	
Evaluación de la eficiencia energética del generador de vapor de la Empresa de Productos Lácteos Las Tunas.....	24
Ing. María de los Ángeles Campos Fernández, Ing. Laura Mislady Vega Pérez, Ing. Winliet Carmentate Álvarez y M. Sc. Anaicel Góngora González	
Propuesta de recuperación de un agua residual de la Empresa Ernesto Ché Guevara.....	29
Sorángel Rivas Romero, M. Sc. Aimet Rómulo Rodríguez, Ing. Gerardo Menés Vuelta	

editorial
cubasolar

Cálculo de producción de biogás en las condiciones de Cuba

Por Dr.C. Roberto Sosa Cáceres*, Dr.C. Alfredo Curbelo Alonzo**
y Dr.C. Milagros Acacia Sausedo Nardo***

* Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, Cubaenergía
rsosa@cubaenergia.cu

** Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, Cubaenergía
acurbelo@cubaenergia.cu

***Grupo Empresarial Ganadero. Ministerio de la Agricultura (Minag). Cuba
msaucedo.oc@geg.cu

Resumen

Son varias las instituciones universitarias, institutos de investigaciones, organizaciones no gubernamentales y otras, que se dedican al estudio, investigación o desarrollo de la tecnología del biogás en Cuba; por tanto, es común que tengan un acercamiento diferente en cuanto a metodologías, índices o indicadores a utilizar en los cálculos y otros aspectos. El objetivo de esta metodología es brindar un criterio aceptado y generalizado a la hora de realizar cálculos relacionados con los residuos de la ganadería vacuna, porcina y avícola. Los índices, en porcentajes de emisión de excretas más orina, resultaron: 5, 9 y 0,05 para porcino, vacunos y avícolas, respectivamente, mientras que los índices en $m^3/kgsv$ para la producción de biogás, fueron, 0,45, 0,25 y 0,06, en igual orden.

Palabras clave: metodología, índices, biogás, porcino, avícola, vacunos.

Calculation of biogas production under the conditions of Cuba

Abstract

There are several university institutions, research institutes, non-governmental organizations and others that are dedicated to the study, research or development of biogas technology in Cuba; therefore, it is common that they have a different approach in terms of methodologies, indexes or indicators to be used in the calculations and other aspects. The objective of this methodology is to provide an accepted and generalized criteria when making calculations related to the residues of cattle, swine and poultry. The indices, in percentages of emission of excreta plus urine, were: 5, 9 and 0,05 for pigs, cattle and poultry, respectively, while the indices, in $m^3/kgsv$ for the production of biogas production, were 0,45, 0,25 and 0,06 in the same order.

Key words: methodology, indicators, biogas, pig, poultry, cattle.

Introducción

Son varias las instituciones universitarias, institutos de investigaciones, organizaciones no gubernamentales y otras, que se dedican al estudio, investigación o desarrollo de la tecnología del biogás en Cuba, por tanto, es

común que tengan un acercamiento diferente en cuanto a metodologías, índices o indicadores a utilizar en los cálculos y otros aspectos.

El objetivo de esta metodología es brindar un criterio aceptado y generalizado a la hora de realizar cálculos relacionados

Cálculo de producción de biogás en las condiciones de Cuba

con los residuos de la ganadería vacuna, porcina y avícola. Estos criterios son el resultado de varios años de experiencias de instituciones de investigación en las condiciones de Cuba, y han sido aceptados como índices por investigadores y técnicos del área de biogás, energías renovables y medio ambiente. Estos resultan de inapreciable ayuda a la hora de elaborar proyectos de biogás y brindar información lo más exacta posible a técnicos y decisores en las ramas agropecuarias.

Desarrollo

Las producciones potenciales de biogás en cada especie animal son diferentes. A su vez, estas dependen de diversos factores como: peso vivo del animal, categoría, tipo de alimentación, temperatura media ambiental y tiempo de retención hidráulica, entre otras. En esta Metodología, elaborada para el Primer ATLAS de bioenergía de Cuba, se presentan las estimaciones de potenciales de biogás en

las condiciones de Cuba, con los sistemas de alimentación más utilizados y sus tecnologías de manejo y crianza. En la Tabla 1 se muestran los principales índices para el cálculo de las producciones de biogás en el sector porcino cubano.

Indicadores de producción de biogás

Las estimaciones de las producciones de biogás están en función de los sólidos volátiles presentes en las excretas, que son los que se convierten durante el proceso de digestión anaerobia en biogás, tal como aparece en la Tabla 2.

Los porcentajes de residuos (excretas + orina) en porcino fueron tomados a partir de experiencias de más de 20 años de trabajo del Instituto de Investigaciones Porcinas, y que se continúan actualizando [de la Fuente, 2018], [Suárez, 2018], [Sosa, 2007]. Los datos de vacunos y avícolas en las condiciones de Cuba fueron suministrados por

Tabla 1. Índices para el cálculo de la producción de residuos y biogás

Especie	Categorías por especie, CE	Símbolo	Peso vivo Promedio PVP, kg	Tiempo en la categoría	Observaciones
Porcino	Reproductora	Crep	140	4 años	Datos tomados del Manual de Procedimientos Técnicos para la Crianza Porcina, 2016
	Semental	Csem	150	2 años	
	Cochinato	Ccto	130	90 días	
	Cochinata	Ccta	130	90 días	
	Ceba	Cceb	55	120 días	
	Lechones (as)	Clec	40	97 días	
	Preceba	Cpre	30	49 días	
	crías	Ccri	7	26...33 días	
Avícola	Reproductora	Arp	2	72 semanas	
	Ponedora	Apo	1,6	78 semanas	
	Reemplazos	Are	0,77		
Ganado Vacuno	Vaca lechera o de engorde	Vle	300		
	Toros engorde	Vtor	400		
	Torete	Vete	250		
	Terneros (as)	Vter	50		
	Añojas	Vaas	45		
	Novillas	Vnov	70		

Tabla 2. Cantidades de excretas e índices de producción de biogás en porcinos, vacunos y avícolas

	Símbolo	Unidades	Porcino	Vacuno	Avícola	Observaciones
Porcentaje de excretas más orina	% R	%	5	9	9,15	Se refiere a promedios. Datos inferidos a partir de los informes enviados por las Divisiones porcina [Cruz, 2017], ganadería [Lamotte, 2017], y avícola [Díaz, 2017]
Porcentaje de sólidos volátiles	% SV	%	12	13	17	
Índice de producción de biogás	Bsv	m ³ /kgsv	0,45	0,25	0,460	Producción media de biogás de los sólidos volátiles presentes en las excretas

los institutos de CIMAGT y el IIA, en el marco del proyecto internacional Bioenergía.

Base de cálculo y resultados

Las bases para el cálculo y los resultados de la producción de residuos y biogás en porcino, avícola y vacunos, aparecen en las tablas 3, 4, 5 y 6, respectivamente.

Téngase en cuenta que las producciones de biogás que se expresan en la Tabla 4 son directamente proporcionales a los volúmenes de excretas o residuos que depositan los animales, y que las categorías van en orden creciente, de crías a reproductoras y sementales. En el caso de los porcinos, los pesos en dependencia de las categorías son significativos.

Tabla 3. Fórmulas para la producción de biogás y para el cálculo de los volúmenes de residuos; se entiende como residuos las excretas más orina

Variable de cálculo	Símbolo	Unidades	Fórmula de cálculo	Observaciones
Volumen de residuos	Rev	kg/día;	$Rev = NC * PVP * \% R$	Residuos como excretas más orina [Sosa, 2018]
Producción diaria de biogás	Pbio	m ³ /día	$Pbio = Rev * \% SV * Bsv$	Teniendo en cuenta los SV [Sosa, 2018]

NC: Número de cabezas.

Tabla 4. Volúmenes de residuos orgánicos (excretas más orina) y producción de biogás en porcino

Símbolo	Categoría de la especie, CE	Volúmen de residuos, kg/día	Producción diaria de biogás, m ³ /día	Observaciones
Crep	Reproductora	7	0,038	Datos inferidos a partir del Manual de Buenas Prácticas para la Producción [Rueda, 2016]
Csem	Semental	7,5	0,040	
Ccto	Cochinato	6,5	0,035	
Ccta	Cochinata	6,5	0,035	
Cceb	Ceba	2,75	0,015	
Clec	Lechones	2	0,011	
Cpre	Preceba	1,5	0,008	
Ccri	crías	0,35	0,002	

Tabla 5. Volúmenes de residuos orgánicos (excretas más orina) y producción de biogás en avícola

Símbolo	Categoría de la especie, CE	Volúmen de residuos, kg/día	Producción diaria de biogás, m ³ /día	Observaciones
Arp	Reproductora	No procede*	No procede*	*Camada Datos tomados del informe de la División avícola [Díaz, 2017]
Apo	Ponedora	0,10	0,014	
Are	Reemplazos	0,10	0,10	

Tabla 6. Volúmenes de residuos orgánicos (excretas más orina) y producción de biogás en vacunos

Símbolo	Categoría de la especie, CE	Volúmen de residuos, kg/día	Producción diaria de biogás, m ³ /día	Observaciones
Vtor	Toros engorde	36	0,90	Datos tomados de informe de la División ganadería vacuna [Lamotte, 2017]
Vle	Vaca lechera o de engorde	27	0,88	
Vete	Torete	22,5	0,71	
Vnov	Novillas	6,5	0,20	
Vter	Terneros (as)	4,5	0,15	
Vaas	Añojas	4,05	0,13	

Como se puede apreciar en la Tabla 6, existen diferencias muy marcadas entre las categorías y los volúmenes de residuos debido al peso vivo, que en orden creciente van desde las añejas hasta las vacas lecheras y toros de engorde.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de los volúmenes de residuos, producciones de biogás, sólidos totales y sólidos volátiles, fueron asimiladas de la bibliografía internacional y corroboradas en las condiciones de Cuba Sosa, 2018 .

Conclusiones

La metodología propuesta fue aceptada por los especialistas de las producciones porcinas, vacunas y avícolas de Cuba.

Los índices y fórmulas sirven como instrumentos a la hora de calcular los volúmenes de residuos orgánicos y las producciones de biogás.

Recomendaciones

Actualizar la metodología cuando el desarrollo o cambio en las tecnologías así lo requiera en cada una de las ramas.

Agradecimientos

Los autores reconocen el apoyo ofrecido y los datos brindados por la M.Sc. María Tamara Cruz Silbeto, del Instituto de Investigaciones Porcinas; a la M.Sc. Yudith

Lamothe Crespo, del Centro de Investigaciones para el mejoramiento Animal de la Ganadería Tropical; a la Lic. Bárbara Liané Díaz Rivero, del Instituto de Investigaciones Avícolas, y al Dr.C. Ernesto Barrera Cardoso, de la Universidad de Sancti Spíritus.

Bibliografía

- CRUZ, TAMARA *et al.* (2017). «Informe de trabajo de la División Tecnológica Porcina al proyecto Bioenergía 2017», pp 4.
- DÍAZ RIVERO, BÁRBARA LIANE *et al.* (2017). «Informe de trabajo de la División tecnológica avícola al proyecto Bioenergía 2017», pp 3.
- DE LA FUENTE, JOSÉ LUIS *et al.* (2018). «Potencial energético de los residuales porcinos en sementales de la raza Yorkshire y Landrace», en Revista Computarizada de Producción Porcina. Volumen 25, número1, pp. 48 – 53.
- LAMOTHE, YUDITH *et al.* (2017). «Informe de trabajo de la División Tecnológica de ganadería vacuna al proyecto Bioenergía 2017», pp 5.
- RUEDA, MADELYN, *et al.* (2016). *Manual de Buenas Prácticas para la Producción Porcina en Cuba*. La Habana: Ed. Edipor, 2016. (117 pp.). ISBN 9789597208297. Pp. 72-78.
- SOSA CÁCERES, ROBERTO y LUIS CEPERO CASAS (2018). «Capítulo 2. Biogás». En: Atlas Bioenergía. Cuba. La Habana: Ed. Cubaenergía», 2018. Pp 18-44.
- SUAREZ, JESÚS, *et al.* (2018). «Evaluación del potencial del biogás en Cuba», en Pastos y Forrajes. (2018). abril- junio volumen 4, número 2, pp. 125-132.

Aumento de la producción de ajo y tomate por el uso de efluentes de biodigestores en la producción porcina cubana

Por **M. Sc. Teresa Fraser Gálvez***, **M. Sc. José Luis de la Fuente Arzolla****, **Dr. C. Roberto Sosa Cáceres*****,
M. Sc. Clara García Ramos**** e **Ing. Francisco Martínez*******

* Instituto de Suelos, Cuba.

teresa.fraser@isuelos.cu

**Instituto de Investigaciones Porcinas, Cuba.

jlfuente@iip.co.cu

*** Centro para la Gestión de la Información y el Desarrollo de la Energía. Cubaenergía.

rsosa@cubaenergia.cu

**** Investigador Auxiliar. Instituto de Suelos

***** Investigador Auxiliar. Instituto de Suelos

Resumen

La introducción de fertilizantes de origen orgánico resulta de suma importancia en los momentos actuales, en que se dan pasos para cambiar la llamada agricultura moderna, por la agricultura biológica o agroecológica, mucho más sana para los frutos y vegetales y menos agresiva para los suelos. En ese sentido, el objetivo principal de este trabajo fue evaluar la efectividad del efluente de un biodigestor para el tratamiento de aguas residuales porcinas en los cultivos de ajo y tomate. El experimento se desarrolló en la Finca la Inesita, en la comunidad Pedro Pi, donde existe un convenio de producción porcina. Los resultados mostraron incrementos de producción en 1,84 y 19,4 kg/ha en ambos cultivos con la incorporación de los efluentes del biodigestor de aguas residuales porcinas para 6 y 8 t/ha, que no son solamente el resultado de un mayor aporte de nutrientes a los cultivos sino que son producto de las mejoras en las propiedades químicas del suelo, receptor de estos materiales orgánicos. Como conclusiones se arriba a las siguientes: El efluente líquido no presenta signos de contaminación por microorganismos patógenos, aunque se recomienda su monitoreo constante. Los impactos ambientales obtenidos confirmaron que el uso de estos efluentes constituye un alternativa viable y sostenible para la agricultura cubana, y la aplicación de dicho efluente, como enmienda orgánica, incidió positivamente en el comportamiento de los indicadores químicos del suelo y contribuyó de manera favorable en la productividad agrícola de los cultivos de ajo y tomate, así como en el incremento de los rendimientos.

Palabras clave: Efluentes, biodigestor, productividad agrícola, ajo, tomate.

Increase in garlic and tomato production due to the use of biodigester effluents in Cuban pig production

Abstract

The introduction of organic fertilizers is of great importance at the current time, when steps are taken to change the so-called modern agriculture, organic or agroecological agriculture, much healthier for fruits and vegetables and less aggressive for soils. In this sense, the main objective of this work was to evaluate the effluent effectiveness of a biodigester for the treatment of swine wastewater in garlic and tomato crops. The experiment was carried out at Finca La Inesita, in Pedro Pi community, where there is a swine production agreement. The results showed increases in production of 1.84 and 19.4 kg/ha in both crops with the incorporation of effluents from the pig biodigester for 6 and 8 t/ha, which are not only the result of a greater contribution of nutrients to the crops, but they are product of the improvements in the chemical

properties of the soil as receptor of these organic materials. As conclusions we arrive at the following: The liquid effluent does not show signs of contamination by pathogenic microorganisms, although its constant monitoring is recommended; The environmental impacts obtained confirmed that the use of these effluents constitutes a viable and sustainable alternative for Cuban agriculture, and finally, the application of this effluent, as an organic amendment, had a positive effect on the behavior of the chemical indicators of the soil and contributed to favorable way in the agricultural productivity of the garlic and tomato crops, as well as in the increase of the yields.

Key words: Effluents, biodigester, agricultural productivity, garlic, tomato.

Introducción

Los suelos agrícolas sufren un desequilibrio en el mantenimiento de niveles estables de materia orgánica (MO), debido a diversas razones (excesivo laboreo, producción intensiva, uso de fitosanitarios, deforestaciones irracionales, incendios forestales, pastoreo inadecuado, etc.), ocasionando una disminución de la fertilidad natural del horizonte superficial, más acentuada en regiones con poca producción de biomasa.

Como consecuencia de ello se presentan problemas ambientales tales como mayor erosión, poca infiltración y menor capacidad de almacenamiento de agua, dificultad para el desarrollo radical y deficiente establecimiento de poblaciones microbianas benéficas [Dalal y Mayer, 1986], [Azevedo *et al.*, 2003].

Las excretas de animales, tenidas por muchos como un contaminante ambiental, pueden generar recursos valiosos mediante su procesamiento anaeróbico en biodigestores, de tal forma que, al reciclarse, parte de la energía y de sus nutrientes favorezcan la sustentabilidad de la producción animal y, al mismo tiempo aprovechar los desechos orgánicos [Soánes, 2008].

Desde el punto de vista agrícola, con este proceso se obtiene un material maduro, estable e higienizado, con un alto contenido en materia orgánica, que puede ser utilizado sin riesgo en la agricultura por ser inocuo y no contener sustancias fitotóxicas, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de las plantas, [Soliva, 2006].

La introducción de fertilizantes de origen orgánico resulta de suma importancia en los momentos actuales en que se dan pasos para cambiar la llamada agricultura moderna, por la agricultura biológica o agroecológica [Funes, 2009].

El uso de abonos orgánicos constituye una práctica común en la agricultura de Cuba y varios países del mundo, debido fundamentalmente al papel crucial que estos cumplen en la nutrición de los cultivos agrícolas y su influencia en la actividad fisiológica de las plantas [Medina, 2004].

Con el objetivo de encontrar soluciones alternativas a esta problemática, se desarrolló un experimento en la Finca la Inesita, en las áreas de cultivo de Pedro Pi, para evaluar la efectividad del efluente de biogás en los cultivos de ajo y tomate.

Materiales y métodos

La investigación en los cultivos de ajo (*Allium sativum*) var. chileno y tomate (*Lycopersicon esculentum*), var. L43, se desarrollaron sobre un suelo ferralítico rojo y ferralítico amarillento, respectivamente [Instituto de Suelos, 1999],

ubicado en la Finca la Inesita, de Pedro Pi, en el municipio San José de las Lajas, provincia de Mayabeque. El esquema experimental aparece en la Fig. 1.

