



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR

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

70

DIRECTOR GENERAL

Dr. Luis Bériz Pérez

EDITORES

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

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Luis Bériz 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. Dany Oliva Merrecio
Dra. Dania González Couret
Lic. Bruno Henríquez Pérez
Lic. Ricardo Bériz Valle
M.Sc. Mario A. Arrastía Ávila

Eco Solar, no. 70 / 2019

Revista científica de las
fuentes renovables de energía
octubre-diciembre, 2019
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

ESTUDIO DEL CONSUMO ELÉCTRICO DEL CAYO DE VILLA CLARA Y SU PRONÓSTICO DIARIO A LARGO PLAZO 2019-2020. CUBA.....	3
Ricardo Osés Rodríguez, Humberto Machado Fernández, Alfredo A. González Meneses y Rigoberto Fimia Duarte	
APLICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN PULVERIZADA DE BIOMASA EN LAS CALDERAS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	9
Abelardo Daniel Rodríguez Arias y Liz Belkis Rosabal Ponce	
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ESTUFAS HÍBRIDAS, ECOLÓGICAS, EFICIENTES Y DE BAJO COSTO.....	16
Ángel Eugenio Infante Haynes, Gerardo Hernández Ramírez, Ivett del Carmen Quevedo Pérez, Ing. Roberto Ramírez González, Irisbel Infante Valiente y Zolio Bienvenido Suárez Pérez	
MÉTODO DEL CAMPO UNIVERSAL PARA EL CÁLCULO DE CAMPOS DE HELIOSTATOS DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS HÍBRIDAS BAGACERAS-SOLARES.....	20
Luis Bériz Pérez	
DISMINUCIÓN DE LOS COSTOS DEL KWH FOTOVOLTAICO.....	26
Daniel Stolik Novygrad	
PRINCIPALES IMPACTOS DEL MANEJO INTEGRADO DEL RECURSO AGUA EN LA EMPRESA DE ACEROS INOXIDABLES DE LAS TUNAS (ACINOX LAS TUNAS).....	33
Victoria Serrano Pérez	
CONVOCATORIA.....	42

editorial
cubasolar

ESTUDIO DEL CONSUMO ELÉCTRICO DEL CAYO DE VILLA CLARA Y SU PRONÓSTICO DIARIO A LARGO PLAZO 2019-2020. CUBA

Por **M. Sc. Ricardo Oses Rodríguez***, **M. Sc. Humberto Machado Fernández****, **Ing. Alfredo A. González Meneses***** y **Dr. C. Rigoberto Fimia Duarte******

*Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara.

E-mail: ricardo.oses@vcl.insmet.cu

**Empresa Eléctrica Provincial Villa Clara.

E-mail: humbertom@elecvccl.une.cu

***Empresa Constructora de la Industria Eléctrica Villa Clara (ECIE).

****Facultad de Tecnología de la Salud Julio Trigo López, Universidad de Ciencias Médicas de Villa Clara, Cuba.

E-mail: rigobertoofd@infomed.sld.cu

Resumen

En este trabajo se modeló el consumo eléctrico mensual de un cayo de la provincia Villa Clara, Cuba. Se utilizó una base de datos desde el primero de enero de 2018 hasta 25 de mayo de 2019, un total de 12 750 casos. Se utilizó la metodología de regresión Objetiva Regresiva ROR. Se obtuvieron tres modelos uno a corto plazo de un día, otro con un año de antelación y otro combinando el valor predicho a largo plazo como predictor para el corto plazo con un año de antelación. Como conclusiones podemos decir que el mejor modelo es el combinado, el impacto del consumo cuando es igual a cero, se presenta con una caída de 13,71 MWh, que representa 67,55 % del valor máximo del consumo que es de 20,3 MWh y 10 % por encima del valor medio de 12,42 MWh. En general, el pronóstico utilizando el valor pronosticado a largo plazo para obtener el pronóstico a corto plazo da mejores resultados del comportamiento del consumo de electricidad del cayo. La tendencia de los modelos es cero, lo que plantea una estabilidad en el consumo y un buen manejo del mismo.

Palabras clave: Consumo eléctrico, Cayo, Villa Clara, Cuba, modelación, pronóstico.

STUDY OF THE ELECTRICITY CONSUMPTION OF THE VILLA CLARA CAY AND ITS LONG-TERM DAILY FORECAST 2019-2020. CUBA

Abstract

This work modeled the monthly electricity consumption of a key in the Villa Clara province, Cuba. A database was used from January 1, 2018 to May 25, 2019, a total of 12,750 cases. The ROR Regressive Objective regression methodology was used. Three models were obtained one short-term one day, another one year in advance and another combining the predicted long-term value as a predictor for the short term with one year in advance. As conclusions we can say that the best model is the combined one, the impact of consumption when it is equal to zero, is presented with a drop of 13.71 MWh, which represents 67.55% of the maximum value of consumption that is 20.3 MWh and 10% above the average value of 12.42 MWh. In general, the forecast using the predicted long-term value to obtain the short-term forecast gives better results of the behavior of the electricity consumption of the key. The tendency of the models is zero, which poses stability in consumption and a good handling of it.

Keywords: Electricity consumption, Cayo, Villa Clara, Cuba, modeling, forecast.

Introducción

Los problemas energéticos tienen cada vez más importancia en el mundo, fundamentado por el desarrollo acelerado de algunos países, lo que ha propiciado una competencia intensa por el control de las reservas de petróleo. Otros factores a considerar son el acceso a la energía, la volatilidad de los precios, los impactos negativos en el medioambiente donde la emisión de gases efecto invernadero se considera la principal causa de la elevación de la temperatura de la tierra y los océanos [Sawaengsak, *et al.*, 2014]. El cambio climático es un tema tratado a escala global a partir de la Cumbre de la Tierra en 1992 y en el año 2015 mediante la aprobación de la Agenda de Desarrollo Sostenible denominada Agenda 2030, en la que uno de sus objetivos es el compromiso de garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos [ONU, 2015]; ello incluye el incremento del uso de las fuentes renovables de energía y la mejora de la eficiencia energética.

Una de las vías más importantes para mitigar el cambio climático es remover los obstáculos que impiden que se realicen mejoras en la eficiencia energética tanto en la industria, los servicios, los hogares y la sociedad, donde se hace necesario un cambio en la forma de su gestión [Sawaengsak, *et al.*, 2014]. La sociedad moderna está sustentada en la dependencia de los combustibles fósiles, representado por el consumo básico de una persona, los usos productivos y las necesidades de la sociedad, por lo que el sector energético demanda el uso de energía limpia, con la adopción de tecnologías basadas en las fuentes de energía renovables (FRE), lo cual requiere innovación que aumente el desempeño y disminuya costos [Bayer, Dolan & Urpelainen, 2013].

Otra arista en los temas energéticos lo constituye la gestión energética [GE] que es parte del sistema de gestión de una organización dedicado a desarrollar e implementar su política energética. La GE o administración de la energía es un subsistema de la gestión empresarial que abarca las actividades de administración y aseguramiento que le confieren a la organización la aptitud para satisfacer de forma eficiente sus necesidades energéticas [Borroto, 2006]. En el año 2011 la Organización Internacional de Normalización [ISO] aprueba la norma ISO 50001: 2011 Sistema de Gestión de la Energía. Requerimientos para su uso, la cual tuvo por antecedentes las normas técnicas desarrolladas en el periodo 2001 hasta el 2009 en Dinamarca, Suecia, Estados Unidos, Irlanda, España y la Unión Europea [Correa Soto, Borroto Nordelo, Alpha Bah, González Álvarez, Curbelo Martínez & Díaz Rodríguez, 2014]. Por este motivo para muchas organizaciones la GE se ha convertido en una prioridad para reducir los costos de energía, se ajustan a los requisitos reglamentarios y a la mejora su imagen corporativa [Jovanović & Filipović, 2016].

La GE no es solo exclusiva de las organizaciones industriales y de servicios, sino que abarca a toda la sociedad. Reconoce a las zonas urbanas como consumidores significativos de energía y grandes emisores de CO₂ al medioambiente; por lo que GE es una necesidad a escala urbana o municipal [Elnakat & Gómez, 2015], y que los gobiernos locales lo integren a su gestión pública. La importancia de esta integración es que los gobiernos locales fomenten la

eficiencia energética y el uso de la energía limpia, debido a su influencia sobre la sociedad, y la promoción de políticas y programas para el uso de la energía [Erario, 2010].

Las primeras acciones relacionadas en la gestión energética local [GEL] datan de finales de los años 80 del siglo xx en Suecia, a partir del desarrollo de un modelo para la planificación energética en los municipios, con una importante contribución a la mejora de la gestión de los gobiernos locales en cuanto al comportamiento de sus finanzas y la reducción de los impactos sobre el medio ambiente de la localidad [Wene & Rydén, 1988]. En la actualidad la gestión energética municipal incluye el uso de herramientas apoyadas en software, la planificación a corto, mediano y largo plazo mediante la modelación y estudios de escenarios y la socialización [Lin & Huang, 2010]. En el tiempo transcurrido desde las primeras experiencias en Suecia se han desarrollado numerosos modelos, metodologías, estrategias e indicadores para la gestión energética local, algunas de las cuales se relacionan a continuación:

- Modelo de optimización energético regional y municipal [DEECO], aplicado en la ciudad Würzburg Heidingsfeld, Alemania [Bruckner, Groscurth & Kümmel, 1997].
- Modelo de optimización del sistema energético [MODEST] y el Modelo de programación mixed integer lineal para el análisis del sistema energético, aplicado en la ciudad de Linköping, Suecia [Sundberg & Karlsson, 2000; Rolfsman, 2004].
- Modelo de gestión de la energía para la ciudad de Lucknow en Suecia [Zia & Deyadas, 2007].
- Método de planificación energética municipal, aplicado en trece municipios de la provincia de Ostergötland, Suecia [Inver, 2009].
- Modelo para la gestión energética municipal desarrollado por la Alianza Ártica en Canadá [St. Denis & Parker, 2009].
- Modelo para el desarrollo de un sistema de planificación energética municipal, aplicado en la Región Toronto-Niágara Waterloo, Canadá y Hohhot, China [Lin *et al.*, 2010].
- Metodología para el desarrollo de indicadores de sostenibilidad energética para la planificación energética local, aplicada en municipios de Portugal y en Boston, Estados Unidos de América [Neves & Leal, 2010].
- Estrategia de planificación energética municipal, aplicada en todos los municipios de Dinamarca [Sperling, Hvelplund & Vad Mathiese, 2011].
- Método para la planificación del sistema energético municipal, aplicado en Beijing, China. [Zhu, Huang, Li, He & Zhang, 2011].
- Metodología para la planificación energética municipal aplicada en 12 municipios en Italia. [Brandoni & Polonara, 2012].
- Método para la planificación energética de la comunidad, aplicado en Shanghai, China [Huang, Yu, Peng & Zhao, 2015].