Se caracterizó, el efluente cuyos resultados se muestran en la Tabla 1, y se realizó el análisis de suelo antes de la aplicación del efluente y al final de la cosecha de ambos cultivos, cuyas características se reflejan en la Tabla 2.

El efluente estuvo constituido mayormente por la materia orgánica oxidable, Ca, N y P, condicionado por la alta carga orgánica presente en las excretas en relación directa con la base alimentaria; es de destacar que aunque los niveles de potasio hallados en el efluente son bajos, fueron comparados con los abonos orgánicos más utilizados en la agricultura. Su contenido en este tipo de residuos se considera relativamente bajo, debido a que este elemento es muy soluble en agua y gran parte se pierde una vez depurada el agua, fenómeno que fue descrito anteriormente por [Soliva, 2000] y [Shober *et al.*, 2003].

La relación C/N del efluente se encuentra dentro del rango informado por [Shober *et al.*, 2003] para los abonos orgánicos más utilizados en la agricultura y fue similar al encontrado en el humus de lombriz, el cual varía entre 10/1...13/1. Esta baja relación indica que la materia orgánica presente en el efluente, es un material estabilizado y con nivel avanzado de mineralización, lo que evidencia que este residuo es una fuente potencial de nutrientes.

El pH mostró valores cercanos a la neutralidad, lo que puede propiciar que cuando el efluente se aplique al suelo actúe como corrector de este parámetro, en los casos en que sus magnitudes estén por debajo o por encima del neutro [Azevedo *et al.*, 2001]. Este aspecto es importante, ya que a valores de pH cercanos a la neutralidad los macronutrientes tienen alta movilidad en el suelo y su mayor tasa de asimilación por las plantas. Mientras que la absorción de los metales pesados por las mismas se ve limitada, y de esta manera se evita que las plantas absorban niveles extremadamente excesivos o tóxicos de estos elementos, fenómeno que suele ocurrir en plantas desarrolladas en sustratos con pH ácido, como ha sido informado por [Matolva *et al.*, 1989].

La conductividad eléctrica se halló entre los niveles aceptados para este tipo de residuo, por lo que la incorporación de este efluente al suelo no debe influir en el poder de infiltración de las sales ni obstaculizará la absorción, tanto del agua como de otros iones presentes en el suelo, que incidirán directamente en las plantas o cultivos [Seoáñez, 2000].

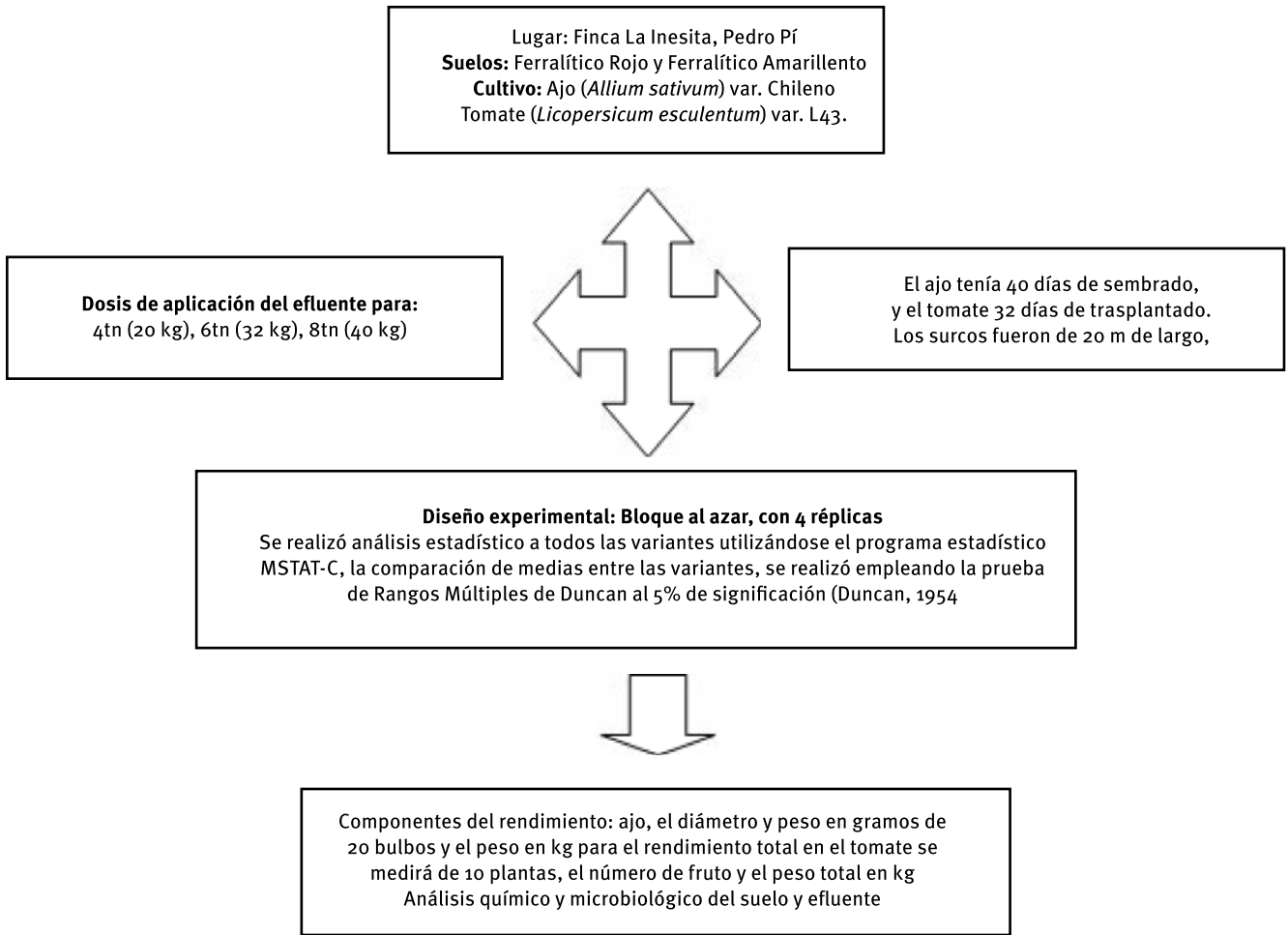


Figura 1. Esquema Experimental del Ensayo de Campo.

Tabla 1. Caracterización química de los efluentes de los biodigestores

Muestra	%						C/N	pH	ms/cm
	M.O	Ca	N	P	Mg	K			
Pedro Pi	48	8,5	2,3	1,6	1,3	0,9	13/1	7,3	1,2
Metales pesados(mg kg ⁻¹ base seca)									
	Cd	Cr	Cu	Co	Ni	Pb	Zn	Mn	
	0,60	7,21	4,20	0,30	0.80	20,9	13,4	23,7	

M.O: Materia orgánica.

Tabla 2. Principales características químicas de los suelos

Momento de muestreo	Tipo de suelo	%	pH	mg.kg ⁻¹		cmol.kg ⁻¹			
		M.O		P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	K
Inicio	Ferralítico Rojo	2,13	7,20	217,57	245,31	10,3	2,20	0,15	1,03
	Ferralítico Amarillento	2.44	7.10	220,22	248.58	9,2	2,00	0,13	1.01
Final	4 t	2,62	7,00	275,32	296,62	10,6	2,10	0,12	1,25
	6 t	2,66	7,00	290,67	298,28	10,8	2,50	0,13	1,30
	8 t	2,88	6,80	295,41	301,25	12,0	2,40	0,12	1,35

M.O: Materia orgánica.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, las concentraciones en los suelos de materia orgánica, fósforo y potasio aumentaron en correspondencia con los incrementos de efluentes del biodigestor.

Es importante puntualizar que en el proceso de digestión anaerobia actúan diversos microorganismos que facilitan la degradación de la materia orgánica, y el efluente estabilizado que se obtiene de este proceso no es putrescible y su contenido en organismos patógenos es nulo o muy bajo.

Esta conversión biológica del sustrato complejo, en el que se encuentra la materia orgánica en suspensión o disuelta, se realiza a través de una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente [Strauss, 1985]; [Cairncross *et al.*, 1990]; [Vives, 2003], [Yamile *et al.*, 2010]; todo lo anterior evidencia que el proceso de depuración mediante digestión anaerobia operó en el período de estudio de manera eficiente, lo que se refleja con lo mostrado en la Tabla 3.

Evaluación agronómica del efluente

El efluente fue evaluado como enmienda orgánica en el cultivo de ajo y tomate para demostrar científicamente sus comportamientos en los indicadores de rendimientos

de ambos cultivos, reflejando en este sentido resultados positivos en cuanto al peso del bulbo, número y peso del fruto con un rendimiento beneficioso de 5,74 y 72,88 kg/ha, respectivamente, con las mayores aplicaciones de efluentes, superando al testigo en 1,84 y 19,4 kg/ha en ambos cultivos.

Medias en una columna con letras distintas, son diferentes significativamente para $p < 0,05$ de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

Las evidencias de los incrementos de producción en 1,84 y 19,4 kg/ha en ambos cultivos, con la incorporación de los efluentes (6 y 8 kg/ha), no son solamente el resultado de un mayor aporte de nutrientes a los cultivos, sino que son producto de las mejoras en las propiedades químicas del suelo, receptor de estos materiales orgánicos [Seoáñez, 2008], [Soliva, 2001].

El uso de los efluentes ha sido probado en varios países y en diferentes cultivos, reportando incrementos en las cosechas y mejoramientos en las propiedades del suelo [Kanware *et al.*, 1993], a diferencia de los fertilizantes químicos que reducen la productividad de la tierra [Narain, 1990]. En Cuba se ha experimentado en cultivos de organopónicos y en el cultivo del frijol con buenos resultados [Negrín, 2012].

Tabla 3. Análisis de microorganismos patógenos en muestras del efluente líquido residual de la planta de biogás La Inesita, en Pedro Pi

Efluente (muestra)	Determinación solicitada			
	Coliformes totales NMP/100ml	Coliformes fecales NMP/100ml	Salmonellasp. (P/A)	Vibrio cholerae (P/A)
1	90	8	Ausente	Ausente
2	92	<1,8	Ausente	Ausente
3	62	<1,8	Ausente	Ausente

NMP: Número más probable.

Tabla 4. Efecto de la aplicación del efluente de la planta de biogás sobre algunos parámetros de rendimientos del cultivo de ajo y tomate

Tratamientos	Ajo			Tomate		
	Diámetro	Peso g (20 bulbos)	Rdto. kg/ha	No. de frutos /planta.	Peso g(10 plantas)	Rdto. kg/ha
Control	5,00 ns	519,44 c	3,90 c	28 b	35,20 b	53,44 c
4 t.ha ⁻¹	5,84 ns	600,43 b	4,50 b	25 c	36,66 b	56,36 b
6 t.ha ⁻¹	6,24 ns	725,25 a	5,44 a	35 a	41,27 a	72,88 a
8 t.ha ⁻¹	6,27 ns	765,21 a	5,74 a	35 a	41,02 a	72,30 a
CV %	15,14	3,91	3,94	4,91	4,48	1,19

Ns: no significativo. Rdto.: Rendimiento.

Conclusiones

El efluente líquido no presenta signos de contaminación por microorganismos patógenos perjudiciales para la salud humana, aunque se recomienda su monitoreo constante.

Los impactos ambientales obtenidos confirmaron que el efluente de las plantas de biogás es una alternativa viable y sostenible para la agricultura cubana.

La aplicación de efluente como enmienda orgánica incidió positivamente en el comportamiento de los indicadores químicos del suelo, y contribuyó de manera favorable en la productividad agrícola de los cultivos de ajo y tomate, así como en el incremento de los rendimientos.

Agradecimientos

Al Dr. C. Alfredo Curbelo Alonso e Ing. Yoel Suárez Lastre por su apoyo y colaboración para la realización de este trabajo. Ellos forman parte del proyecto y con sus experiencias han aportado soluciones que garantizaron el éxito del mismo.

Bibliografía

- AZEVEDO, M.L., L. R. FERRACCIÚ Y L. R. GUIMARAES (2003). «Biosolids and heavy metals in soils», en *Science of Agriculture*, 60:793-806
- AZEVEDO, M.L., A. DE ROCHA, M. R. LIMA Y M. DE POHLMAN, (2001). «Efecto residual do lodo de esgoto alcalinizado em atributos químicos e granulométricos de un cambissolo húmico». *Scientia Agraria*, 2(1-2):87-91.
- CAIRNCROSS, S. Y D. MARA (1990). «Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura». Organización Mundial de la Salud. Ginebra, p 210
- DALAL R. C., R. J. MAYER (1986). «Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile». *Aust. J. Soil Res.* 24: 281-292.
- DUNCAN, D.(1954).«Multiplerange and Multiple Test. Biometric». 1-8, 11-12.
- FUNES-MONZOTE, FERNANDO R. (2009). *Agricultura con futuro. La alternativa agro-ecológica para Cuba*. Estación Experimental Indio Hatuey, Universidad de Matanzas, Cuba.
- INSTITUTO DE SUELOS (1999). «Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba». AGROINFO, MINAGRI. La Habana. P. 64.
- KANWAR, S. H. NAYYAR Y D. WALIA (1993). «Influence of biogas slurry on germination and early seedling growth of bread wheat». *BiogasForum III*. 54:10 – 11.
- MATOLVA, E., G. C.VITTI, Y S. A. DE OLIVEIR (1989). *Avalicao do estado nutricional das plantas: principios y aplicacoes*. Piracicaba. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 201.
- MEDINA, N. (2004).«La biofertilización como alternativa dentro de la Agricultura Sostenible». En: IV Simposio Internacional sobre caracterización y manejo de micorrizas rizosféricas. INCA, La Habana, Cuba, p. 207.
- NARAIN, L. (1990). «Chemical fertilizers polluting land and water but NADEP compost offers solution». *BiogásFórum*. 40: 8 – 12.
- NEGRÍN, A. Y YAMILÉ JIMÉNEZ PEÑA (2012). «Evaluación del efecto agronómico de biosólidos procedentes de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgarisl.*)». INCA, Cultivos Tropicales, vol. 33, no. 2, pp. 13-19, abril-junio. Cuba.
- SEOÁNEZ, C. M. (2000). *Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos*. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona.
- SEOÁNEZ, C. M. (2008). *Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Barcelona: p. 180.
- SHORBER, A., R. C.STEHOUWER, Y K. MACNEAL (2003). «Eon. Farm assessment of biosolid effects on soil and crop tissue quality». *Journal of Enviromentquality*, 32(5):1873-1880.
- SOLIVA, M. (2006). «Aplicación de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbana en la agricultura». IQPC. En: Fórum Internacional sobre tratamiento de lodos de depuradoras. Su minimización, valorización y destino final. Madrid, p. 21.
- VIVES, C. (2003). «Presentación y argumentación de un Sistema de tratamiento de residual de cerdo por fermentación anaeróbica con recuperación de gas» en *Agrosuper*. Gestión Ambiental, p. 34.
- YAMILÉ JIMÉNEZ, L., MILAGROS MARRERO VALDÉS, YANIA PÉREZ, VANIA VIDAL Y A. NEGRÍN (2010). «Caracterización del biosólidos generados por una planta de digestión anaerobia, perspectivas de utilización». *Revista Computarizada de Producción Porcina Volumen 17 (número 1)*.

Mitigación del cambio climático a nivel local. Contribución de experiencias de energización rural con energías renovables

Por **M. Sc. Ing. Inocente Costa Pérez***, **M. Sc. Ing. Omar Gutiérrez Benítez****,
M. Sc. Ing. Pedro Rafael Pretel Olite***

*Departamento de Energía. Dirección Provincial del Ministerio de Economía y Planificación, Cienfuegos.
Delegación de Cubasolar en Cienfuegos.
inocente@depcfg.co.cu

** Departamento de Gestión e Ingeniería Ambiental, Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos.
Delegación de Cubasolar en Cienfuegos.
omar@gestion.ceac.cu, omar1964@nauta.cu

***Programa de Pequeñas Donaciones, Fondo Medio Ambiente Mundial, Programa de las Naciones Unidas
para el Desarrollo, Cuba. Delegación de Cubasolar en Cienfuegos.
rafael.pretel@undp.org

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores desafíos globales. En Cuba se reconoce el cambio climático como uno de los principales problemas ambientales del país. En el año 2005, en la provincia de Cienfuegos existían muchas comunidades rurales localizadas en zonas montañosas y otras zonas de difícil acceso, sin servicio de energía eléctrica mediante el Sistema Electroenergético Nacional (SEN). La baja cobertura, calidad y sostenibilidad de los servicios de energización para alumbrado y cocción de alimentos provocaba el uso intensivo de combustible fósil y de leña para cubrir sus necesidades energéticas, con los impactos ambientales y sociales asociados. En este contexto, fueron diseñados y ejecutados cinco proyectos de energización rural con fuentes de energía renovables en el macizo montañoso Guamuhaya; con el apoyo del Programa de Pequeñas Donaciones (PPD) del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y del Programa de Desarrollo Humano Local (PDHL), el objetivo fue evaluar la viabilidad y sostenibilidad de las experiencias de energización rural en el macizo montañoso Guamuhaya, Cienfuegos, y su contribución a la mitigación del cambio climático a nivel local. Fueron electrificadas con paneles solares 75 viviendas, un albergue y un círculo social, con una potencia instalada total de 16 355 Wp, paralizándose dos grupos electrógenos diésel. Se repararon embalses, tuberías e infraestructura eléctrica de tres mini-hidroeléctricas, se incrementó el tiempo medio de servicio y la calidad de la energía y se disminuyeron los índices de consumo de agua. Se introdujo y generalizó el empleo de prototipo de cocina eficiente de leña en 49 viviendas, eliminando el consumo de 39,96 t/año de leña base seca. En general se logró la eliminación de 162,21 t/año de CO₂ emitidas por conceptos de combustibles domésticos y diesel dejados de consumir. El uso combinado de fuentes de energías renovables (solar fotovoltaica, hidroenergía y biomasa) fue la opción más viable, en las condiciones de las experiencias, para mejorar el servicio de energización de las comunidades, contribuyendo a la mitigación del cambio climático a nivel local. Las experiencias fueron exitosas, validadas a través de indicadores de pertinencia, eficacia, impactos, viabilidad y sostenibilidad. Se lograron impactos significativos sobre el mejoramiento del medio ambiente local y la calidad de vida de los habitantes, en particular las/os niñas/os y mujeres.

Palabras clave: cambio climático, energía renovable, proyecto, energización rural.

Mitigation of climate change. Contribution of experiences of rural energization with renewable energies

Abstract

Climate change is one of the biggest global challenges and in Cuba it is recognized as one of its main environmental problems. The low coverage, quality and sustainability of the energization services in rural communities in the mountain massif Guamuhaaya, it caused the intensive use of fossil fuel and firewood to meet their energy needs, with environmental and social impacts associated. In this context, five projects of rural energization with renewable energies were executed from 2005 onwards with the support of the Small Grants Programme (SGP) of Global Environment Facility (GEF) and the Human Development Programme (PDHL), both of United Nations Development Programme (UNDP). The goal was to assess the viability and sustainability of rural energization experiences and the contribution to mitigate a climate change. 75 houses were electrified with solar photovoltaic systems, 3 minihydropower improved the quality of electric service, and 49 houses introduced a prototype of efficient biomass stove for cooking. The elimination of 162.21 t/year of CO₂ was achieved and the consumption of 39.96 t/year of dry base wood was reduced and the consumption of 39.96 t/year of firewood was reduced. The combined use of renewable energy sources was the most viable option, in the conditions of the experience, to improve an energization services of the community, contributing to mitigate a climate change. The experiences have been successful, validated through indicators of relevance, effectiveness, impact, viability and sustainability.

Key words: methodology, indicators, biogas, pig, poultry, cattle.

Introducción

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y supone una presión adicional para nuestras sociedades y el medio ambiente [ONU, 2017]. Los impactos globales del cambio climático son hoy ampliamente reconocidos por la ciencia [IPCC, 2017].

La Estrategia Ambiental Nacional de Cuba 2016-2020 [Citma, 2016] reconoce el impacto del cambio climático como uno de los principales problemas ambientales del país.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [Cepal, 2016] se plantea como objetivo adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Asimismo, se establece garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, aumentando el uso de fuentes renovables.

En la Conceptualización del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista y Bases del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030: Visión de la Nación, Ejes y Sectores Estratégicos [PCC, 2017], se reconoce a los recursos naturales y el medio ambiente como un eje estratégico. Uno de sus objetivos específicos es elevar la eficiencia energética y el desarrollo de fuentes renovables de energía, lo que contribuye, entre otros beneficios, a reducir la generación de gases de efecto invernadero, a mitigar el cambio climático y a promover un desarrollo económico menos intenso en carbono.

En correspondencia con lo anterior, el 25 de abril de 2017 se aprobó el Plan de Estado Cubano para el Enfren-

tamiento al Cambio Climático, conocido como Tarea Vida [Citma, 2017]. La Tarea 8 de dicho Plan establece implementar y controlar las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. Por otro lado, la Tarea 10 plantea priorizar las medidas y acciones para elevar la percepción del riesgo, y aumentar el nivel de conocimiento y el grado de participación de toda la población en el enfrentamiento al cambio climático.

Muchas de las comunidades rurales en Cuba se localizan dispersas en zonas montañosas y otras zonas de difícil acceso, y no ha sido posible cubrir el servicio de energía eléctrica mediante el SEN debido a factores de viabilidad técnica y económica. La baja cobertura, calidad y sostenibilidad de los servicios de energización para alumbrado, cocción de alimentos y otros usos de estas comunidades provoca el uso intensivo de combustible fósil y de leña para cubrir sus necesidades energéticas, con impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud de las personas.

En este contexto, a partir del año 2005 fueron diseñados y ejecutados cinco proyectos de energización rural con fuentes de energía renovable en el macizo montañoso Guamuhaaya, provincia de Cienfuegos, con financiamiento del Programa de Pequeñas Donaciones (PPD) del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), del Programa de Desarrollo Humano Local (PDHL).

Las experiencias se desarrollaron en las comunidades San Narciso, Cimarrones, Hoyo de Padilla, El Mamey y San

José, con el acompañamiento de la Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (Cubasolar), de la Delegación Territorial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (Citma) de Cienfuegos y del Departamento de Energía de la Dirección Provincial de Economía y Planificación (DPEP) de Cienfuegos.

El objetivo fue evaluar la viabilidad y sostenibilidad de las experiencias de energización rural en el macizo montañoso Guamuhaya, Cienfuegos, y su contribución a la mitigación del cambio climático a nivel local.

Desarrollo

1. Ingeniería de proyectos

Se realizó el análisis puntual en cada una de las comunidades rurales y de las alternativas de energización (electrificación y cocción de alimentos), teniendo en cuenta las recomendaciones para el desarrollo y administración de proyectos de pequeños sistemas de energías renovables y sistemas híbridos de electrificación rural [IEC2004a; IEC, 2004b; IEC, 2004c; IEC, 2005a; IEC, 2005b]. Se estudiaron las posibles soluciones teniendo en cuenta la cantidad de viviendas, su dispersión, la separación del SEN, la densidad demográfica, las condiciones topográficas del terreno, los recursos locales y los costos de inversión. Fueron evaluados los aspectos sociales, medioambientales y económicos.

Para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos se tuvieron en cuenta las recomendaciones para la selección y diseño de sistemas de energías renovables y sistemas híbridos de electrificación rural [IEC, 2005a; Guerra, 2005].

Se realizó el diagnóstico del estado técnico de las mini-hidroeléctricas existentes en las comunidades rurales, según la guía para el desarrollo de proyectos de mini y micro centrales hidráulicas [Coz, 1995]. Se propusieron y evaluaron las soluciones más factibles en cada caso.

Se estudiaron y evaluaron varios prototipos de cocinas para la cocción de alimentos y otros usos domésticos, a partir de la biomasa forestal según recomendaciones de [Zúñiga, 1997].

2. Sistematización de las experiencias

Fueron empleados métodos y técnicas apropiadas para el trabajo comunitario, sustentadas en los principios de la educación popular [Vargas *et al.*, 2001; Freire, 2003; Kaplún, 2003; Freire, 2010], asimilables en el contexto rural, y teniendo como ejes transversales el enfoque de género y la educación ambiental.

La Organización No Gubernamental cubana Centro Félix Varela, en el ámbito del programa «Apoyo a la participación ciudadana activa para la rehabilitación ambiental», acompañó la sistematización de las experiencias [Bellón, De la Torre y Moleón, 2012]. Los procesos de reconstrucción histórico-lógicos y el análisis crítico de la experiencia, como fases fundamentales de su sistematización, contaron con la participación del equipo del Centro Félix Varela, gestores del proyecto y actores locales. Se realizaron talleres de capacitación sobre la metodología de sistematización. Fueron utilizadas técnicas reconocidas para los procesos de sistematización [Jara, 2006a; Jara 2006b]. Asimismo, fueron uti-

lizadas las metodologías y herramientas propuestas para la mediación [Fuentes, 2007; Picard, 2007] y para la concertación [Thévoz, 2006]. Fueron evaluados los indicadores de pertinencia, eficacia, impactos, viabilidad y sostenibilidad de las experiencias según [PNUD, 1997].

Resultados y discusión

1. Ingeniería de proyectos

Las soluciones de energización rural aplicadas fueron las más viables (solar fotovoltaica, hidroenergía y biomasa), teniendo en cuentas la localización de estas comunidades en zonas montañosas, el grado de dispersión de las viviendas y la propia situación económica del país.

Para la electrificación solar fotovoltaica fueron dimensionados sistemas fotovoltaicos autónomos descentralizados. Los sistemas instalados fueron de 200 – 250 W_p en paneles solares fotovoltaicos, un banco de baterías de 440 Ah, un inversor 12 Vdc / 110Vac de 300 W, un controlador de carga 12 V / 20 A y cinco lámparas fluorescentes de 12 V / 15 W, un radio grabadora y un televisor. La autonomía es de 3 días. En la Fig. 1 se muestra una vivienda electrificada con paneles solares.



Fig. 1. Vivienda electrificada con paneles solares en la comunidad rural San Narciso, en el macizo montañoso Guamuhaya, Cienfuegos, Cuba.

En el diagnóstico tecnológico de las mini-hidroeléctricas se identificó que tenían dificultades en la eficiencia de la generación de energía eléctrica y en el aprovechamiento del recurso agua, originando afectaciones a la calidad y el tiempo medio de servicio. Se realizaron labores de limpieza y obras ingenieras en los embalses y tuberías de agua de tres mini-hidroeléctricas y el mejoramiento y completamiento de la infraestructura del banco de transformadores, postes, redes de distribución y acometidas de una mini-hidroeléctrica.

Se demostró que la cocina más viable por su eficiencia y pertinencia en las condiciones de las comunidades rurales, era la cocina eficiente de leña y carbón fabricada y comercializada por una empresa nacional. Este prototipo de cocina, al tener horno cerrado tiene mayor hermeticidad y eficiencia, estimándose un 50 % la reducción del consumo de leña. En la Fig. 2 se muestra una cocina eficiente de leña de fabricación nacional en una vivienda.



Fig. 2. Cocina eficiente de leña en vivienda de la comunidad rural San Narciso en el macizo montañoso Guamuhaya, Cienfuegos, Cuba.

2. Sistematización de las experiencias

La sistematización de las experiencias posibilitó la construcción colectiva de saberes, tomando como base los aprendizajes y los cambios más significativos, que potenciaron la participación ciudadana e institucional más activa y el fortalecimiento de capacidades de autogestión. Las experiencias y sus aprendizajes constituyeron un patrón de relacionamiento, articulación, intercambios, propuestas metodológicas, prácticas y lecciones aprendidas, elementos que fueron multiplicados en experiencias similares.

Indicadores de resultados

a. Electrificación solar fotovoltaica de 75 viviendas (de ellas, 35 dispersas), un albergue y un círculo social:

- Potencia instalada de 16 355 W_p.
- 211 personas beneficiadas, de ellas, 100 mujeres.
- Un Grupo Electrónico Diésel sustituido, eliminando el consumo de 28 000 L/año (20,51 t/año) y la emisión de 61,53 t/año de CO₂.
- Un Grupo Electrónico Diésel reduce su funcionamiento 2 h/día, eliminando el consumo de 2400 L/año (1,76 t/año) y la emisión de 5,28 t/año de CO₂.
- Consumo de 1848 L/año (1,35 t/año) de combustible doméstico para alumbrado y la emisión de 4,05 t/año de CO₂ eliminados.

b. Reparación de embalses, tuberías e infraestructura eléctrica de tres mini-hidroeléctricas:

- 202 viviendas y 513 personas beneficiadas, de ellas, 244 mujeres.
- Incremento del tiempo medio de servicio y calidad de la energía.
- Reducción de los índices de consumo de agua (m³/kWh).
- Consumo de 4848 L/año (3,55 t/año) de combustible doméstico para alumbrado y la emisión de 10,65 t/año de CO₂ eliminados.

c. Introducción y generalización del empleo del prototipo de cocina eficiente de leña para la cocción de alimentos y otros usos domésticos:

- 49 viviendas beneficiadas, de ellas, nueve dispersas.
- 110 personas beneficiadas, de ellas, 54 mujeres.
 - a. 39,96 t/año de leña base seca y emisión de 80,56 t/año CO₂ reducidas.
- Mejoras de condiciones de vida y de salud de las familias, en particular las mujeres.

3. Los cambios más significativos

Se mejoró la calidad de vida de las comunidades, en particular las/os niñas/os y mujeres. Mejoró la calidad del medio ambiente local. Se reduce el consumo de combustibles fósiles y la tala indiscriminada de árboles como recurso energético. Se contribuye a reducir los riesgos de enfermedades respiratorias y oculares por la inhalación del humo dañino que emite la quema de madera, así como a humanizar la actividad. Aumentó el conocimiento y sensibilidad de todos en relación a la protección del medio ambiente, el uso eficiente y el ahorro de energía. Se fortaleció el sentido de pertenencia, de las/os habitantes. La experiencia contribuyó a mejorar las relaciones sociales interpersonales y de grupo en las comunidades, mejorando la colectividad y convivencia. En su conjunto la experiencia ha contribuido a reducir el éxodo de la población, y a mejorar la estabilidad de las familias y de la fuerza de trabajo en la zona. Se ha logrado mantener la sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos y de las cocinas eficientes, con la participación de los propios habitantes y las instituciones locales. Asimismo, los cambios producidos se han consolidado en el tiempo.

2. Factores que contribuyeron al cambio

El empleo de métodos y técnicas apropiadas para el trabajo comunitario, sustentadas en los principios de educación popular y asimilable en el contexto rural. La realización de talleres participativos con las comunidades, instituciones y los donantes para la identificación y análisis de los problemas existentes, sus causas y consecuencias, y las estrategias y alternativas de solución. Haber utilizado como vía de entrada a las comunidades, a los líderes informales. La creación de la junta directiva presidida por el líder formal de la comunidad. También se logró la participación de instituciones claves y decisores/as sensibilizados y comprometidos a colaborar en las acciones como resultado de los procesos de concertación y mediación. Los facilitadores/as entrenados en generar alternativas de soluciones a los problemas y conflictos, involucrando a todos/as las participantes.

3. Pertinencia, eficacia, impactos, viabilidad y sostenibilidad

Objetivos y resultados de la experiencia adecuados al contexto de cada comunidad. Asimilación y uso eficiente de fuentes de energías renovables. Contribución a la mitigación del cambio climático a nivel local, reducción del consumo de combustibles fósiles, de las emisiones de gases de efecto invernadero y los impactos y costos ambientales asociados. Mejoramiento de las condiciones de vida de la población. Modificaciones de las esferas de educación y

concientización ambiental comunitaria. Los efectos o cambios producidos confirman el impacto de la experiencia, y se han mantenido en el tiempo sin otras ayudas externas.

Conclusiones

El uso combinado de fuentes renovables de energía (solar fotovoltaica, hidroenergía y biomasa) fue la opción más viable, en las condiciones de las experiencias, para mejorar el suministro de energía a las comunidades, contribuyendo a la mitigación del cambio climático a nivel local.

Las experiencias fueron exitosas, validadas a través de indicadores de pertinencia, eficacia, impactos, viabilidad y sostenibilidad. Se lograron impactos significativos sobre el mejoramiento del medio ambiente local y la calidad de vida de los habitantes, en particular las/os niñas/os y mujeres.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PPD/FMAM/PNUD), al Programa de Desarrollo Humano Local (PDHL), a la Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (Cubasolar) y al Centro Félix Varela, por su apoyo y contribuciones materiales, humanas y financieras.

Bibliografía

- BELLÓN, M.V., A. M. DE LA TORRE Y M. MOLEÓN (2012). *Sistematización de los saberes construidos en procesos de mediación y concertación: Experiencias desarrolladas en los municipios Habana del Este y Cumanayagua*. Publicaciones Acuario, Centro Félix Varela, La Habana, Cuba.
- CEPAL (2016). «Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)».
- Citma (2016). «Estrategia Ambiental Nacional 2016-2020». La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente.
- CITMA (2017). «Plan de Estado Cubano para el Enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (Citma)». Página Web. www.contraloria.gob.cu/documentos/noticias/FOLLETO%20TAREA%20VIDA.PDF. Consultado 26 de abril de 2017.
- COZ F. (1995). «Manual de mini y micro centrales hidráulicas. Una guía para el desarrollo de proyectos, Lima, Perú».
- FREIRE, P. (2003). «¿Extensión o comunicación? La concientización en el medio rural, Selección de Lectura, Comunicación y Grupo». Centro de Intercambio Educacional (CIE) Graciela Bustillos, La Habana, Cuba.
- FREIRE, P. (2010). *Pedagogía de la autonomía y otros textos*. La Habana: Ed. Caminos, Cuba.
- Fuentes, M. (2007). «Mediación en la solución de conflictos». Publicaciones Acuario, Centro Félix Varela, La Habana, Cuba.
- GUERRA, A. (2005). «Dimensionamiento de sistemas de fuentes renovables de energía». La Habana: Ed. Cubasolar. Cuba.
- IEC (2004a) IEC 62257-1. «Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification. Part 1: General introduction to rural electrification. International Electrotechnical Commission (IEC)». Typeset and printed by the IEC Central Office Geneva, Switzerland.
- IEC (2004b) IEC 62257-2. «Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification. Part 2: From requirements to a range of electrification systems. International Electrotechnical Commission (IEC)». Typeset and printed by the IEC Central Office Geneva, Switzerland (2004).
- IEC (2004c) IEC 62257-3. «Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification. Part 3: Project development and management. International Electrotechnical Commission (IEC)». Typeset and printed by the IEC Central Office Geneva, Switzerland.
- IEC (2005a) IEC 62257-4. «Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification. Part 4: System selection and design. International Electrotechnical Commission (IEC)». Typeset and printed by the IEC Central Office Geneva, Switzerland.
- IEC (2005b) IEC 62257-6. «Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification. Part 6: Acceptance, operation, maintenance and replacement. International Electrotechnical Commission (IEC)». Typeset and printed by the IEC Central Office Geneva, Switzerland.
- IPCC (2017). «Quinto Informe de Evaluación [Online]. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)». Available: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf Consultado 3 de marzo de 2017.
- JARA, O. (1984). *Los desafíos de la educación popular*. Centro de Estudios y Publicaciones Alforja, San José, Costa Rica.
- JARA, O. (2006a). *Dilemas y desafíos de la sistematización de experiencias*. Centro de Estudios y Publicaciones Alforja, San José, Costa Rica.
- JARA, O. (2006b). *¿Cómo sistematizar?* Centro de Estudios y Publicaciones Alforja, San José, Costa Rica.
- KAPLÚN, M. (2003). *El comunicador popular*. Centro de Intercambio Educacional (CIE) Graciela Bustillos, La Habana, Cuba.
- ONU (2017). «Cambio Climático». Online. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Página Web. <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>. Consultado 3 de marzo de 2017.
- PCC (2017). «Documentos del 7mo. Congreso del Partido aprobados por el III Pleno del Comité Central del PCC el 18 de mayo de 2017 y respaldados por la Asamblea Nacional del Poder Popular el 1 de junio de 2017 (I)». Disponible en: <http://www.granma.cu/file/pdf/gaceta/%C3%BA%20PDF%2032.pdf>. Consultado 21 de septiembre de 2017.
- PICARD, C. (2007). *Mediación de conflictos interpersonales y de pequeños grupos*. Publicaciones Acuario, Centro Félix Varela, La Habana, Cuba.
- PNUD (1997). «Monitoreo y evaluación orientadas a la obtención de resultados. Manual para administradores de programas». En Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Nueva York.
- THÉVOZ, L. (2006). *Procesos de concertación para la gestión pública. Conceptos, dimensiones y herramientas*. Publicaciones Acuario, Centro Félix Varela, La Habana, Cuba.
- VARGAS, L., G. BUSTILLOS, Y M. MARFÁN (2001). *Técnicas participativas para la educación popular*. Cuarta Edición, Editorial Popular, Madrid, España.
- ZÚÑIGA, R. (1997). *Construcción y mantenimiento de los fogones eficientes*. La Habana: Ed. Pueblo y Educación.