Estas experiencias sobre la gestión energética local se basan fundamentalmente en la planificación energética,

Tabla 3. Coeficientes del modelo a corto plazo

Coeficientes^{a,b}

	Modelo B	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		Error típ.	Beta			
1	DS	1,055	,046	,059	22,935	,000
	DI	1,061	,046	,059	23,086	,000
	NoC	1,586E-5	,000	,009	6,420	,000
	Lag25Consumo	,907	,004	,907	243,710	,000
	StepCero	-13,713	,980	-,010	-13,997	,000

a. Variable dependiente: Cayo

b. Regresión lineal a través del origen

Modelo a largo plazo, un año de antelación

En la Tabla 4 se aprecia que todos los parámetros son significativos, el consumo depende de un año atrás y un día (Lag915oConsumo), y la tendencia a largo plazo (Tend) es a la estabilidad del consumo, o sea a ser cero.

Modelo a corto plazo con un año de antelación

En la Tabla 5 se aprecia que todos los parámetros son no significativos, excepto el parámetro Lag25Consumo P2, que significa el consumo un día atrás utilizando el valor a largo plazo P2, o sea, el valor pronosticado a largo plazo con un año de antelación, la tendencia [Tend] es casi cero.

A continuación, los gráficos (Figs. 2-4) con sus pronósticos. Pronóstico diario corto plazo. Trans_1 es el valor del consumo. En verde el valor pronosticado.

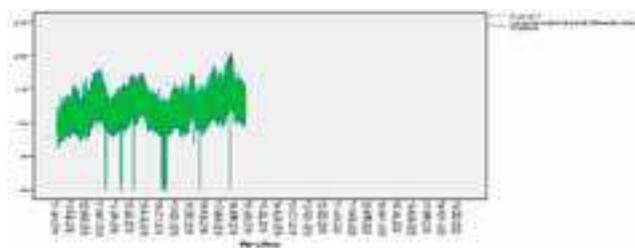


Fig. 2. Valor real y pronóstico del Consumo eléctrico del Cayo.

Tabla 4. Coeficientes del modelo con un año de antelación

Coeficientes^{a,b}

	Modelo B	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		Error típ.	Beta			
1	DS	7,911	,265	,407	29,834	,000
	DI	7,914	,265	,407	29,843	,000
	Tend	,000	,000	-,302	-14,206	,000
	Lag915oConsumo	,830	,011	,724	73,398	,000

a. Variable dependiente: Cayo

b. Regresión lineal a través del origen

Tabla 5. Coeficientes del modelo combinado con un año de antelación

Coeficientes^{a,b}

	Modelo B	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		Error típ.	Beta			
1	DS	-,020	,288	-,001	-,069	,945
	DI	,017	,287	,001	,059	,953
	Tend	-1,528E-5	,000	-,012	-,617	,537
	Lag25ConsumoP2	1,012	,014	1,006	74,785	,000

a. Variable dependiente: Cayo

b. Regresión lineal a través del origen

Pronóstico diario para el siguiente año.

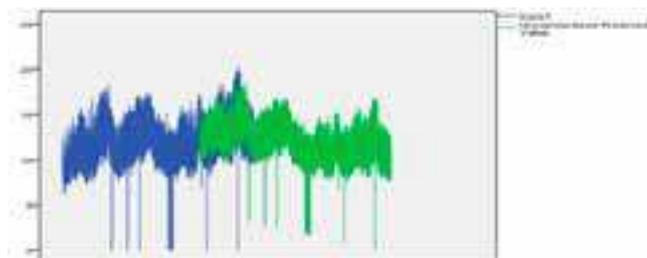


Fig. 3. Valor real y pronóstico del Consumo eléctrico del cayo con dos años de antelación.

Pronóstico combinado diario a corto plazo con 1 año de antelación.

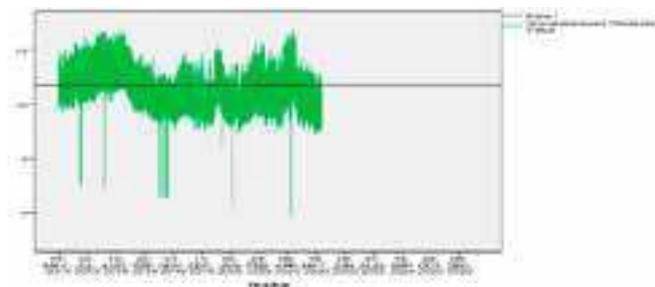


Fig. 4. Valor real y pronóstico del Consumo eléctrico del cayo con un año de antelación.

Conclusiones

La tendencia del consumo es cero, por lo que es estable y altamente significativa. El impacto del consumo cuando es igual a cero, representa una caída de 13,71 MWh, 67,55 % del valor máximo del consumo que es de 20,3 MWh y 10 % por encima del valor medio de 12,42 MWh. En general el pronóstico con variables climáticas debe dar mejores resultados para modelar el comportamiento del consumo del cayo, pero no fue desarrollado por no contar con estas variables climáticas en el momento de la investigación, lo que hace que se recomiende en un futuro contar con estos parámetros para obtener un mejor pronóstico del consumo.

Bibliografía

- BAYER, P.; L. DOLAN, J. URPELAINEN (2013). «Global patterns of renewable energy innovation, 1990–2009». *Energy for Sustainable Development*, 17[3], 288-295. Recuperado de <http://eprints.gla.ac.uk/115906/>
- BOFFILL VEGA, S.; C. M. CALCINES DÍAZ Y A. SÁNCHEZ CID (2009). «Modelo General para contribuir al desarrollo local, basado en el Conocimiento y la Innovación en Cuba». *Ingeniería Industrial*, 30[2].
- BORROTO NORDELO, A. (2006). *Gestión y economía energética*. Cienfuegos: Universo Sur.
- BRANDONI, C., Y F. POLONARA (2012). «The role of municipal energy planning in the regional energy-planning process». *Energy*, 48[1], 323-338. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/257176557_The_role_of_municipal_energy_planning_in_the_regional_energy-planning_process

- BRUCKNER, T.; H. M. GROSCURTH Y R. KÜMMEL (1997). «Competition and technologies synergy in municipal between energy systems». *Energy*, 22[10], 1005-1014. Recuperado de http://www.iet.tu-berlin.de/deeco/downloads/bruckner_etal_1997.pdf
- CABELLO ERAS, J. ET AL. (2014). «Comparative study of the urban quality of life in Cuban first-level cities from an objective dimension». *Environment, Development and Sustainability*, 16[1], 196-215. Recuperado de <http://link.springer.com/article/10.1007/s10668-013-9470-0>
- CARLO DEL PORTO BLANCO (2019). «Big data». En periódico *Granma*, miércoles 13 de febrero de 2019.
- CASTRO PERDOMO, N. A.; E. GONZÁLEZ SUÁREZ Y F. GUZMÁN MARTÍNEZ (2014). «Transferencia tecnológica, la integración ciencia, innovación tecnológica y medioambiente en la empresa». *Revista Ingeniería Industrial*, 35[3], 277-288. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/3604/360433598004.pdf>
- CORREA SOTO, J.; A. BORROTO NORDELO, M. ALPHA BAH, R. GONZÁLEZ ÁLVAREZ, M. CURBELO MARTÍNEZ Y A.M. DÍAZ RODRÍGUEZ (2014). «Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011». En *Ingeniería Energética*, 35[1], 38-47.
- CORREA SOTO, JENNY; SARAHÍ GONZÁLEZ PÉREZ Y ÁNGEL HERNÁNDEZ ALONSO (2017). «La gestión energética local: elemento del desarrollo sostenible en Cuba/Local energy management: element of the sustainable development in Cuba». En revista *Universidad y Sociedad, versión On-line* ISSN 2218-3620. Universidad y Sociedad vol.9 no.2, Cienfuegos abr.-jun. 2017.
- ELNAKAT, A Y J. D. GÓMEZ (2015). «Energy engenderment: an industrialized perspective assessing the importance of engaging women in residential energy consumption management». *Energy Policy*, 82 [1], 166-177. Recuperado de <https://utsa.influent.utsystem.edu/en/publications/energy-engenderment-an-industrialized-perspective-assessing-the-i>
- ERARIO, S. (2010). «The Maine energy handbook. A Resource for Municipalities on Energy Efficiency and Sustainable Energy». Recuperado de <http://www.waldoboromaine.org/docs/MaineEnergyHandbook.pdf>
- FIMIA DUARTE, RIGOBERTO; RICARDO OSÉS RODRÍGUEZ, JOSÉ IANNAONE, ANAI CARMENATE RAMÍREZ, LORENZO DIÉGUEZ FERNÁNDEZ, RAMÓN GONZÁLEZ GONZÁLEZ, LOMBERTO GÓMEZ CAMACHO Y OMELIO CEPERO RODRÍGUEZ (2017). «Modelación y predicción hasta el año 2020 para la angiostrongilosis total utilizando la regresión objetiva regresiva. Villa Clara, Cuba». *The Biologist* [Lima], 2017, vol. 15, jan-jun, Suplemento Especial 1, pp. 16.
- HERNÁNDEZ GALLARDO, S. Y W. PÉREZ-GARCÍA (2013). «Herramienta para el diagnóstico de la gestión en gobiernos locales cubanos». En *Ingeniería Industrial*, 34[3], 239-251. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/3604/360433595002/>
- HUANG, Z.; H. YU, Z. PENG Y M. ZHAO (2015). «Methods and tools for community energy planning: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 [2], 1335–1348. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/270395432_Methods_and_tools_for_community_energy_planning_A_review.
- INVER, J. [2009]. «Municipal Energy Planning—Scope and Method Development». Dissertation No.1234. Department of Management and Engineering, Division for Environmental Technology and Management, Linköping Studies in Science and Technology. *Linköping*: LiU-tryck.