Simulación de sistemas híbridos fotovoltaico/biogás/diésel con inyección a red en la ronera central, empleando la herramienta computacional Homer

Por Ing. Inoel Águila Bernal*, M. Sc. Mayra Guzmán Villavicencio **,
M. Sc. Carlos Rafael Soto Castellón***

*Empresa Cuba Ron S.A., Ronera Central, Villa Clara, Cuba.
inversiones@ronvc.co.cu

**Empresa Cuba Ron S.A., Ronera Central, Villa Clara, Cuba.
E-mail: dirrh@ronvc.co.cu

***Empresa Cuba Ron S.A., Ronera Central, Villa Clara, Cuba.

Resumen

El desarrollo de la industria de procesos químicos y fermentativos ha estado vinculado a un alto consumo de energías de origen fósil, y por ende a un alto grado de contaminación ambiental. En Cuba, Ron S.A. Ronera Central, ha diseñado un Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE) que combina el uso de la red con sistema fotovoltaico. No obstante, se prevé la posibilidad de aumentar las fuentes de generación con el uso del biogás. En este sentido, el presente trabajo se enmarca en la necesidad de evaluar el diseño de este nuevo SHGEE, con énfasis en su aporte en el tratamiento de los residuales, así como en una mayor independencia energética. En esta particularidad radica su carácter generalizador a otras destilerías del país, dado que en resolver el problema ambiental con sus residuales radica la permanencia de las mismas en el mercado de la industria ronera. Como método científico de soporte se utilizó el «Modelo de optimización para sistemas híbridos eléctricos con base en energías renovables, (Homer)». Como resultado se obtuvo la factibilidad del sistema híbrido óptimo Fotovoltaico/Generador diésel/Generador Biogás conectado a red, lo cual redundaba en el menor costo presente neto \$1465345,00 y costo del kW en el ciclo de vida de \$0,024. En este sistema el generador biogás aporta 91 % a la producción total de energía, mientras que el fotovoltaico aporta 8 %. El 1 % restante de producción energética es a partir del generador diésel y la compra al Sistema Electro-energético Nacional (SEN).

Palabras clave: energía, energías renovables, sistemas híbridos, sistema solar fotovoltaico.

Simulation of a grid-tied photovoltaic/biogas/diesel hybrid system for Ronera Central using Homer as a computational tool

Abstract

The development of the chemical and fermentative processes industry has been linked to a high consumption of fossil energy, therefore to a high degree of environmental contamination. In Cuba Ron S.A. Ronera Central, a Hybrid System of Electric Power Generation (SHGEE) has been designed that combines the use of the grid with photovoltaic system. However, the possibility of increasing sources of generation with the use of biogas is foreseen. In this sense, the present work is framed in the need to evaluate the design of this new SHGEE, with emphasis on its contribution in the treatment of residuals as well as greater energy independence. In this particularity lies its generalizing character to other distilleries in the country, given that, in solving the environmental problem with its residuals, lies the permanence of the same in the

market of the ronera industry. As a scientific method of support, the «Optimization model for hybrid electric systems based on renewable energies, (Homer)» was used. As a result, the feasibility of the optimal hybrid system Photovoltaic / Generator diesel / Generator Biogas connected to the grid was obtained, which results in the lowest net present cost \$ 1465 345,00 and cost of kWh in the life cycle of \$ 0,024. In this system, the biogas generator contributes 91 % to the total energy production while the photovoltaic generator contributes 8 %. The remaining 1 % of energy production is from the diesel generator and the purchase from the National Electro-Energy System (SEN).

Key words: energy, renewable energy, hybrid system, solar photovoltaic system.

Introducción

Las energías renovables se podrían posicionar como la segunda fuente de energía para la población mundial en 2035 [REN 21, 2016]. Cuba, por su posición geográfica, presenta notables potencialidades de recursos energéticos alternativos renovables, como son: el sol, el viento, los pequeñas saltos de agua, la biomasa, la energía de los océanos y la geotermia [ONE, 2009]. En la política energética del país es prioridad promover una transición hacia un modelo energético basado en el uso racional de la electricidad, la mejora de la eficiencia en las instalaciones y la utilización de energías renovables.

En este sentido, la Ronera Central realiza acciones que permitan cumplir con la política trazada de cambiar la matriz energética actual, sus esfuerzos están dirigidos al uso de fuentes renovables de energía y para ello en su estrategia de desarrollos se contemplan acciones como:

- La preparación de Inversión de una nueva destilería energéticamente más eficiente y automatizada.
- Instalación de un sistema solar fotovoltaico con inyección a red de 2752 módulos fotovoltaicos en 5949 m², para una potencia total instalada de 688 kW_p [IDAE, 2011].

Sin embargo, aún persiste la dependencia energética del SEN durante la noche, lo cual se prevé que se acentúe con la construcción de la nueva destilería. A su vez, para la puesta en explotación de la misma es necesario disponer de un tratamiento efectivo del residual que genera, todo lo cual constituye la situación problemática de la presente investigación.

Es por ello que nos planteamos la determinación de un SHGEE que contribuya al tratamiento óptimo de los residuales y al uso de fuentes renovables de energía, el cual permitirá invertir en una nueva destilería y lograr la independencia energética de la Ronera Central. Nuestro principal objetivo fue determinar la configuración óptima del sistema híbrido de generación eléctrica conectado a red, así como los aspectos que soportan la factibilidad. Para cumplir con esto evaluamos los recursos energéticos disponibles, la demanda de energía eléctrica y los componentes del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE), a partir de combinaciones energéticas con el modelo de simulación Homer.

Desarrollo

Metodología

Para el cumplimiento del objetivo general se analizaron herramientas computacionales de uso libre y comercial

existentes [López, 2007; George, *et al.*, 2011], que sirven para la modelación, simulación, análisis y optimización de sistemas híbridos para generación de energía eléctrica conectados a la red de distribución, seleccionándose el modelo de optimización Homer como soporte a la toma de decisiones en combinaciones energéticas [NREL, 2005]. En este sentido fueron simulados dos arreglos fotovoltaicos, cinco tamaños de generadores diésel, seis de generadores a biogás, tres capacidades de compra de la red y dos tamaños de inversor. Estas disposiciones técnicas fueron evaluadas en dos estrategias de despacho, resultando 720 configuraciones para el diseño del sistema y 32 400 para el análisis de sus variables de sensibilidad.

Resultados y discusión

Para la ampliación de un sistema híbrido, una vez caracterizada la carga a suplir, se debe hacer un diagnóstico de la zona de estudio, lo que determinará la disponibilidad de recursos energéticos y conducirá a determinar si es factible su instalación. Como resultado del diagnóstico se identifica la biomasa obtenida como residual del proceso de fermentación en la nueva destilería, proponiendo a la inversión su tratamiento en los reactores anaerobios de flujo ascendente con manto de lodo (conocidos como UASB) más usados en el tratamiento de efluentes líquidos [Lettinga y Hulshoff-Poll, 1991], especialmente vinazas de destilerías [Wesley y Barbosa, 2000; Rajeshwari, 2000; Lorenzo *et al.*, 2013]. La aplicabilidad de los reactores UASB se basa en la posibilidad de tratar efluentes líquidos de muy alta carga orgánica a bajos tiempos de retención y alta eficiencia de hasta 90 %, [Rajeshwari, 2000; Bermúdez *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2000; Menéndez, Pérez Olmo, 2007; Satyawaliy y Balakrishnan, 2008], con bajos costos de construcción, producción y mantenimiento [Lorenzo, 2008; Weiland, 2010]. Disponer entonces de esta fuente, además de la energía solar, constituye el requerimiento básico para el inicio del diseño de la simulación, la optimización y el análisis de sensibilidad de Homer [Lambert, 2006].

Simulación

Para simular sistemas híbridos en Homer se ingresa información técnica y económica de los equipos que conforman el proyecto, dentro de los cuales se tomaron como premisas:

- Generador 1 de combustible diésel: Se repone el existente, el valor de venta como materia prima forma

parte del capital inicial, al desconocerse la potencia real del equipo necesario para el nuevo sistema, se asumen cinco tamaños de equipos diferentes, en que Homer interpola sus valores, determinando la opción más factible.

- **Generador 2 de combustible biomasa:** Se establece la estrategia de funcionamiento donde trabaja en modo optimizado durante el día y forzosamente funcionando durante la noche; no se asume durante el mes de reparación restricción de parada, pues el sistema funcionará en dependencia de la existencia de biogás. Se selecciona un generador y su precio teniendo en cuenta todas las consideraciones financieras de operaciones similares realizadas.
- **Sistema fotovoltaico:** El sistema fue instalado en el primer trimestre de 2016, por lo que su capital inicial es cero y su remplazo es cero también por estar evaluándose el proyecto para 25 años, que coincide con la garantía del sistema para 90 % de eficiencia; la potencia nominal entregada al sistema es de 552 000 W_p, siendo la potencia total instalada del campo solar, de 688 000 W_p.
- **Inversores:** La instalación existente la conforman 23 unidades de trifásicas SMASTP2400TL-US, el costo es de 153 422,00 USD; este valor lo tendremos en cuenta para el reemplazo, el tiempo de vida útil de estos equipos es inferior al de los paneles, estimamos 15 años.
- **Recurso solar:** La entrada del recurso solar a Homer se obtuvo a partir de la información del Instituto de Meteorología y sus bases de datos según la ubicación geográfica.
- **Recurso biomasa:** Se producen 29,82 toneladas por día excepto en octubre por estar en reparación la destilería, obteniéndose un biogás con determinada composición y características [Deublein, Steinhauser, 2008].

- **Recurso fósil:** El diésel tiene un precio muy cambiante. Es por ello que se hace necesario ingresar múltiples valores de esta variable, cubriendo el rango de incertidumbre superior en este caso \$0,7, \$0,8, \$0,9, \$1,0 y \$1,10, para determinar hasta qué valor es factible el uso del generador diésel.
- **Tasa de interés real:** se utiliza para convertir el costo de un equipo en costos anualizados. Se asumirá un valor de 10 %.

Optimización

En esta fase el objetivo del proceso es determinar el valor óptimo de cada variable de decisión. Para ello se evalúa el tamaño del generador fotovoltaico (Homer modela el comportamiento del arreglo fotovoltaico como un gran panel FV) existente, así como del inversor; se desconocen las capacidades de los generadores diésel y a biogás, así como la compra de energía necesaria al SEN. Homer permite ingresar varios valores para cada variable de decisión, como se puede ver en la Fig. 1. En este caso se optó por simular dos arreglos fotovoltaicos, cinco tamaños de generadores diésel, seis de generadores a biogás, tres capacidades de compra de la red y dos tamaños de inversor.

En la Fig.2 la primera fila corresponde a la alternativa óptima, presenta el menor costo del ciclo de vida y el mejor desempeño para el sistema que se toma como base, que tendrá la mayor demanda de energía de la planta 23 429 kWh/d, 85 % de la producción de biomasa 27,3 t/d y precio del diésel \$0,8, están presentes todos los equipos existentes del SHGEE; Homer selecciona un generador diésel de 100 kW y un generador biogás de 1200 kW, lo cual da el menor costo presente neto de \$1 465 345,00 y un costo del kilowatt-hora en el ciclo de vida de \$0,024.

	PV Array (kW)	PERK (kW)	LHB50 (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)
1	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
2	688.000	50.00	1.000.00	1.800.000	552.00
3		100.00	1.150.00	3.900.000	
4		200.00	1.200.00		
5		288.00	1.350.00		
6			1.500.00		

Fig. 1. Variables de decisión. Comparación de 2 x 5 x 6 x 3 x 2 = 360 sistemas x 2 estrategias de despacho = 720 configuraciones.
Fuente: Interfase de usuario del Homer.

	PV (kW)	PERK (kW)	LHB50 (kW)	Conv. (%)	Efficiency Measures	Grid (kW)	Initial Capital (\$)	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC (\$)	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage (%)	Diesel (\$)	Biomass (\$)	PERK (hrs)	LHB50 (hrs)
1	688	100	1200	552	Yes	3500	\$ 452,284	111,607	\$ 1,465,345	0.024	1.00	0.00	4,236	9,345	180	8,465
2	688	100	1200	552	Yes	1800	\$ 452,284	111,607	\$ 1,465,345	0.024	1.00	0.00	4,236	9,345	180	8,465
3	688	50	1200	552	Yes	3900	\$ 446,729	112,237	\$ 1,465,507	0.024	1.00	0.00	3,339	9,345	274	8,465
4	688	100	1200	552	Yes	3900	\$ 441,173	112,987	\$ 1,466,757	0.024	1.00	0.00		9,345		8,465
5	688	100	1150	552	Yes	3900	\$ 433,951	114,178	\$ 1,470,346	0.024	1.00	0.00	3,953	9,766	165	8,760
6	688	50	1150	552	Yes	3500	\$ 428,396	114,822	\$ 1,470,639	0.024	1.00	0.00	2,930	9,766	241	8,760
7	688	50	1150	552	Yes	1800	\$ 428,396	114,822	\$ 1,470,639	0.024	1.00	0.00	2,930	9,766	241	8,760
8	688	1150	552	Yes	3500	\$ 422,840	115,954	\$ 1,471,724	0.024	1.00	0.00		9,766		8,760	
9	688	1150	552	Yes	1800	\$ 422,840	115,954	\$ 1,471,724	0.024	1.00	0.00		9,766		8,760	
10	688	200	1200	552	Yes	3900	\$ 463,395	111,467	\$ 1,475,189	0.024	1.00	0.00	1,786	9,345	38	8,465
11	688	200	1200	552	Yes	1800	\$ 463,395	111,467	\$ 1,475,189	0.024	1.00	0.00	1,786	9,345	38	8,465
12	688	200	1150	552	Yes	3900	\$ 445,062	113,583	\$ 1,476,058	0.024	1.00	0.00	3,157	9,766	67	8,760
13	688	200	1150	552	Yes	1800	\$ 445,062	113,583	\$ 1,476,058	0.024	1.00	0.00	3,157	9,766	67	8,760
14	688	288	1200	552	Yes	3900	\$ 473,173	112,003	\$ 1,489,829	0.024	1.00	0.00	718	9,345	11	8,465
15	688	288	1200	552	Yes	1800	\$ 473,173	112,003	\$ 1,489,829	0.024	1.00	0.00	718	9,345	11	8,465
16	688	288	1150	552	Yes	3900	\$ 454,840	114,028	\$ 1,489,880	0.024	1.00	0.00	1,880	9,766	29	8,760
17	688	288	1150	552	Yes	1800	\$ 454,840	114,028	\$ 1,489,880	0.024	1.00	0.00	1,880	9,766	29	8,760
18	688	100	1000	552	Yes	3900	\$ 378,952	165,062	\$ 1,877,224	0.030	0.99	0.00	15,239	8,431	631	8,760
19	688	100	1000	552	Yes	1800	\$ 378,952	165,062	\$ 1,877,224	0.030	0.99	0.00	15,239	8,431	631	8,760
20	688	200	1000	552	Yes	3900	\$ 390,063	163,892	\$ 1,877,721	0.030	0.99	0.00	14,746	8,431	319	8,760
21	688	200	1000	552	Yes	1800	\$ 390,063	163,892	\$ 1,877,721	0.030	0.99	0.00	14,746	8,431	319	8,760
22	688	50	1000	552	Yes	3900	\$ 373,397	165,857	\$ 1,878,889	0.030	0.99	0.00	10,549	8,431	867	8,760
23	688	50	1000	552	Yes	1800	\$ 373,397	165,857	\$ 1,878,889	0.030	0.99	0.00	10,549	8,431	867	8,760
24	688	1000	552	Yes	3900	\$ 367,941	166,915	\$ 1,882,936	0.030	0.99	0.00		8,431		8,760	

Figura 2. Resultados de optimización en función del menor valor presente neto.
Fuente: Interfase de usuario del Homer.

En la Fig. 3 se muestra un subconjunto de los resultados de optimización global, mostrando sólo el menor costo de configuración dentro de cada categoría o tipo de sistema, donde cada uno de ellos es el de menor costo en la categoría o combinación de sistemas.

Análisis de sensibilidad

En este análisis fueron sensibilizadas tres variables: consumo energético de la destilería-ronera, producción de biomasa por día y el precio del diésel, según ilustra la Fig. 4.

Por tanto se simularon $720 \times 45 = 32\ 400$ configuraciones.

Discusión de resultados

Inicialmente se comprueban los resultados de generación fotovoltaica de Homer contra la generación real obtenida para un año. El real obtenido en el año es de 929 287 kWh/año y el cálculo del sistema es de 924 829 kWh/año, 0,5 % inferior, mientras que respecto al proyecto inicial de la inversión se plantean 928 623 kWh/año, para 0,01 %. Como se puede apreciar, no hay diferencias significativas teniendo en cuenta que los resultados de radiación son tomados en un promedio de varios años, por lo que podemos validar los resultados de Homer.

En la Fig.5 se muestra el espacio de los sistemas óptimos en la configuración seleccionada. El sistema óptimo

en función de la demanda de energía (kWh/d) expresada con el color más claro, que para producciones de biomasa dentro del rango estudiado de 23 t/d a 29 t/d y precios de combustible inferiores de \$0,86 a \$0,83, respectivamente, es más factible la configuración que incluye el generador diésel (Red/F.V/G. diésel/G. Biogás).

Por su parte, el color más oscuro indica que para precios de combustible superiores a \$ 0,86 no se justifica el uso del generador diésel, aunque la diferencia del costo presente neto no es significativa (\$1412,00), como se muestra en la Fig.6 en la interpolación de valores que realiza Homer.

En la Fig. 7 se realiza una comparación económica de las dos configuraciones. Se aprecia un período de recuperación discreto. La tasa interna de rendimiento (IRR) es la tasa de descuento, a la cual el caso base y el sistema actual tienen el mismo costo actual neto, siendo esta de 11,4 %, recuperándose la inversión en 8,362 años. Se debe tener en cuenta que solo se valora lo referido a la energía y no lo que representa económicamente la parada de la destilación por falta de fluido eléctrico, ya que no está aprobado en el país el trabajo en isla. Por tanto, aunque la inclusión del grupo diésel no tiene resultados económicos relevantes en Homer, se justifica su empleo como fuente de respaldo con medidas de acomodo de carga para situaciones de emergencia.

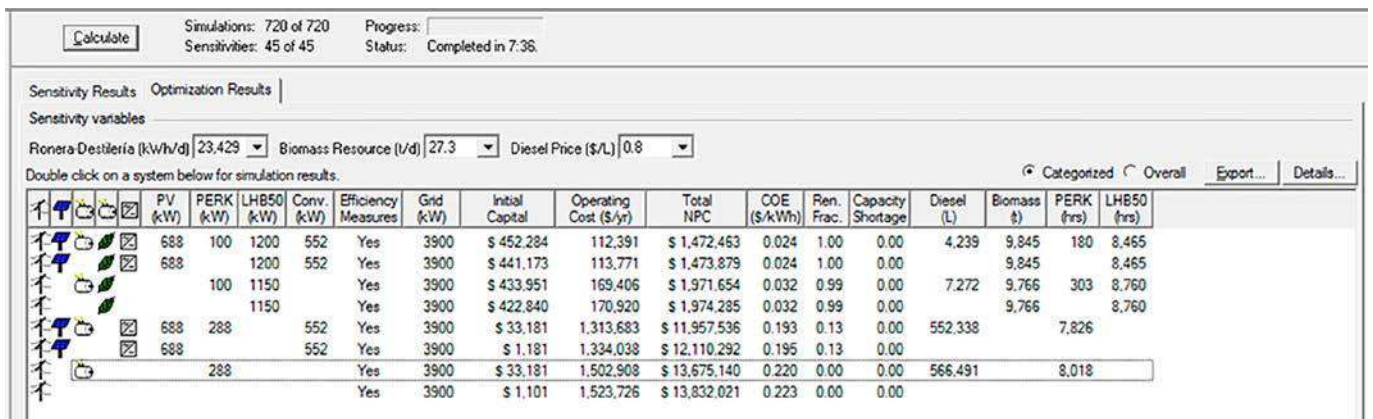


Figura 3. Resultados de optimización de acuerdo a su categoría.

Fuente: Interfase de usuario del Homer.

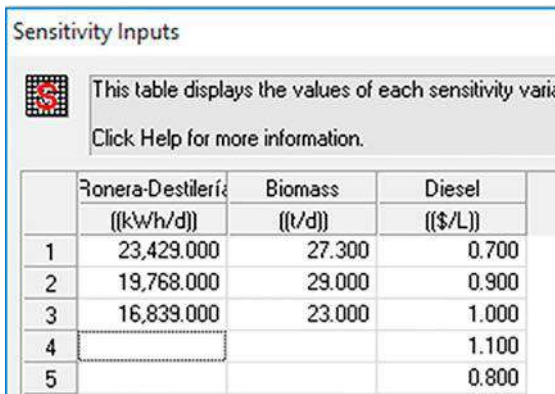


Fig. 4. Valores otorgados a las variables de sensibilidad escogidas. Simulación $3 \times 3 \times 5 = 45$ casos de sensibilidad.

Fuente: Interfase de usuario del Homer.

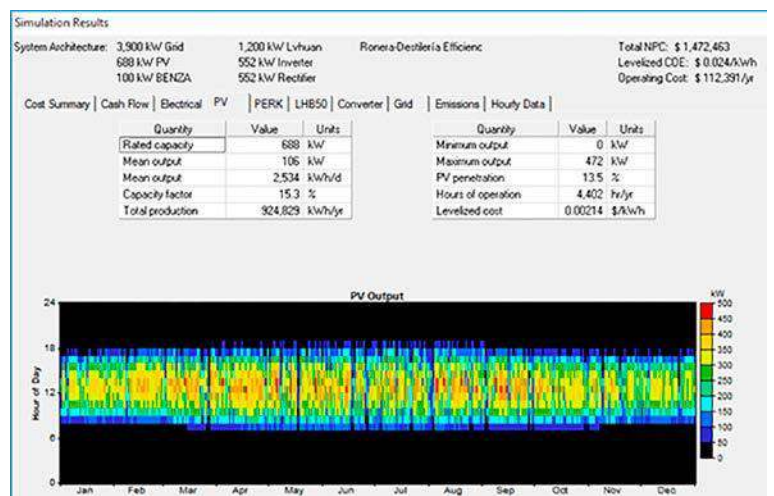


Fig. 5. Espacio de viabilidad de los sistemas óptimos según su configuración.

Fuente: Interfase de usuario del Homer.

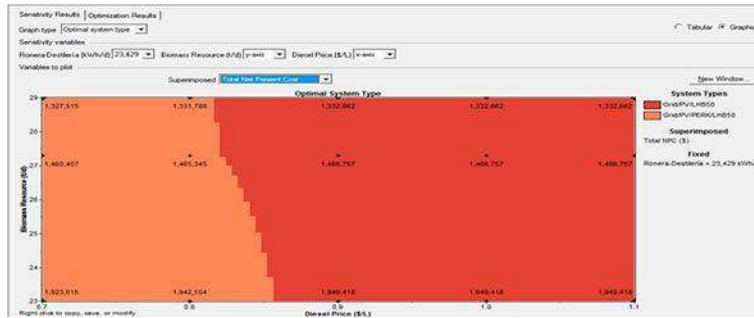


Fig. 6. Interpolación de valores del espacio de viabilidad de las configuraciones.
Fuente: Interfase de usuario del Homer.

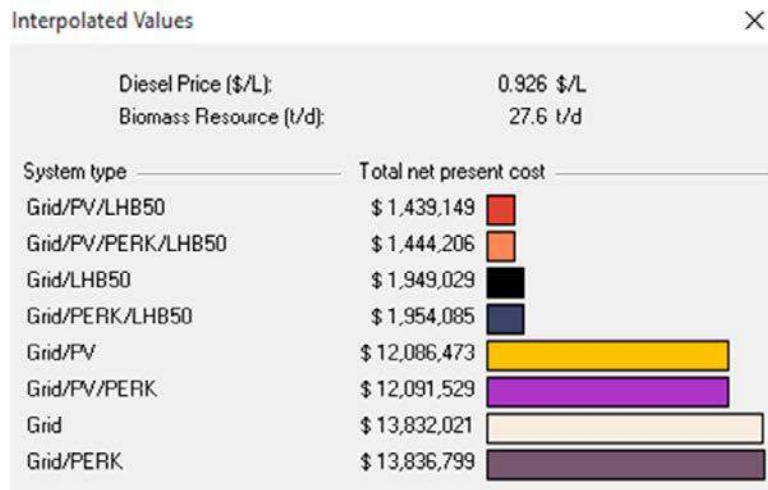


Fig.7. Comparación económica entre la configuración del sistema generador fotovoltaico actual para la carga de la nueva destilería vs. generador fotovoltaico/generador biogás/generador diésel.

Fuente: Interfase de usuario del Homer.

En la Fig. 8 se evalúa lo que representaría hacer la nueva destilería manteniendo solamente la capacidad de generación fotovoltaica instalada actualmente, vs. la configuración fotovoltaico + generador biogás + generador diésel. Como se puede ver, hay un ahorro en \$10 621 127,00 por

disminución del costo presente neto y en los costos de mantenimiento anuales de \$1 170 109,00/año, recuperándose la inversión en apenas cuatro meses, con valores de la TIR en términos de costo extremadamente satisfactorios, todo lo cual hace viable este proyecto.

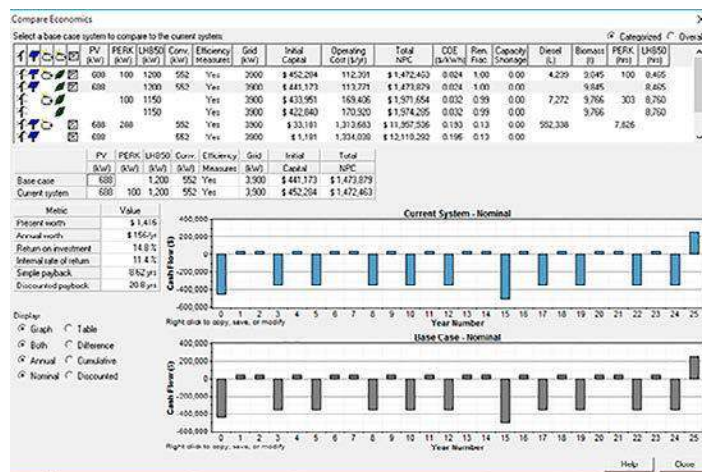


Fig. 8. Comparación entre el sistema fotovoltaico actual con la nueva carga de la nueva destilería y la configuración donde se incorporan el generador biogás y el generador diésel.

Fuente: Interfase de usuario del Homer.

Otro resultado económico favorable lo representa el costo nivelado de la energía de 0,022 \$/kWh, que no es más que el costo promedio por kilowatt-hora de energía eléctrica útil producida por el sistema, el cual de no ejecutarse la inversión incorporando el generador biogás, sería de 0,195 \$/kWh. En el siguiente gráfico de araña se analiza cómo interactúan entre sí las variables de sensibilidad y cuál es su efecto respecto al costo nivelado de la energía (Fig.9).

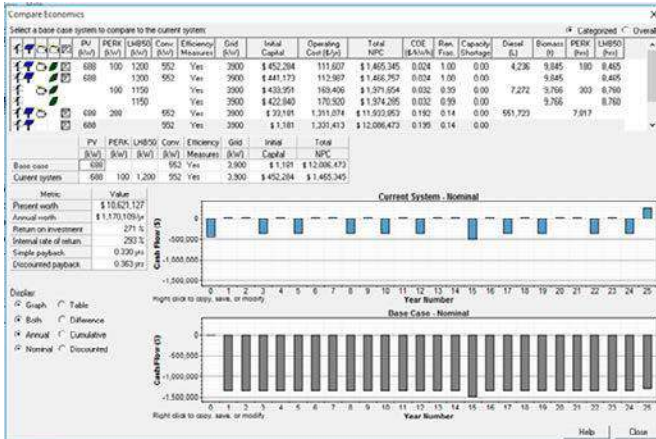


Fig. 9. Gráfico de araña, efecto de las variables a sensibilizar respecto al costo de la energía en el ciclo de vida.

Fuente: Interfaz de usuario del Homer.

En la gráfica se indica que es más pronunciada y positiva la pendiente de la carga Ronera Destilería, lo que implica que sea más sensible el costo nivelado de la energía al aumento de la demanda; aunque el precio del combustible tiene un peso importante, no es posible influir sobre él. Esta gráfica demuestra que se debe invertir más tiempo y dinero en acciones que disminuyan la carga que demande el sistema, como por ejemplo en el empleo de variadores de frecuencia, medidas de ahorro y acomodo de carga, y la cogeneración, entre otras.

Conclusiones

La configuración óptima del sistema de generación híbrida conectado a red seleccionada por Homer es un generador diésel de 100 kW y un generador biogás de 1200 kW, con el generador fotovoltaico de 688 kW, y 552 kWh de inversores trifásicos, demostrando su factibilidad bajo el criterio de tener el menor costo presente neto en \$1 465 345,00, para un costo del kilowatt-hora en el ciclo de vida de \$0,024.

Los recursos energéticos disponibles simulados en Homer para la configuración del SHGEE óptimo, permiten abastecer la carga demandada por la ronera y destilería, vendiendo 38 % excedente de la energía total producida al SEN, demostrando así su autonomía energética.

Con este proyecto se logra un doble beneficio. Por un lado, generar energía limpia con baja emisión de contaminantes durante su combustión y, a la vez, proponer un tratamiento que reduce el impacto ambiental que genera la vinaza, sustentado en los criterios de varios autores que recomiendan la vinaza y lodos resultantes del tratamiento anaerobio, por ser excelentes acondicionadores del suelo y poseer aún nutrientes capaces de aumentar el rendi-

miento de cultivos, como la caña de azúcar [Bermúdez *et al.*, 2003; Obaya, *et al.*, 2004; Pérez, Garrido, 2006; Minenergia, PNUD, FAO, GEF, 2011]. De esta manera se disminuye el consumo de fertilizantes químicos, de agua cruda para riego y se encuentra una solución ambiental de cierre de ciclo de tratamiento y disposición final de efluentes.

Bibliografía

- BERMÚDEZ, R., S. RODRÍGUEZ, M. C. MARTÍNEZ, Y A. TERRY (2015). «Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás», Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente. Página Web https://www.researchgate.net/publication/267241848_Ventajas_del_empleo_de_reactores_UASB_en_el_tratamiento_de_residuales_liquidos_para_la_obtencion_de_biogas.pdf Consultado en noviembre de 2017.
- DEUBLEIN A. Y A. STEINHAUSER (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim. 469 p. Página Web. <http://197.14.51.10:81/pmb/ENERGETIQUE/energie%20renouvelables/Biogas%20from%20Waste%20and%20Renewable%20Resources%20An%20Introduction.pdf>. Consultado en noviembre de 2017.
- GEORG BOPP, ET AL. (2011). «Worldwide overview about design and simulation tools for hybrid PV systems». Página Web. <http://www.iea/pvps.org/fileadmin/dam/public/report-technical-rep11-01.pdf>. Consultado en diciembre de 2017.
- IDAE (2011). «Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red. PROGENSA». Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. España. Página Web. <http://www.idae.com/>. Consultado en enero de 2016.
- INVERSORES SMASOLAR TECHNOLOGY. Disponible en <http://www.SMA-Solar.com>, Consultado en enero de 2016.
- LAMBERT, TOM (2006.) «Micropower system modeling with Homer». Engineering Inc. Paul Gilman and Peter Lilienthal, National Renewable Energy Laboratory. NREL. Página Web. <http://www.Homerenergy.com/documents/MicropowerSystem-ModelingWithHOMER.pdf>. Consultado en octubre de 2017.
- LETTINGA, G. Y L. W. HULSHOFF-POLL (1991). «UASB Process design for various types of wastewater», *Water Science and Technology*, vol. 24, No 8, 1991, p. 87-107.
- LÓPEZ, RODOLFO DUFO (2007). «Dimensionamiento y control óptimos de sistemas híbridos aplicando algoritmos evolutivos». Tesis Doctoral. Página Web http://www.iiis.org/CDs2011/CD2011CSC/CISCI_2011/PapersPdf/CA614CW.pdf Consultado en noviembre de 2017.
- LORENZO ACOSTA, YANIRIS, FIDEL DOMÉNECH LÓPEZ, FELIPE SÁNCHEZ, OSCAR ALMAZÁN DEL OLMO ET AL. (2013). «ICIDCA, Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB». Página Web <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v35n1/rtq03115.pdf>. Consultado en enero de 2018.
- LORENZO, Y. (2008). «La energía en la protección del medio ambiente. Estudio de las modificaciones al esquema tecnológico de la producción de biogás a escala piloto». Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. ISPJAE, 2008. Página Web https://issuu.com/revistaicidca/docs/revista_icidca_vol_48_n02_2014. Consultado en enero de 2018.
- MENÉNDEZ, C. Y J. PÉREZ OLMO (2007). *Proceso para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Tratamiento anaerobio*. 2da ed., 255 p. Ed. Félix Varela, Ciudad de La Habana, 2007. Página Web. <https://www.google.com/search?ei=qA->

- neWpHVBS64zwL2hoylBg&q=+12.%09MEN%C3%89N-DEZ%2C+C.+y+P%C3%89REZ+OLMO%2C+J%3A+Proceso+para+el+tratamiento+biol%C3%B3gico+de+aguas+residuales+industriales.+Tratamiento+anaerobio.+2da+ed.%2C+255+p.+Ed.+F%C3%A9lix+Varela%2C+Ciudad+de+La+Habana%2C+2007&oq=+12.%09MEN%C3%89N-DEZ%2C+C.+y+P%C3%89REZ+OLMO%2C+J%3A+Proceso+para+el+tratamiento+biol%C3%B3gico+de+aguas+residuales+industriales.+Tratamiento+anaerobio.+2da+ed.%2C+255+p.+Ed.+F%C3%A9lix+Varela%2C+Ciudad+de+La+Habana%2C+2007&gs_l=psy-ab.12...186049.198043.0.199715.3.3.0.0.0.197.197.0j1.1.0...0...1c.1j2.64.psy-ab..2.0.0...0.vZNC LGiBGg. Consultado en enero de 2018.
- MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF (2011). «Manual de biogás», Página Web. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>, Consultado en enero 2018.
- MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE (2011). «Utilización de las aguas residuales de la industria azucarera y de derivados en el fertirriego de la caña de azúcar». NC 855: 2011. La Habana: Gaceta oficial de la República de Cuba,
- NASA (2018). «Surface Meteorology and Solar Energy». Página Web. <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen>. Consultado en enero de 2018.
- OBAYA, M. C. ET AL. (2004). «Desarrollo de una tecnología de tratamiento de las aguas residuales de las destilerías de alcohol». Informe inédito No.00103008. 2004. Página Web. https://issuu.com/revistaicidca/docs/revista_icidca_vol_48_n02_2014. Consultado en enero 2018.
- ONE (2009). «Inventario Nacional de Fuentes de Energía Renovables 2009». Página Web. <http://www.one.cu/publicaciones/04industria/energiarenovables/inventarionacional2009.pdf> Consultado en enero de 2018.
- PÉREZ, I. Y N. GARRIDO (2006). «Aprovechamiento integral de vinazas de destilerías. Una revisión actual», *Ingeniería Química*, vol. 38, No 435, 2006, p. 129-133.
- PÉREZ, J. L.; R. BERMÚDEZ Y J. R. CÁRDENAS (2000). «Viabilidad técnico-económica del establecimiento de un biodigestorUASB en la destilería Nauyú», *Tecnología Química*, vol.20, No 2, 2000, p. 68-60.
- RAJESHWARI, K. V. (2000). «State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment», *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 2, 2000, p. 135-156.
- REN 21 (2016). «Renewables 2016 Global Status Report» Página Web. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf Consultado en diciembre de 2017.
- SATYAWALI, Y. Y M. BALAKRISHNAN (2008). «Wastewater treatment in molasses- based alcohol distilleries for COD and color removal: A review», *Journal Environmental Management*, No 86, 2008, p. 481-497.
- WEILAND, P. (2010). «Biogas production: current state and perspectives», *Journal Applied Microbiology Biotechnology*, No 85, 2010, pp. 849-860.
- WESLEY, J. Y L. A. BARBOSA (2000). «Vinhaca de cana de açúcar». 2da ed., 179 p. Ed. Agropecuaria, *Série Engenharia Agrícola*, Guaíba.