- JOVANOVIĆ, B Y J. FILIPOVIĆ (2016). «ISO 50001 standard-based energy management maturity model – proposal and validation in industry». *Journal of Cleaner Production*, 112 [1], 2744-2755.
- LIN, G., Y G. H. HUANG (2010). «An inexact two-stage stochastic energy systems planning model for managing greenhouse gas emission at a municipal level». *Energy*, 35 [5], 2270-2280. Recuperado de <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v35y2010i5p2270-2280.html>
- LÓPEZ, J., Y P. FUNDORA (2011). «Energía, medioambiente y sociedad: Una experiencia interdisciplinaria en la montaña». *Universidad y Sociedad*, 3[3], 1-7. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- MONTEAGUDO YANES, J. ET AL. (2013). «Sistema de gestión energética municipal. Caso Cienfuegos. Nueva empresa». *Revista Cubana de Gestión empresarial*, 9 [3], 46 -55.
- NEVES, A., Y V. LEAL (2010). «Energy sustainability indicators for local energy planning: Review of current practices and derivation of a new framework». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 [9], 2723-2735. Recuperado de <http://econpapers.repec.org/RePEc:eee:rensus:v:14:y:2010:i:9:p:2723-2735>.
- ONU [2015]. «Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible». Recuperado de http://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/2030_agenda_es.pdf
- OSÉS RODRÍGUEZ, RICARDO; H. MACHADO FERNÁNDEZ (2008). «Algunas consideraciones sobre el consumo de energía eléctrica en la provincia de Villa Clara». Reporte técnico, Centro Meteorológico Provincial Villa Clara [inédito].
- OSÉS RODRÍGUEZ, RICARDO (2014). «Modelación Matemática ROR aplicada al pronóstico del total de terremotos a nivel global-Mathematical Modeling [ROR] applied to the forecast of earthquakes in the global level». *Revista Electrónica de Veterinaria* 01/2014; volumen 15[No 08B].
- OSÉS RODRÍGUEZ, RICARDO ET AL. (2017). The ROR´s Methodology and it´s possibility to find information in a White Noise. *International Journal of Current Research* Vol. 9, Issue, 03, pp.47378-47382, March, 2017[b]. Available online at <http://www.journalcra.com>.
- OSÉS RODRÍGUEZ, RICARDO; RIGOBERTO FIMIA DUARTE, JAIME WILFRIDO ALDAZ CÁRDENAS, JOSÉ IANNAcone OLIVER, YANIRA ZAITA FERRER, CLAUDIA OSÉS LLANES Y MAYRA E. CABRERA SUÁREZ (2017). «Modelación matemática del cólera por medio de la regresión objetiva regresiva y su relación con las variables climáticas». Caibarién, Villa Clara, Cuba. *The Biologist*, Lima, 2017, vol. 15, jan-jun, Suplemento Especial 1, pp. 128.
- OSÉS RODRÍGUEZ, RICARDO; HUMBERTO MACHADO FERNÁNDEZ, ALFREDO A. GONZÁLEZ MENESES Y RIGOBERTO FIMIA DUARTE (2019). «Estudio del Consumo Eléctrico Provincial de Villa Clara y su pronóstico 2019-2023». En revista *Eco Solar* 65, La Habana: Ed. Cubasolar.
- PEÑA GARCÍA, E. (2009). «Estrategia para el desarrollo e implementación de un Sistema de Monitoreo y Control Energético para el gobierno provincial de Cienfuegos». [Tesis de Maestría en Eficiencia Energética]. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos.
- PUIG MENESES, Y L. MARTÍNEZ HERNÁNDEZ (2014). «Tomando el pulso de la economía cubana». Periódico *Granma*, 50[147]. Recuperado de <http://www.granma.cu/cuba/2014-06-22/tomando-el-pulso-de-la-economia-cubana>
- REPÚBLICA DE CUBA. OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMACIÓN (2016). *Anuario Estadístico de Cuba 2015*. Capítulo 10: Minería y Energía. La Habana: ONEI.
- REPÚBLICA DE CUBA. PARTIDO COMUNISTA DE CUBA (2011). «Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución». La Habana: PCC.
- ROJAS, R. (2014). «Energía en Cuba: iniciativa local y gestión no estatal para fuentes renovables». Progreso Semanal. Recuperado de <http://progresosemanal.us/20140728/fuentes-renovables-de-energia/>
- ROLFSMAN, B. (2004). «Optimal supply and demand investments in municipal energy systems». *Energy Conversion and Management*, 45 [4], 595-611. Recuperado de <http://documents.lide.com/documents/0402181-optimal-supply-and-demand-investments-in-municipal-energy-systems.html>
- SÁNCHEZ ÁLVAREZ, MARÍA DE LOURDES, RICARDO OSÉS RODRÍGUEZ, RIGOBERTO FIMIA DUARTE, BÁRBARA CECILIA GASCÓN RODRIGUEZ, JOSÉ IANNAcone, YANIRA ZAITA FERRER, CLAUDIA OSÉS LLANES Y IOSBEL BURGOS ALEMÁN (2017). «La regresión objetiva regresiva más allá de un ruido blanco para los virus que circulan en la provincia Villa Clara, Cuba». *The Biologist* Lima, 2017, vol. 15, jan-jun, Suplemento Especial 1, pp. 127.
- SPEHLING, K.; F. HVELPLUND Y B. VAD MATHIESEN (2011). «Centralization and decentralization in strategic municipal energy planning in Denmark». *Energy Policy*, 39[3], 1338-1351. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03014215/39/3>
- ST. DENIS, G., Y P. PARKER (2009). «Community energy planning in Canada: The role of renewable energy». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13[8], 2088-2095. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13549839.2012.716406?src=recsys&journalCode=cloe20>
- SUNDBERG, G. Y B. KARLSSON (2000). «Interaction effects in optimizing a municipal energy system». *Energy*, 25[9], 877-891. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03605442/25/9>
- WENE, C. Y B. RYDÉN (1988). «A comprehensive energy model in the municipal energy planning process». *European Journal of Operational Research*, 33[2], 212-222. Recuperado de <http://itsy.co.uk/archive/sisn/Pos/purple/enrgmodl.pdf>.
- ZHU, Y.; G. HUANG, Y. LI, L. HE Y X. ZHANG (2011). «An interval full-infinite mixed-integer programming method for planning». *Applied Energy*, 88[8]. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03062619/88/8>
- ZIA, H., Y V. DEYADAS (2007). «Energy management in Lucknow city». *Energy Policy*, 35[10], 4847-4868. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421507001589>

APLICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN PULVERIZADA DE BIOMASA EN LAS CALDERAS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

Por **Dr. C. Abelardo Daniel Rodríguez Arias*** y **Dra. C. Liz Belkis Rosabal Ponce****

* Profesor titular. Laboratorio de Combustión INEL, Cuba.