Evaluación de la eficiencia energética del generador de vapor de la Empresa de Productos Lácteos Las Tunas

Por Ing. María de los Ángeles Campos Fernández*, Ing. Laura Mislady Vega Pérez*,
Ing. Winliet Carmenate Álvarez* y M. Sc. Anaicel Góngora González*

* Universidad de Las Tunas, Cuba.
mariacf@ult.edu.cu, msaucedo.oc@geg.cu

Resumen

La investigación se realizó en el área de generación de vapor de la Empresa de Productos Lácteos de Las Tunas, con el objetivo de evaluar su sistema de generación-consumo de vapor. El mismo es de vital importancia, ya que las calderas constituyen un elemento esencial en el funcionamiento de muchas empresas, al proporcionar la potencia o el calor necesario para el proceso industrial. La significación consiste en la utilización del método indirecto, para determinar los puntos débiles y mejorar los indicadores de eficiencia. Para lograr lo antes expresado se hizo una revisión bibliográfica del tema, donde se tuvo en cuenta la metodología a seguir para calcular correctamente la eficiencia. Para ello se calcularon las pérdidas de calor en las tuberías de vapor, la eficiencia energética, y el consumo de combustible, y se hizo una valoración económica. Se obtuvo como resultado que actualmente la eficiencia bruta del generador es 87,8 %. Quedó demostrado que faltan tramos de tuberías por aislar, lo que provoca un mayor gasto de combustible. Se le proponen a la empresa posibles soluciones y, entre ellas, la más importante es lograr el aislamiento de los tramos de tuberías que lo requieran. La valoración económica arroja como resultado un significativo ahorro de combustible.

Palabras clave: generación de vapor, eficiencia energética.

Evaluation of the energy efficiency of the steam generator of Las Tunas Dairy Products Company

Abstract

The present research was carried out in the area of steam generation of the Dairy Products Company of Las Tunas in order to evaluate the generation system-steam consumption. The same is of vital importance as today boilers are an essential element in the operation of virtually all industrial companies by providing the power or heat needed for the process. Significant is the use of the indirect method to identify weaknesses and improve efficiency indicators. In order to achieve the above, a bibliographic review of the topic was carried out, which took into account the methodology to be followed to achieve a correct calculation of efficiency. For this purpose, heat losses in steam pipes, energy efficiency, fuel consumption and an economic valuation were calculated. As a result, the gross efficiency of the generator is currently 87,8 %. It was proved that there are missing sections of pipelines for insularity, which means that there is higher fuel consumption. The company has offered some possible solutions and among them the most important is to achieve insulation of the missing pipe sections. Finally an economic valuation is carried out, which results in a significant saving of fuel.

Key words: steam generation, energy efficiency.

Introducción

La combustión de los portadores energéticos fósiles tales como el petróleo y el carbón mineral, entre otros, acarrearán problemas que agravan progresivamente la contaminación, el aumento de la concentración de gases invernadero y la perforación de la capa de ozono [Calvo Ramos, 2010].

Solo hay que ver el panorama mundial para percatarse de ello. La crisis del petróleo ocurrida en la década de los años 1970, y el freno al desarrollo al que se vieron enfrentadas las economías de los países, condujeron a buscar alternativas para disminuir los gastos del combustible mediante el ahorro y el uso eficiente de los recursos.

La eficiencia energética siempre será un imperativo para nuestra economía. El incremento del precio del combustible lo hace más urgente. El aumento del consumo energético en las industrias encarece el producto final y lo hace menos competitivo. Los ingenieros lo conocen y trabajan para evitarlo, pero no siempre lo logran debido al uso irracional de la energía y su descontrol.

Cuba no solo se preocupa por la situación que tiene el petróleo en el planeta, sino porque es un país subdesarrollado y, aunque tiene yacimientos de este recurso, los niveles de extracción aún no satisfacen el consumo nacional. Por ello se ve en la necesidad de invertir gran cantidad de divisas para comprarlo, lo cual obliga tomar medidas especiales para su ahorro y así ayudar a la economía nacional.

En nuestro país se han creado las bases y dado pasos importantes en la creación de la cultura energética del ahorro en su población, la cual se encuentra enmarcada en un ambicioso programa energético cuyo fin es lograr la invulnerabilidad energética y el mayor ahorro posible de los más importantes portadores energéticos. Entre los lineamientos de la política económica y social que impulsa el país desde 2010, hay un grupo encaminado a lograr este objetivo, como son el 135 y el 253.

«Invertir para gastar menos» forma parte de la estrategia del Ministerio de la Industria Alimenticia (Minal) para disminuir el consumo energético y lograr mayor eficiencia en sus producciones. Algo que ha dejado de ser consigna para convertirse en hecho, a partir del proceso de recuperación de nuestra economía.

Pocas tecnologías han aportado tanto el desarrollo de la humanidad como la generación y utilización del vapor. Hoy en día las calderas constituyen un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales, al proporcionar la potencia o el calor necesario para los procesos. Sus resultados productivos y económicos dependen en gran medida de la confiabilidad, seguridad y eficiencia con que operen las calderas [Borroto Nordelo, 2005].

De los generadores de vapor se puede afirmar que su correcto diseño, óptima construcción y eficiente operación, son aspectos de gran importancia. Ello se resalta al tener en cuenta que las existencias de combustibles fósiles del mundo son limitadas y su mala utilización, además de contribuir a su agotamiento, significa pérdidas económicas para cualquier nación [Rubio, 2015].

En la Empresa de Productos Lácteos de Las Tunas existe desconocimiento sobre la eficiencia energética en el funcionamiento de la caldera. Además, no se cuenta con un procedimiento para la práctica operativa de la misma,

problema que influye en el incumplimiento de las condiciones de operación. Además, la entidad desconoce si es posible desarrollar modificaciones en la instalación que permitan disminuir el consumo del combustible de la caldera para lograr un mayor ahorro.

De esta forma, el objetivo general de nuestra investigación fue evaluar el sistema de generación y consumo de vapor en la instalación, utilizando el método indirecto, con el propósito de determinar los puntos débiles y mejorar los indicadores de eficiencia. Teniendo en cuenta que la evaluación de la eficiencia energética del sistema de generación y consumo de vapor en la Empresa de Productos Lácteos permitirá mejorar la eficiencia, y disminuir el consumo de combustible que afecta su desempeño.

Desarrollo

La entidad cuenta con una industria láctea que procesa la leche fresca y sus derivados, así como otra gama de productos lácteos y seis establecimientos que están distribuidos en los distintos municipios de la provincia. Dichos establecimientos se dedican fundamentalmente al acopio y distribución de leche fresca para el propio municipio y su envío a la industria. La comercialización de la producción tiene como destino a la población, entidades estatales y la captación de divisas.

El área de generación de vapor consta de un generador de vapor de la marca Standardkessel, construido conjuntamente por Alemania y España. El equipo está totalmente automatizado y ensamblado por la empresa cubana Alastor. La caldera es del tipo de tubos de fuego (pirotubular) y el combustible utilizado para producir la energía calórica es el fuel-oil. Presenta una capacidad productiva de diseño de 4 ton/h de vapor saturado, a una presión de 9 kgf/cm² y una temperatura de 175 °C.

El combustible es bombeado del tanque diario hacia los pre-calentadores. En el arranque en frío del generador, éstos funcionan con una resistencia eléctrica y posteriormente, cuando hay vapor disponible, cambia el precalentamiento con dicho vapor saturado a una presión de 4,0 kgf/cm², alcanzando una temperatura de 120 °C para su posterior entrada a la caldera. El consumo de combustible es de 265-300 kg/h.

El agua para la alimentación del generador de vapor es bombeada mediante una bomba centrífuga multicelular en línea de la marca Grundfos, CR, CRI y CRN de 4 kW de potencia y 2 kgf/cm² de presión. La misma funciona automáticamente con un caudal de 6,8 m³/h. En el momento del levantamiento de esta información, la temperatura ambiente del agua se encontraba en 30 °C. El agua es tratada previamente a través de dos suavizadores y unida luego con el condensado recuperado en el tanque de agua tratada. El consumo de agua en la caldera varía entre 3,8 y 5 m³/h. La temperatura de salida de los gases varía entre 220 – 280 °C.

Clasificación de la caldera

Para la clasificación de la caldera se tuvieron en cuenta diferentes aspectos:

1. De acuerdo con la disposición de los fluidos en los tubos: caldera de tubos de fuego (pirotubular). Los ga-

ses calientes (fuego) circulan por dentro de los tubos, mientras que el agua está por fuera.

- De acuerdo con el uso: estacionaria. Se encuentra instalada fija en su lugar de operación.
- De acuerdo con el tamaño: pequeña. Es un generador de vapor de pequeñas producciones y operación a bajas presiones. Producción: $D < 20\ 000\ \text{kg/h}$. Presión: $P < 2,0\ \text{MPa}$.
- De acuerdo con la forma y posición de los tubos: de tubos rectos. La flusería está integrada por tubos rectos horizontales.
- De acuerdo con el sistema de circulación de la sustancia de trabajo: de circulación natural. En ellos la sustancia de trabajo se mueve por el principio del termosifón, como resultado de la diferencia de densidad entre el agua y la mezcla agua-vapor que se genera.
- De acuerdo con el combustible: Generador de vapor de petróleo (Fuel-oil).
- De acuerdo con el tiro de los gases: de tiro natural.

Consumo de combustible de la caldera

Para analizar este consumo se decidió tomar los valores mensuales para estudiar su comportamiento.

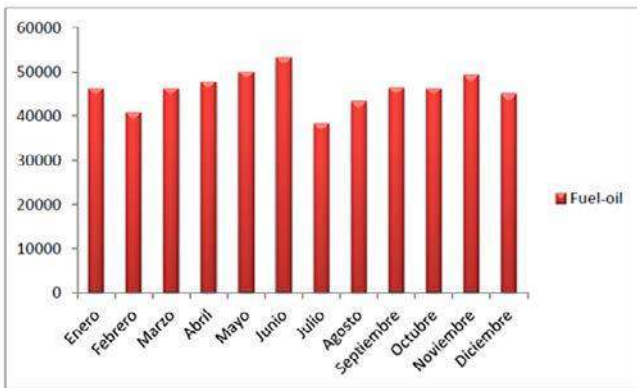


Figura 1. Consumo mensual de combustible fuel oil.

Como se muestra en la gráfica (Fig. 1), el consumo se comportó por encima de los 35 000 L.

Distribución del vapor de la entidad

El vapor producido en la caldera es enviado a un distribuidor de vapor, y se utiliza de la siguiente forma:

- Para las producciones derivadas de la soya: yogur, cresol y crema unttable.
- Para las producciones de leche, queso y yogur natural.
- Para limpieza química.
- Para calentar el agua y combustible de la caldera.

Para la evaluación del generador de vapor se utilizó el método indirecto, que consta de 11 pasos, arrojando los resultados siguientes:

- Valor del calor disponible (Qd): 40 909,42 kJ/kg.
- Valor calórico bajo del combustible (Qtbc): 40 699,47 kJ/kg.

Este valor calculado posee una diferencia solamente de 209,95 kJ/kg del valor obtenido experimentalmente, y cumple con los valores dados en la literatura, pues puede tener una diferencia entre 630 y 840 kJ/kg [Rubio, 2015].

- Calor físico del combustible (Ccomb): 1,9995 kJ/kg.
- Coefficiente de exceso de aire en los gases de escape (ge): 1,46.

No se pudieron realizar mediciones de los gases de escape. No obstante, se tiene una referencia de mediciones de CO₂ y O₂ realizadas con anterioridad, por lo que la fracción de CO₂ en los gases de escape será de 0,013 % en este caso, mientras que el de N₂ será de 82,307 %.

Volúmenes de los productos de la combustión:

- Volumen de gases triatómicos (VRO₂): 1,60 Nm³/kg
- Volumen del vapor de agua (VH₂O): 1,2681 Nm³/kg
- Volumen de gases secos (Vgs): 14,89 Nm³/kg
- Volumen total (suma del vapor de agua y de gases secos): 16,158 Nm³/kg

- Entalpías del aire.

Entalpía teórica del aire (I Oa): 948,420 kJ/kg

Entalpía del aire frío (I Oaf): 614,584 kJ/kg

Pérdidas de calor (Cuadro 1):

Causa	% de influencia
incombustión mecánica	0
incombustión química	0,06
con los gases de escape	135,10
radiación al medioambiente	2,3
ceniza extraída del horno	0
con las purgas o extracciones	0

6. Eficiencia bruta del generador de vapor: 87,9 %; valor aceptable aunque alejado del idóneo, que es de 90 %.
7. Calor útil: 10 2889,106 kJ/h.
8. Índice de generación: 13,96 ton vapor/t de combustible.

Posibles soluciones

1. Capacitar al personal acerca del uso eficiente y adecuado del generador de vapor.
2. Aumentar la temperatura del agua de alimentación hasta 900 °C, lo que permitiría el aumento de la entalpia ganando en eficiencia en el generador de vapor, un ahorro de combustible y de agua de alimentación.
3. Contratar el servicio para aislar los tramos de tuberías que lo necesitan.
4. Aprovechar la temperatura de salida de los gases de escape en el calentamiento de agua o de combustible.

Propuesta de ahorro

Aislamiento de los tramos de la red de tubería de vapor hasta los consumidores y del tanque de agua:

- El aislamiento térmico en las líneas de combustible, vapor y agua, aumenta la eficiencia del proceso de generación de vapor al disminuir las pérdidas energéticas. Es por eso que resulta necesario, una vez realizado el cálculo de la eficiencia del generador de vapor, hacer la valoración económica de cuánto representa para la entidad, en materia de ahorro llevado a ganancia, la inversión de aislar los tramos de tuberías definidos en la red de distribución de vapor.
- Se realizó un levantamiento que arrojó como resultado que en esta red de vapor se encuentran sin aislamiento térmico 50 metros de tuberías de 1 pulgada, 30 metros de tuberías de 2 pulgadas y 30 metros de tuberías de 4 pulgadas, procediendo a realizar los cálculos correspondientes.

En la Tabla 1 se muestran las pérdidas en tuberías según su diámetro y ubicación dentro o fuera de edificaciones en kcal/hm, que al multiplicar por la cantidad de metros da como resultado la pérdida total para ese diámetro de tubería en la red de vapor. Se toma una diferencia de temperatura de 1500 °C basado en la temperatura de salida del vapor y el medioambiente. Con lo anteriormente expuesto se calcula una pérdida total por no poseer aislamiento las tuberías de la red de vapor, de 61 890 kcal/h.

Se pueden calcular las pérdidas en el tanque de agua a alimentar a la caldera por no poseer aislamiento térmico según el diámetro y la ubicación horizontal o vertical, así como su longitud. El tanque tiene una capacidad de 5,65 m³, con un diámetro de 1200 mm y una longitud de 5 m. Se toma una diferencia de temperatura de 300 °C entre la temperatura del agua en el tanque y el medioambiente, y se aclara que en este lugar se recupera condensado. Con lo expuesto se calcula una pérdida total por no poseer

aislamiento el tanque de agua a alimentar a la caldera, de 15 005 kcal/h.

La pérdida total por no presentar aislamiento térmico estos componentes dentro del proceso de generación de vapor, es de 76 895 kcal/h, lo que es igual a 321 421 kJ/h.

Calculando el nuevo consumo de combustible con la variante de insular las tuberías y el tanque de agua a alimentar, da como resultado 241,39 kg/h, valor inferior al consumo de combustible anterior (286,45 kg/h) y que brinda un ahorro de 45,06 kg/h.

Análisis económico de la variante propuesta:

- Plazo de recuperación de la inversión (PRI)
- El plazo de recuperación se define como el período de tiempo necesario, para recuperar el capital invertido en forma de flujo de efectivo de un proyecto; de forma analítica puede calcularse según [Peters y Timmerhaus, 1968].

$$PRI = \text{Costo de Inversión} / \text{Ganancia (Años)}$$

El mismo es una medida de lo pronto que se recuperará el dinero invertido. Si la razón principal de una inversión es recuperarla lo más pronto posible, o si se analizan tecnologías que cambian significativamente en períodos de tiempos cortos, este es el mejor método de evaluación de una alternativa dada. Si se considera como costo de inversión el monto total a pagar por el trabajo de aislar térmicamente las tuberías de vapor y el tanque de agua a alimentar a la caldera, y como ganancia el costo monetario del ahorro de combustible en el período de un año.

El costo de montaje de aislamiento según gasto de montaje (cada 100 m de tuberías) se muestra en la tabla 2.

En el documento de referencia, al igual que las pérdidas de calor en tuberías sin aislar, viene recogido el costo del montaje de esta protección térmica, tomando como referencia la diferente ficha de costo de esta actividad en el sistema Alastor, por lo que se puede realizar el cálculo económico.

Tabla 1. Pérdidas en tuberías

Diámetro de tubería en pulgadas	Longitud en metros	Dentro de edificaciones en metros	Fuera de edificaciones en metros	Pérdidas en kcal/h	Pérdidas en kJ/h
1	50	15	35	14 600	61 028
2	30	10	20	16 330	68 259,4
4	30	10	20	30 960	12 412,8

Tabla 2. Costo del aislamiento de las tuberías

Diámetro de la tubería (pulgadas)	Costo del aislamiento cada 100 m (CUP)	Longitud de la tubería en metros	Costo (CUP)
11	4526,59	50	2263,29
2	6816,47	30	2044,94
4	10621,82	30	3186,55

El costo total sería de 7494,78 en moneda total, que incluye el gasto de materiales y mano de obra.

PRI = 0,21 años, lo que es aproximadamente 77 días.

Conclusiones

Se aplicó el método indirecto para la evaluación de la eficiencia energética de los generadores de vapor, demostrando que la eficiencia bruta del generador por el método indirecto es actualmente de 87,8 %.

Se realizó el análisis económico correspondiente al aislamiento térmico de las tuberías y el tanque de agua a alimentar a la caldera, lo que además disminuirá el consumo de combustible en 45,06 kg/h.

Con el análisis económico se demuestra que al insular los tramos de tuberías que faltan, el costo de inversión es de 7494,68 pesos y el plazo de recuperación sería de 77 días.