E-mail: abelardo@cfg.minem.cu

** Laboratorio de Combustión INEL, Cuba.

E-mail: lizbelkis@cfg.minem.cu; lizbelkis@cfg.inel.une.cu

Resumen

Las calderas de bagazo de la industria azucarera trabajan con eficiencias muy bajas, debido fundamentalmente al alto contenido de humedad en el combustible y a la no uniformidad en la distribución del colchón de partículas sobre la parrilla, lo que provoca afectaciones en el proceso de formación de la mezcla aire combustible y en la estabilidad de la combustión, sobre todo para coeficientes de exceso de aire inferiores a $\alpha = 1.5$.

Los altos valores de exceso de aire que se necesitan en los lechos fijos, para asegurar la turbulencia en la zona de mezclado en estas instalaciones, conlleva al incremento de las pérdidas en los gases de salida y por consiguiente a la disminución de la eficiencia de las unidades. Una alternativa para mejorar la eficiencia en las calderas de la industria azucarera, es la sustitución de una porción de la carga base, con el uso de la quema en llama de residuos de biomasa pulverizada seca en los quemadores rotatorios desarrollados por el autor. Los residuos pueden ser provenientes de diferentes fuentes de biomasa, como el propio bagazo después de un proceso de secado y preparación de los RAC (Residuos Agrícolas Cañeros), residuos de madera, cultivos energéticos de diferentes especies o de la propia producción del derivado de bagazo como es el caso del meollo. En el trabajo se presentan los resultados de una instalación demostrativa que se montó en una caldera de bagazo húmedo que genera 45 t/h de vapor y se utilizó como combustible adicional el meollo de una fábrica de tableros.

Palabras clave: Meollo, RAC, quemador, estabilizador.

APPLICATION OF PULVERIZED BIOMASS COMBUSTION IN BOILERS OF THE SUGAR INDUSTRY

Abstract

The bagasse boilers of the sugar industry work with very low efficiencies, mainly due to the high moisture content in the fuel and the non-uniform distribution of the mattress of particles on the grill, which causes effects on the process of formation of the mixture of combustible air and combustion stability, especially for excess air coefficients below $\alpha = 1.5$.

The high values of excess air that are needed in the fixed beds, to ensure turbulence in the mixing zone in these facilities, leads to the increase of losses in the exhaust gases and consequently to the decrease in the efficiency of the units. An alternative to improve the efficiency in the boilers of the sugar industry, is the replacement of a portion of the base load, with the use of flame burning of dry powdered biomass residues in rotary burners developed by the author. The waste can be from different sources of biomass, such as bagasse itself after a drying and preparation process, the RAC (Cañeros Agricultural Waste), wood residues, energy crops of different species or from the production of the bagasse derivative itself as It is the case of the kernel. The work presents the results of a demonstration installation that was mounted in a wet bagasse boiler that generates 45 t / h of steam and the core of a panel factory was used as additional fuel.

Keywords: Meollo, RAC, burner, stabilizer.

I. Introducción

La diversificación en la industria azucarera es un elemento importante que puede mejorar la rentabilidad del sector. En la producción de papel, pulpa de bagazo y tabletos es necesaria la separación del meollo por ser este un producto no deseado. Durante muchos años se ha intentado el uso del meollo como combustible, sin embargo solo ha sido posible quemarlo en combinación con otros combustibles tales como bagazo integral, fuel-oil, gas natural y carbón [Mann y O'hara, 2011]. Cuando el meollo se quema con fuel-oil o con gas es necesario mantener una llama piloto para garantizar la temperatura de inflamación y la estabilidad del proceso de combustión [Rodríguez, 1988].

La mayoría de las investigaciones han demostrado que el meollo tiene mayor contenido de ceniza y humedad que el bagazo integral, por lo que su poder calorífico es inferior al del bagazo integral. Sin embargo, el pequeño tamaño de las partículas de meollo hace que estas dispongan de una mayor superficie externa que el bagazo, lo que conlleva al incremento de la razón de calentamiento y secado en el bagazo integral, trayendo consigo mejoras en el comportamiento del proceso de combustión dentro del horno [Mann y O'hara, 2011; O'hara *et al.*, 2011; Atchison, 1980].

Las pruebas de combustión en las calderas de las fábricas de azúcar, han sido estudiadas utilizando herramientas de diseño que describen el comportamiento físico espacial del sistema con fluido dinámica computacional (CFD) [Boyd y Kent, 1986], para predecir los efectos del meollo, el bagazo desmedulado, el rendimiento de la quema del bagazo con meollo, el consumo de combustible y el comportamiento de la combustión en calderas típicas de una fábrica de azúcar. Diversas calderas han sido estudiadas ampliamente por muchos investigadores [Dixon, 1984; Luo, *et al.*, 1993; Woodfield *et al.*, 1997]. Otras pruebas más recientes [Mann y O'hara, 2011] demostraron que el meollo cuando se quema solo en las calderas típicas de la industria azucarera conduce a la combustión inestable con la posibilidad de explosiones. Los mejores resultados se logran cuando se quema en mezcla con el bagazo en proporciones de 88,7 % de bagazo con 11,3 % de meollo, para lo cual los modelos indican cierta reducción de la eficiencia de la caldera y un incremento del consumo de combustible [Mann y O'hara, 2011]. Un aspecto de extraordinaria importancia y actualidad relacionado con la combustión de la biomasa, es el desarrollo de una industria energética integrada a la industria azucarera, para lo cual Cuba ha elaborado un programa hasta 2030 que proyecta una sustitución de 14 % de la generación eléctrica del país.

II. Materiales y métodos

El trabajo se ha realizado tomando como base los resultados de las investigaciones aerodinámicas de Rodríguez Arias, A. D. [Rodríguez, 1988; Rodríguez y Rosabal, 2001; Rodríguez y Ponce, 2017; Rodríguez, 1997; Rodríguez, 1995] para lograr la combustión estable de pequeñas partículas de combustible seco de baja densidad detrás de un estabilizador, método aerodinámico al que su autor denominó tecnología de las secciones de paso en rotación.

Además, para el secado de las partículas se presenta el secador dinámico desarrollado por el autor, que está basado en el mismo principio aerodinámico utilizado en los quemadores.

III. Resultados y discusión

El bagazo que sale del último molino del tándem contiene entre 55 y 60 % de fibra útil, la otra fracción rica en médula o meollo se encuentra en el orden de 40–45 %, esta fracción final no aporta propiedades deseables al papel o al tablero e introduce dificultades en el proceso de producción [Eyerusalem *et al.*, 2016; Colectivo..., 2000; Rainey, 2009]. El meollo está compuesto de una fina pared de células de parénquima [Giertz y Varma, 1979] más bien cuadrada, es decir, con una baja relación de aspecto, que se caracteriza por tener una longitud máxima en el orden de 520 μm [Rainey *et al.*, 2009] y un diámetro promedio de 140 μm [Paul y Kasi, 1998].

El uso del meollo como combustible y en general la biomasa sólida seca y pulverizada no ha sido lo suficientemente estudiada. El presente trabajo está dedicado a la combustión pulverizada de los residuos sólidos de la biomasa de la producción de azúcar de caña, pulpa y/o tabletos de bagazo. En la industria que utiliza el bagazo para obtener productos derivados, el meollo es considerado como un desecho, cuya eliminación ocasiona problemas. A pesar de los esfuerzos realizados internacionalmente para utilizarlo como combustible, las tecnologías actuales no logran quemarlo con eficiencia, a menos que se utilice un combustible adicional para garantizar la estabilidad del proceso [Rodríguez, 1988]. Esto se debe fundamentalmente a las características físicas de la partícula de meollo, su pequeño tamaño, baja densidad y su alto contenido de humedad. En la Tabla 1 se presenta la composición elemental en base seca del bagazo, el meollo y de los residuos agrícolas cañeros (RAC).

Tabla 1. Composición elemental en base seca del meollo, bagazo y los RAC. (Fuente: [Rodríguez *et al.*, 2000])

Composición elemental en base seca (%) de los residuos de la producción de azúcar de caña y pulpa.						
Residuo	C	H	O	N	S	A
Meollo	45,00	6,00	43,87	0,10	0,03	5,00
Bagazo	47,00	6,00	45,84	0,13	0,04	1,00
RAC	43,70	5,75	44,32	0,22	0,06	5,95

Estos residuos, tanto agrícolas como industriales a la hora de quemarlos sin preparación previa, van a presentar un comportamiento que va a depender principalmente del contenido de humedad. En la Tabla 2 se presentan los rangos de variación de la materia volátil, el carbono fijo y la ceniza de la masa de trabajo de los tres residuos de la producción de azúcar y de pulpa (análisis aproximado o inmediato).

La composición elemental (análisis último o final), con humedad promedio de la masa de trabajo: del bagazo como sale del tándem, el meollo como sale del proceso de

desmedulado y los RAC después de cuatro días expuestos a secado natural, se resume en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se presenta el poder calorífico de la masa de trabajo de cada uno de los residuos, así como los volúmenes teóricos de aire y los gases productos de la combustión. Del análisis de las cuatro tablas presentadas se evidencia la ventaja económica que tendría para la generación de energía el uso de estos residuos energéticos, si se dispone de una tecnología que permite la combustión eficiente de los mismos y que puede ser instalada directamente en el horno donde se quema el bagazo.

Tabla 2. Análisis inmediato de la masa de trabajo del meollo, bagazo y RAC (Fuente: [Rodríguez *et al.*,2000])

Análisis inmediato de la masa de trabajo de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa(%) .				
Residuo	Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	Ceniza
Meollo	50 - 60	34 - 49	6 - 10	1,6 - 3
Bagazo	45 - 50	39 - 55	4 - 8	0,55 - 2,2
RAC	8 - 15	60 - 77	10 -16	4,6 - 6

Tabla 3 Composición elemental de la masa de trabajo del meollo, bagazo y RAC (Fuente: [Rodríguez *et al.*,2000])

Composición elemental de la masa de trabajo (%), de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa.							
Residuo	C	H	O	N	S	A	W
Meollo	21,15	2,82	20,62	0,05	0,01	2,35	53
Bagazo	23,50	3,00	22,92	0,06	0,02	0,50	50
RAC	37,15	4,89	37,67	0,19	0,05	5,06	15