Bibliografía

- CALVO RAMOS, D. (2010). *Evaluación del generador de vapor del Combinado Cárnico Álvaro Barba Machado con diferentes combustibles*. Tesis presentada en opción de graduación de Ingeniero Químico, Universidad de Camagüey, Cuba: 63.
- BORROTO NORDELO, A. E. (2005). *Ahorro de Energía en Sistemas de Vapor*. Cienfuegos: Editorial Universidad de Cienfuegos.
- PETERS, M. Y M. TIMMERHAUS (1968). *Plant design and economics for Chemical Engineers*. La Habana: Ed. Pueblo y Educación.
- RUBIO, A. M. (2015). *Generadores de Vapor, Funcionamiento y Explotación*. Santa Clara: Ed. Feijóo.

Propuesta de recuperación de un agua residual de la Empresa Ernesto Ché Guevara

Por Ing. Sorángel Rivas Romero*, M. Sc. Aimet Rómulo Rodríguez**, Ing. Gerardo Menés Vuelta***

*Centro de Investigaciones del Níquel.
srivas@cil.moa.minem.cu

**Centro de Investigaciones del Níquel.
aromulo@cil.moa.minem.cu

***Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara.
GMenes@ecg.moa.minem.cu

Resumen

En el Centro de Investigaciones del Níquel se desarrolló una investigación en la que se evaluó un tratamiento para el agua residual de una de las canalizaciones (MAE-3) de la Empresa Productora de Níquel Ernesto Che Guevara, con el objetivo de disminuir la carga contaminante vertida al medio por esta MAE, y la reincorporación del agua al proceso productivo. Esta canalización vierte, como promedio, 276 m³/h de agua proveniente de los baldeos de las plantas de proceso y de las operaciones de absorción de amoníaco. El tratamiento aplicado consistió en la coagulación-floculación e intercambio iónico con zeolita. Se demostró, mediante corridas a escala de laboratorio, que la coagulación con sulfato de aluminio a una dosis de 10 ppm y la floculación con el floculante A 130 a la dosis de 0,6 ppm, logra la eliminación de 99,87 % de los sólidos en suspensión y elementos como el cobre, hierro y níquel disminuyen considerablemente su concentración. Con la utilización de zeolita se puede disminuir la concentración de nitrógeno presente en el residual, disminuyendo la concentración de amoníaco hasta cerca de 15 % del inicial. Con ello se obtiene un agua con características físico-químicas adecuadas para reutilizar en tareas de baldeo de las plantas y para el regado de los caminos mineros, además de que podría reincorporarse para ser suavizada y utilizada en los sistemas de absorción de amoníaco, dejando de consumir un volumen de agua de 2 106 816,72 m³/año de la presa que abastece la población del municipio Moa.

Palabras clave: agua, recuperación, tratamiento.

Proposal for waste water recovering at Commander Ernesto Che Guevara Company

Abstract

Investigations were carried out at the Nickel Investigation Center aimed at assessing a treatment for Commander Ernesto Che Guevara nickel Producing Company's waste water canalization (MAE-3), with purpose of reducing the contaminating load that is poured into the environment through this canalization, as well as reincorporating this waste water into the productive process again. This canalization pours an average of about 276 m³/h waste water which comes the cleaning jobs that are performed at the process plants and from the ammonia absorption operations. The proposed treatment was based on the coagulation–flocculation and ionic exchange processes with zeolite. By means of laboratory scale tests runs, it was proved that coagulation with aluminum sulfate at a dosage of 10 ppm and flocculation with the flocculent A 130 at a dosage of 0,6 ppm, enable to remove 99,87 % of the suspended solids and also, it was observed that the elements such as copper, iron, and nickel reduce their concentration significantly. Zeolite

use may reduce the concentration of the nitrogen present in the wastes, reducing ammonia concentration at about 15 % from the initial one. Besides, it allows getting water with the proper physical–chemical characteristics, so that this water may be used again for the plant cleaning jobs, as well as for spraying it on the surface of the mining roads. Also, this water could be recovered to be softened and used at the ammonia absorption system; therefore a volume of about 2 106 816,72 m³/year of water may be saved from the water dam that supplies water to Moa Township’s population.

Key words: water, recovery, treatment.

Introducción

En la Empresa Ernesto Che Guevara (ECG) se consumieron en 2016, 9109,18 m³ de agua; de ello, alrededor de 7665 m³ fueron vertidos a las cinco canalizaciones con que cuenta la empresa para el trasiego hasta la zona costera de las aguas residuales del proceso fabril; la composición de estas aguas posee gran cantidad de sólidos en suspensión y elementos que se encuentran fuera de los límites permisibles para su vertimiento, según lo estipulado en la norma cubana NC 521:2007 *Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas-Especificaciones* [NC 521:2007].

Teniendo en cuenta que el volumen de agua vertido al medio es significativo, se hace necesario realizar acciones encaminadas a la recuperación de, al menos, una parte del agua que es desechada por esta empresa a través del sistema de desagüe, y aplicar tratamientos a estos residuales para disminuir su carga contaminante. Con este objetivo fue propuesto un proyecto de investigación por el Centro de Investigaciones del Níquel, el que se enfocó específicamente en la canalización denominada MAE-3, la que trasiega agua proveniente de la planta de secado y molienda del mineral, taller mecánico, planta termoeléctrica, laboratorio analítico central, planta de recuperación de amoníaco y de la cocina comedor de la empresa; este canal vierte como promedio 276 m³/h.

Los sólidos en suspensión contenidos en este residual son elevados, y por ello un tratamiento por coagulación-floculación podría ser una alternativa para su disminución y de los elementos contaminantes asociados a los mismos, pudiéndose obtener un agua con características adecuadas para su utilización en la industria. En el caso del nitrógeno, que es otro de los elementos que se encuentra fuera de los límites permisibles para el vertimiento, luego de aplicar la coagulación-floculación su concentración se mantiene por encima de los 240 mg/L; después de realizar un estudio de los posibles tratamientos a aplicar se decidió el intercambio iónico con zeolita, mineral que tiene depósitos en prácticamente todas las provincias del país.

Materiales, métodos y equipamientos

Para determinar la dosis óptima de los coagulantes y floculantes a utilizar, es necesario realizar pruebas de jarras en una mesa de coagulación para, de forma analítica y visual, determinar la eficacia de cada coagulante y floculante en el proceso [AWT, 2001].

Materiales:

Agua residual

Tabla 1. Características del residual de la MAE-3 [Rivas, 2017]

Elementos	Prom.	Máx.	Mín.	NC 521:2007 Límite permisible
Ni, mg/L	10,21	39,42	0,20	4
pH	8,47	8,95	7,34	5,5-9,0
Fe, mg/L	0,12	0,24	0,00	10
Cr, mg/L	0,03	0,10	0,00	5
S.S., mg/L	271,22	1437,00	28,00	75
Sól Sed	1,25	2,00	1,00	10
A&G, mg/L	53,75	120,00	0,00	30
DQO, mg/L	27,50	50,00	10,00	190
DBO ₅ , mg/L	32,00	60,00	8,00	75
Al, mg/L	0,10	0,24	0,00	5
Cd, mg/L	0,00	0,00	0,00	0,2
Pb, mg/L	0,00	0,00	0,00	0,2
Cu, mg/L	0,01	0,03	0,00	2
Hg, mg/L	0,00	0,00	0,00	0,01
Cr 6+, mg/L	0,00	0,00	0,00	0,2
T, °C	36,60	38,50	35,30	40
Hidrocarburos totales, mg/L	-	2,40		10
As, mg/L	FL			0,3
Cianuro total, mg/L	0,00	0,00	0,00	1
Compuestos fenólicos, mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	0,5
P total, mg/L	FL			5
Organoclorados, mg/L	S.G.A.	S.G.A.	S.G.A.	1,5
N total, mg/L	213,14	419,00	7,28	20
Tolueno, mg/L	S.G.A.	S.G.A.	S.G.A.	0,7
Tricloroetano, mg/L	S.G.A.	S.G.A.	S.G.A.	0,04
Triclorometano, mg/L	S.G.A.	S.G.A.	S.G.A.	0,02
Zn, mg/L	0,07	0,14	0,02	10
Coliformes totales	5,33	16,00	0,00	1000

Leyenda:

S.S.: Sólidos en suspensión

Sól Sed.: Sólidos sedimentables

A&G: Aceites y grasas

DQO: Demanda química de oxígeno

DBO₅: Demanda biológica de oxígeno

S.G.A.: Sin garantía analítica

FL: por debajo del límite de lectura del equipo (As <0,07 y P <0,03)

Coagulantes (suministrados por las firmas SNF, CHEMATEK y producción nacional)

SNF	Poly+CathBS, Poly+CAT N 9010/5460, 50/50 ACH/PRP 2949, 50/50 ACH/PRP 2650, 50/50 ACH/PRP 4440, 50/50 ACH/PRP 4540, 80/20 ACH/PRP 2650, 80/20 ACH/PRP 2949, 80/20 ACH/PRP 4440, 80/20 ACH/PRP 4540, AC 851, ClariflocBDC AC, Clarifloc DC, FL 4820, CHEMADD A 501, Clorhidróxido de Al Poly-CA
CHEMATEK	Hidroxiclорuro de aluminio, policloruro de aluminio
Producción nacional	Sulfato de aluminio

Floculantes (fabricados por la firma francesa SNF en forma de sólidos granulados).

Tabla 2. Características de los floculantes [Rivas, 2017]

Nombre	Densidad de carga	Peso molecular
AN 905	muy baja (~5 %)	estándar
AN 905 SH	muy baja (~5 %)	alto
AN 905 VHM	muy baja (~5 %)	ultra alto
AN 910	baja (~10 %)	estándar
AN 910 SH	baja (~10 %)	alto
AN 910 VHM	baja (~10 %)	ultra alto
AN 913	baja (~13 %)	estándar
AN 923	media (~20 %)	estándar
AN 934	media (~30 %)	estándar
AN 945	alta (~40 %)	estándar
AN 945 SH	alta (~40 %)	alto
AN 945 VHM	alta (~40 %)	ultra alto
AN 956	alta (~50 %)	estándar

Zeolita

Granulometría: -3,0 mm + 1,0 mm

Tabla 3. Composición química de la zeolita, %

Al	Cd	Cu	Cr	Fe	Hg	Ni	Pb	Zn	Na
5,78	0	0,002	0	0,763	0	0,012	0	0,008	0,19

Métodos empleados:

Toma de las muestras

Para la toma de las muestras se tuvieron en cuenta aspectos indispensables para la seguridad del personal, representatividad y conservación de las mismas [Instituto de Hidrología, 2007; Instituto Nacional, 2011; ISA 5667-5, 2006; NTEINEN,1998], tales como:

- portar guantes para la toma y manipulación de las muestras;
- los pomos para las muestras a realizarles análisis físico-químico, de 1 L o más de capacidad, con tapa rosca que garantice que la seguridad en el cierre;
- las muestras para análisis de coliformes fecales, se deben tomar en frascos de 100 mL de capacidad, esterilizados, protegida la tapa con papel resistente. Dejar espacio vacío desde la superficie del líquido a la tapa, y cuidar no se moje la boca del frasco durante la toma de las muestras;
- para las muestras de DBO₅ y DQO (demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno, respectivamente) llenar los recipientes hasta la boca del frasco, y velar porque no se formen burbujas, lo que garantiza que no quede atrapado en el frasco, el oxígeno del ambiente;
- el control de la temperatura y del pH realizarlo en el momento de toma de las muestras.

• *Método para la evaluación de coagulantes* [Menés, 2016]

1. Tomar aproximadamente 50 L de agua potable.
2. Tomar muestra para determinar pH y enviar al laboratorio para los análisis a realizar.
3. Medir 900 mL de agua y añadirla en cada beaker.
4. Fijar una agitación de 100 rpm en el agitador para mantener una turbulencia uniforme, un minuto.
5. Bajar la agitación a 20 rpm.
6. Adicionar el coagulante según la dosis.

- Aumentar velocidad de agitación a 100 rpm por 3 min.
- Detener la agitación y tomar muestras a los 30 min.

Método para la evaluación de floculantes [Menés, 2016]:

- Tomar aproximadamente 50 litros de agua residual.
- Tomar muestras, determinar pH y enviar al laboratorio para los análisis a realizar.
- Medir 900 mL de agua y añadirla en cada beaker.
- Fijar una agitación de 100 rpm en el agitador para mantener una turbulencia uniforme, un minuto.
- Bajar la agitación a 20 rpm.
- Adicionar el coagulante según la dosis.
- Aumentar velocidad de agitación a 100 rpm por tres minutos.
- Bajar la agitación a 20 rpm, mantenerlo durante cinco minutos.
- Adicionar el floculante según la dosis.
- Mantener agitación durante cinco minutos.
- Detener la agitación y tomar muestras a los 30 min.

Método para las corridas de intercambio iónico

I. Acondicionando la zeolita.

- Tomar muestra inicial y realizar análisis de amoníaco por valoración.
- Fijar tiempo de muestreo para que sea muestreado cada volumen de la cama (BV).
- Alimentar solución de ácido clorhídrico a 10 % en columna previamente acondicionada con 100 mL de zeolita, con calibración del flujo a evaluar.
- Tomar muestras para la medición de pH.
- Cuando tres muestras tengan pH ácidos (estables), dejar muestreo.
- Lavar resina con agua destilada hasta lograr pH cercanos al del agua destilada.
- Alimentar solución de NaCl a 10 %.
- Cuando tres muestras tengan pH básicos altos, parar muestreo.
- Alimentar agua residual.
- Tomar muestras para la determinación de amoníaco.
- Cuando tres muestras tengan amoníacos similares al inicial, dejar muestreo.
- Lavar resina con agua destilada.

II. Sin acondicionar la zeolita.

- Tomar muestras iniciales y realizar análisis de amoníaco por valoración.
- Fijar tiempo de muestreo para que sea muestreado cada volumen de la cama (BV)
- Alimentar agua residual.
- Tomar muestras para la determinación de amoníaco.
- Cuando tres muestras tengan amoníacos similares al inicial, dejar muestreo.
- Lavar resina con agua destilada.

Técnicas analíticas:

Técnica	Determinación
Espectrometría de absorción atómica	Fe, Al, Hg, Zn, Cd, Ni, Pb, Cu, Cr
Espectrofotométrica (colorimetría)	Cr+6
Gravimétrica	Sólidos totales en suspensión, aceites y grasas, hidrocarburos totales
Volumétrica	Sólidos sedimentables, cianuro, DBO ₅ , DQO
Electrométrica	pH
Potenciométrica	N total, compuestos fenólicos
Espectrometría de emisión con plasma acoplado por inducción (ICP)	Fósforo, arsénico
Dilución en tubos múltiples	Coliformes totales

Equipamiento:

Equipos:

- Mesa de coagulación (ASTEL).
- Equipo para medir turbiedad (HACH210Qjs).
- Equipo para medir color (HACHDR-2800).
- Equipo para medir pH (HANNA HI 9126).
- Balanza analítica (KERN ABS 120-4).

Cristalería:

- Vasos de vidrio de 1,0 L.
- Pipetas de 1,0, 5,0 y 10 mL.
- Probeta de 2,0 L.

Miscelánea:

- Recipientes plásticos (de 0,5, 5, 10 y 25 L).
- Frascos plásticos para muestras (de 100 y 250 mL).

Resultados

Después de evaluados todos los coagulantes a las dosis de 10, 15 y 20 ppm, los mejores resultados de precipitación de los sólidos en suspensión se obtuvieron con los coagulantes sulfato de aluminio, policloruro de aluminio, AC 851, 80/20 ACH/PRP 4540 y Poly+CAT N 9010/5460. En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos con estos cinco coagulantes a las dosis evaluadas. Los mejores resultados de precipitaciones se obtienen con las dosis de 10 y 15 ppm, escogiéndose para las corridas posteriores con floculantes el coagulante sulfato de aluminio a dosis de 10 ppm, dado a que el mismo es producido en el país.

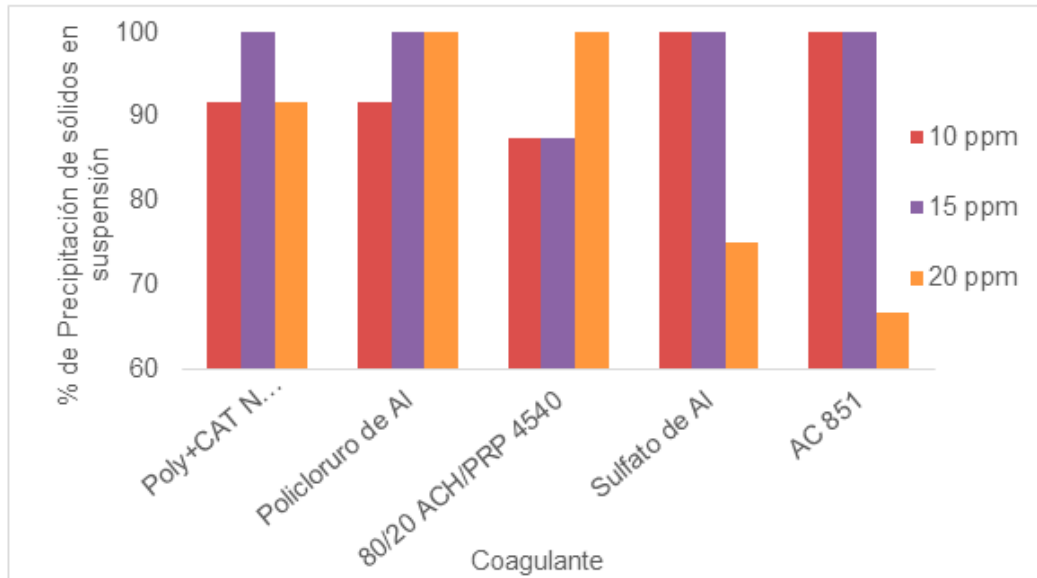


Fig. 1. Precipitación de los sólidos en suspensión.

Corridas experimentales de evaluación de floculantes. Para mejorar la disminución de los sólidos en suspensión presentes en el residual, fueron evaluados diferentes floculantes de diferentes densidades de carga y pesos moleculares, a dosis de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y 1,0 ppm.

A la dosis de 0,8 ppm se lograron los mayores valores de disminución de los sólidos suspendidos, en 11 floculantes con precipitación de 100 %. Los resultados obtenidos no muestran que exista relación entre el peso molecular y

la densidad de carga de los floculantes, con la precipitación de los sólidos. Ver Tabla 4.

Además, se determinó la disminución de los sólidos sin adicionar ningún reactivo y solo se logra 78,57 % de eliminación de los mismos.

Se seleccionaron los cuatro floculantes de mejores resultados para hacer pruebas confirmatorias, y se adicionó a la investigación el A 130, que es el floculante que se utiliza en la planta potabilizadora de agua de la ECG;

Tabla 4. Precipitación de los sólidos en suspensión con diferentes floculantes y dosis, en %. (Coagulante sulfato de aluminio a 10 ppm)

Floculantes	Dosis, ppm				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
AN 905	100,00	85,71	100,00	88,24	85,29
AN 905 SH	78,57	78,57	50,00	100,00	100,00
AN 905 VHM	50,00	85,71	78,57	100,00	100,00
AN 910	100,00	100,00	71,43	100,00	91,18
AN 910 SH	85,71	100,00	57,14	100,00	70,59
AN 910 VHM	64,29	100,00	100,00	100,00	76,47
AN 945	42,86	100,00	82,35	100,00	82,35
AN 945 SH	92,86	100,00	21,43	88,24	88,24
AN 945 VHM	64,29	100,00	50,00	44,12	100,00
AN 913	92,86	92,86	100,00	100,00	100,00
AN 923	28,57	78,57	7,14	100,00	64,71
AN 934	100,00	57,14	92,86	100,00	100,00
AN 956	42,86	28,57	57,14	100,00	94,12

los resultados para todos los floculantes a todas las dosis, mejoraron con respecto a lo obtenido en las pruebas exploratorias; solo el AN 910 VHM obtiene resultados de precipitación de sólidos inferiores a 80 %, a dosis de 0,6 y 0,8 ppm (ver Fig. 2).

Teniendo en cuenta estos resultados y que el A 130 es un floculante que ya está en existencia en la ECG, se decidió escoger este floculante a la dosis de 0,6 ppm debido a que a esta dosis se observó la mejor formación de flóculos.

Corridas experimentales de intercambio iónico.

Uno de los elementos que se encuentra fuera de los límites permisibles para el vertimiento es el nitrógeno; luego de aplicar la coagulación-floculación, su concentración se mantiene por encima de los 240 mg/L y en la NC 521:2007 se establece que no puede exceder los 20 mg/L. Después de realizar un estudio de los posibles tratamientos, se decide aplicar el intercambio iónico con zeolita, mineral que tiene depósitos en prácticamente todas las provincias del país [Orozco,1998] y que ha sido utilizado por otros autores para la eliminación del amoníaco en agua [Abrahan, Córdova, Halbinger; Pavón; Rodríguez, s/a].

En la figura 3 se muestran los resultados de los experimentos realizados, en los que se varió el tratamiento previo a la zeolita y los flujos de alimentación, teniendo en cuenta lo descrito en la literatura consultada. En ninguno de los ensayos se logró la eliminación total del amoníaco, y aunque se disminuye su concentración no se logran valores inferiores al límite de nitrógeno, que es regulado por la norma 20 mg/L (amoníaco equivalente de aproximadamente 24,25 mg/L).

El mejor resultado se obtuvo dejando en contacto la zeolita con el NaCl durante 72 horas, y con este tratamiento previo se logró reducir la concentración de amoníaco hasta 15,38 % de su contenido inicial, teniéndose el punto de ruptura cuando se han circulado 4 BV.

Esquema propuesto

a) Descripción del esquema

El esquema propuesto para el tratamiento de la MAE 3 es el siguiente: alimentar el agua residual a un reactor con dos compartimientos provistos de mecanismos de agitación; en el primero se inyecta una solución del coagulante y en el segundo con una agitación inferior, se le adiciona el floculante. La mezcla de estos componentes entra a un clarificador donde sedimentan los sólidos, los que son enviados a la presa de cola y el efluente pasa a las columnas de intercambio iónico con zeolita; pasando el agua resultante a un depósito, la que posteriormente puede ser utilizada en la sección de tratamiento químico (TQA) de la planta termoenergética para la producción de agua suavizada; sustituyendo el agua cruda que es utilizada para el baldeo, para regar los caminos mineros o para adicionar al dique de cola (Fig. 4).

b) Cálculo del gasto de operaciones

Se realizó un balance de materiales y se estimaron los gastos, por concepto de materiales a emplear en las operaciones de coagulación-floculación, definiéndose que es posible reincorporar al proceso un volumen anual de 2 106 816,72 m³ de agua, para lo cual se deben gastar 26 604,79 pesos en reactivos químicos, arrojando un ahorro de 500 099,39 pesos anuales.

c) Evaluación de la reincorporación del agua

En la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara el agua cruda es utilizada, una parte, para la reposición en los sistemas de enfriamiento, en los sistemas de alta presión, en parte de los baldeos de las plantas, para el regado de los caminos mineros y para formar la película de agua del dique de cola; el agua potable es consumida por todos los procesos de la planta termoenergética, como parte de la reposición de los sistemas de enfriamiento; en la mina para el lavado de los camiones, para la limpieza de las plantas de secado del mineral y en la de calcinación, además de poder ser consumida por los trabajadores.

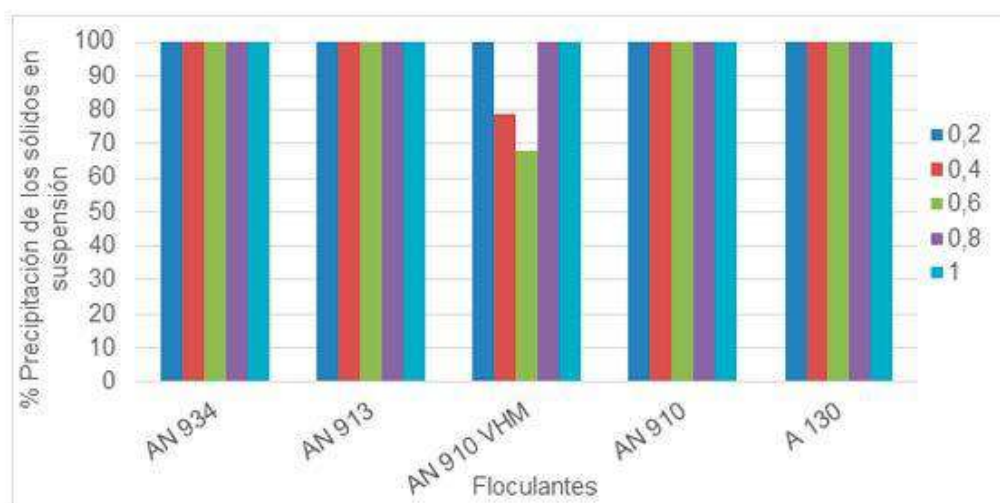


Fig. 2 Confirmación de los resultados de precipitación de los sólidos utilizando floculantes.

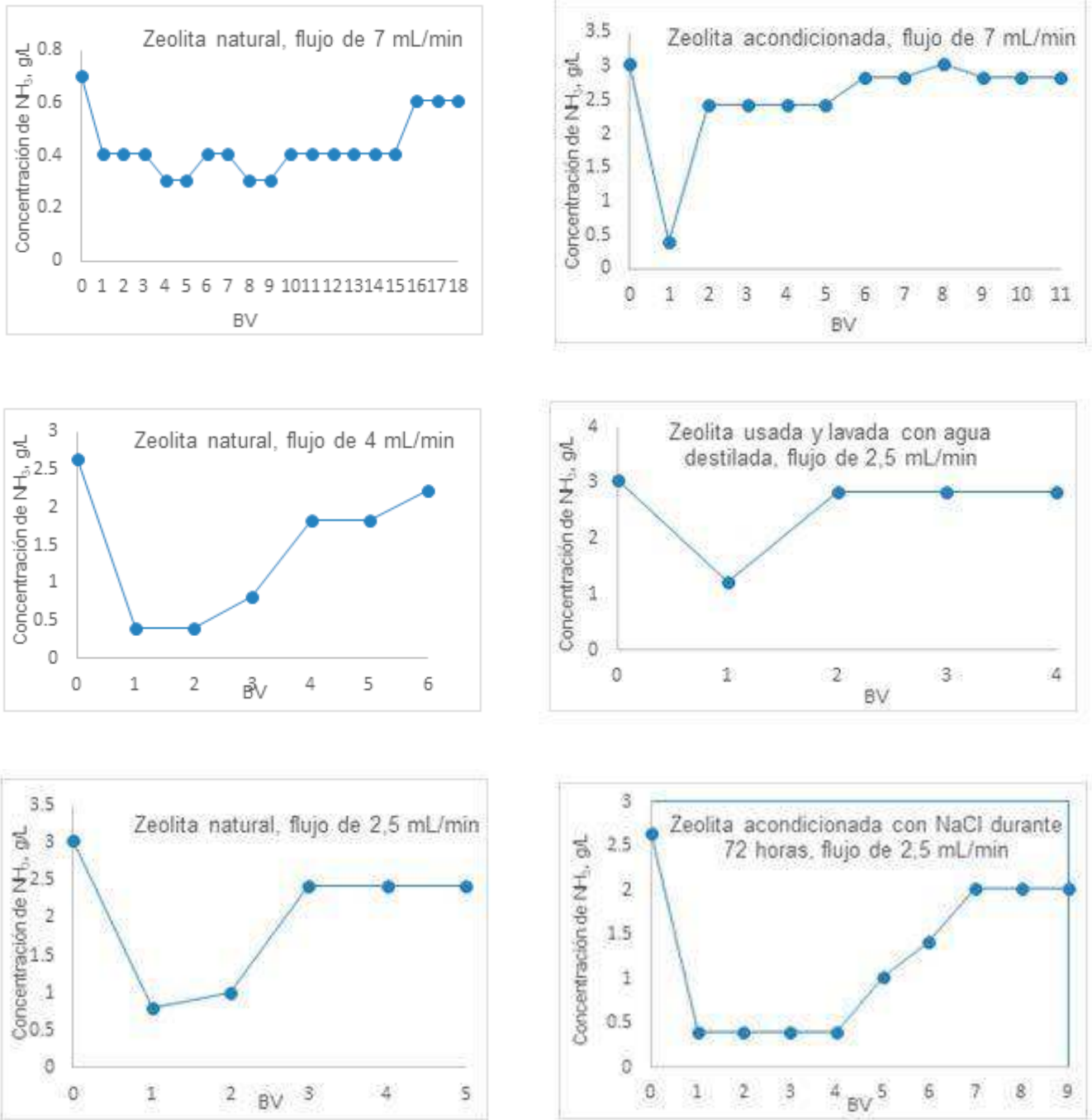


Fig. 3. Evaluación de la zeolita con diferentes condiciones de trabajo.

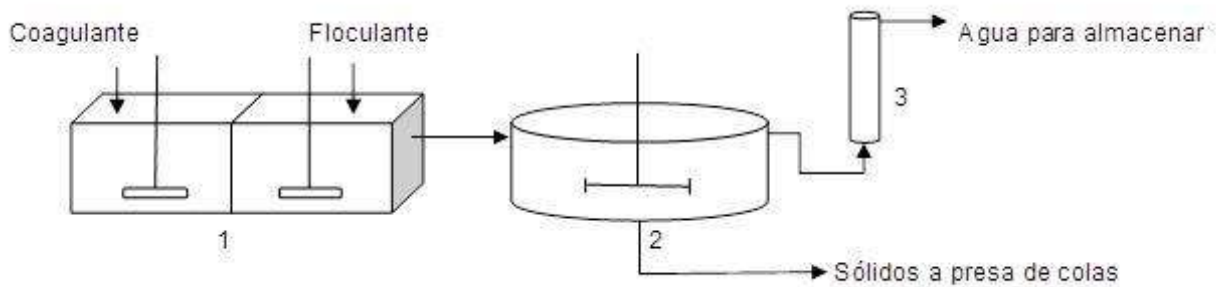


Fig. 4. Esquema de tratamiento propuesto (1- Reactor para la coagulación-floculación, 2- Clarificador, 3- Columna de intercambio iónico).

Teniendo en cuenta que el consumo es elevado y que los tipos de aguas y fines son diversos, se realizó un análisis para definir en qué punto del proceso es posible reincorporar el residual tratado, teniendo en cuenta las características obtenidas después del tratamiento (Tabla 5).

Primeramente se valoró la posibilidad del uso en los sistemas de enfriamiento, variante que no procede porque existen varios parámetros que están fuera de los rangos establecidos; por ejemplo, el pH es de un agua incrustante, lo que no es conveniente para estos sistemas; esta característica también se aprecia en los valores de alcalinidad tan elevados, lo que da la medida de que es una fuente potencial de depósitos; de igual manera, el amoníaco tan elevado desactiva la acción de los biocidas utilizados en estos sistemas para el control biológico.

Luego se valoró sustituir parte del agua potable que es alimentada a la sección de tratamiento químico de la planta termoenergética, la que produce un agua suavizada que es alimentada a las torres de absorción de amoníaco de las plantas de lixiviación y lavado y recuperación de amoníaco, a razón de 500 m³/h; esta variante, según la caracteri-

zación realizada, no presenta ningún inconveniente y tiene la ventaja de poseer una concentración de amoníaco que enriquecería el licor débil obtenido, para ser usado en la planta de lixiviación y lavado.

De igual forma podría ser utilizada sustituyendo parte del agua cruda que es regada sobre los caminos mineros, que es adicionada al dique de cola y en el baldeo de las diferentes plantas de proceso, siempre y cuando se logre un mayor por ciento de eliminación del amoníaco contenido.

Conclusiones

Después de hacerse el análisis de la propuesta de tratamiento al residual, se concluye que es posible recuperar el agua que es vertida a la canalización MAE-3 de la ECG, lo que reincorpora al proceso 2 106 816,72 m³ anuales de agua, con un gasto por concepto de reactivos de 26 604,79 pesos/año, mediante un esquema de operación sencillo que consta de un reactor con dos compartimientos, un clarificador y columnas para el intercambio iónico.

Tabla 5. Características del residual tratado

Elementos	Residual tratado por coagulación-floculación	Residual después del intercambio iónico	Valores máximos para el uso en sistemas de enfriamiento [https,2018]
pH	8,97	8,65	7,5-8,5
Si, mg/L	0	0	< 180
Alcalinidad, mg/L	>1 000	>1 000	< 25
Dureza total, mg/L	322,43	173,82	< 400
Cloruros, mg/L	978	626	< 300
Ca, ppm	54,75	56,75	-
Mg, ppm	45,1	7,8	-
Dureza cálcica, mg/L	NP	NP	< 200
Turbidez, NTU*	3	2	< 20
Color, U** (Pt/Co)	9	2	-
Conductividad, µs/cm	6,01	5,57	<4 000
Hierro, mg/L	0	0	< 0,05
Cobre, mg/L	0	0	< 0,01
Aceites y grasas, mg/L	0	0	-
Sólidos en suspensión, mg/L	9	0	-
NH ₃ , mg/L	2 640,30	406,20	< 5

NP: No procede, por el método de valoración no fue posible determinar estos elementos, no se observó cambio de coloración de las muestras.

Bibliografía

- Abrahan Isla, Osvel, Esteban Luis Alfonso Olmo y Martha Velázquez Garrido (s/a). «Remoción de Cu de las aguas de la mina grande del cobre con el empleo de zeolita y sulfuro de sodio». *INFOMIN* Vol.8, No.2, Julio-Diciembre, pp. 34-46. ISSN: 1992 4194.
- ASSOCIATION OF WATER TECHNOLOGIES (2001). *Water Treatment AWT*. USA. Technical Manual. 850 pp. Autor corporativo.
- CÓRDOVA RODRÍGUEZ, VALDUVINA, INOCENTE RODRÍGUEZ IZNAGA, DARIA TITO FERRERO Y RAQUEL M. Acosta Chávez (2013). «Zeolita natural de Palmarito de Cauto para el tratamiento de licores residuales de industrias de fibrocemento». *Minería y Geología*, v.29n.1, enero-marzo, 2013, p. 42-59.
- HALBINGER FLORES, CHRISTIAN; ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA Y ALFONSO DURÁN MORENO (s/a). *Eliminación de amoníaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas*(s/a). Instituto de Ingeniería, UNAM, Apdo. Postal 70-472, Ciudad Universitaria, México D. F.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (2007). *Toma de muestra de aguas residuales*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE SALUD (2011). *Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio*. Bogotá, Colombia. 2011. ISBN: 978-958-13-0147-8.
- ISA 5667-5. *Water quality-Sampling-Part 5: Guidance on sampling of drinking water from treatment works and piped distribution systems*(2006). Second edition.
- MENÉS VUELTA, GERARDO Y SORÁNGEL RIVAS ROMERO (2016). *Pretratamiento al agua de entrada al proceso de desmineralización de la empresa Ernesto Che Guevara*. Etapa 05. CEDINIQ. Octubre 2016.
- NTEINEN 2 169:98. *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras*(1998). Norma técnica ecuatoriana. Primera edición. 1998.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2007). *NC 521:2007. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas-especificaciones* (2007). Primera Edición. La Habana, Cuba.
- Orozco, G. y R. Rizo(1998). «Depósitos de zeolitas naturales de Cuba» (1998). Pp. 335-349. *Acta Geológica Hispánica*. V. 33, No. 1-4.
- PAVÓN, T., R. BRIONES, Y K. ILANGOVA (s/a). *Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de cadmio, cobre, hierro, níquel, plomo y zinc del agua utilizando zeolita natural tipo clinoptilolita*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-472. México D.F. 04510, México.
- RIVAS ROMERO, SORÁNGEL Y AIMET RODRÍGUEZ RÓMULO (2017). *Tratamiento a agua residual de la ECG* (2017). Etapa 02. CEDINIQ, Noviembre 2017.
- RIVAS ROMERO, SORÁNGEL Y AIMET RODRÍGUEZ RÓMULO (2017). *Tratamiento a agua residual de la ECG* (2017). Etapa 03. Proyecto 600199. CEDINIQ, Diciembre 2017.
- RODRÍGUEZ-FUENTES, GERARDO E INOCENTE RODRÍGUEZ IZNAGA (s/a). *Eliminación de metales tóxicos mediante zeolitas naturales*. [https://es.scribd.com/doc/118768305/Parámetros -del-agua -de-enfriamiento](https://es.scribd.com/doc/118768305/Parámetros-del-agua-de-enfriamiento), consultado el 6 de febrero 2018.