Fundamentos teóricos de la tecnología que se presenta

La estabilidad de un proceso de combustión en llama se logra con dispositivos aerodinámicos que basan su funcionamiento en establecer corrientes inversas de flujo en una determinada zona, a la cual se le denomina zona de

recirculación interna (ZRI). Estos dispositivos se diseñan de flujos rectos y de flujos giratorios. Los que se utilizan en el diseño de quemadores de torbellino son los de flujos giratorios. Varios autores [Rodríguez *et al.*,2000; Isserlín, 1987; Pomeransev, 1983] los clasifican en tangencial simple, tangencial de voluta, álabes axiales, álabes tangenciales y axiales tangenciales. La tecnología de los flujos giratorios ha sido utilizada durante varias décadas en la generación de energía y propulsión de aviones para lograr el anclaje o estabilidad eficiente de las llamas y la reducción de emisiones en los sistemas de combustión. El modelo de flujo que se genera detrás de estos dispositivos resulta muy complejo debido al alto nivel de turbulencia que se alcanza dentro de la corriente. La estructura aerodinámica de la zona detrás de los estabilizadores está caracterizada por el grado de torbellino S , magnitud adimensional que se define como la relación entre el momento angular del flujo axial y el momento lineal de este, dividido por el radio del quemador.

Según [Yegian y Cheng, 1996; Vanoverberghe, 2004] los flujos en torbellino pueden clasificarse en débiles ($S < 0,3$), medios o moderados ($0,3 < S < 0,6$) y fuertes los que se producen cuando el grado de torbellino supera su valor crítico $S > 0,6$ y el Re del campo de flujo llega a la transición de supercrítico a subcrítico. En estas condiciones, el gradiente de presión adversa favorece la formación de la ZRI, como resultado de la ruptura brusca del vórtice del torbellino. Esto se conoce en la literatura científica como estabilización de llama por ZRI. Según los reportes de la literatura los métodos más usados para reducir la caída de presión en quemadores de torbellino, con altos niveles de estabilidad y eficiencia se basan en el uso de torbellinos fuertes

Los mecanismos de estabilización se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales, que de acuerdo a su diseño se usan en quemadores para sólidos, líquidos y gases. Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta hoy no dan solución a los combustibles como la biomasa sólida pulverizada, que por sus características de baja densidad y pequeñas dimensiones, resulta muy difícil lograr su retención para garantizar el anclaje de la llama en la ZRI.

Con las investigaciones realizadas por Rodríguez Arias A. D. y Xristich V. A. en 1988, se dieron los primeros pasos para el desarrollo de la tecnología aerodinámica de las secciones de paso en rotación [Rodríguez, 1988; Rodríguez y Ponce, 2017] que en principio se basa en una estructura de dos conos concéntricos unidos por álabes

Tabla 4 Poder calorífico y volúmenes teóricos de aire y gases durante el proceso de combustión de la masa de trabajo. (Fuente: [Rodríguez *et al.*,2000])

Residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa.										
Residuo	Poder calorífico inferior de la masa de trabajo		Poder calorífico superior de la masa de trabajo		Volumen teórico de aire y de los gases productos de la combustión (m ³ N/kg)					
	kcal/kg	KJ/kg	kcal/kg	KJ/kg	V _{N2}	V _{O2}	V _{N2}	V _{gs}	V _{H2O}	V _g
Meollo	1567	6555	2012	8420	1,94	0,39	1,53	1,93	1,02	2,95
Bagazo	1758	7358	2196	9191	2,12	0,44	1,68	2,11	1,01	3,12
RAC	3142	13 160	3478	14 564	3,34	2,64	3,34	0,81	4,15	3,15

(Fig. 1), que a partir de la combinación del giro con la velocidad del flujo de aire secundario produce un enrarecimiento entre ambos conos, que succiona el flujo de aire primario y crea una ZRI con características especiales. Los estabilizadores concéntricos con su eje, como es el caso de los conos simples, han sido cuidadosamente estudiados [Butovski *et al.*,1982; Abramovich, 1984]. El estabilizador de doble cono, como se ha señalado, se diferencia de los clásicos o convencionales en que gira alrededor de su propio eje y desarrolla una admisión de aire en la zona de recirculación. Anterior a estas investigaciones en la literatura no aparecen informaciones sobre este tipo de estructura aerodinámica.



Fig. 1. Dispositivo estabilizador de doble cono. (Fuente [Rodríguez, 1988]).

En la Fig. 2 se presenta la ZRI creada detrás del estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC), donde se puede observar como característica principal que la velocidad de reverso es muy baja, nunca superior a 2,5 m/s sobre el eje de giro del dispositivo.

Cuando el ERDC está sin girar la velocidad de aire primario alcanza un valor de $W_1 = 1.09$ m/s, para una razón relativa de la velocidad de reverso equivalente a $W_r^{max.}/W_1 = 2.45$, lo cual está muy por encima de los valores relativos de los estabilizadores de formas clásicas, (0,3 a 0,4) [Butovski *et al.*,1982; Abramovich, 1984; Butovski y Jristich, 1972].

Luego se pudo comprobar que la rotación a 200 rad/s del ERDC, con $W_{II} = 40$ m/s(constante), incrementa la relación W_1/W_{II} de 2,7 a 5,2 %, reduciendo la razón relativa de la velocidad de reverso a valores cercanos a la unidad ($W_r^{max.}/W_1 = 0.96$). Estos resultados muestran que el incremento de la velocidad del aire primario, debido a la rotación del dispositivo no provoca incrementos en la velo-

cidad de reverso, y que la intensidad de la velocidad de reverso está determinada por la interacción combinada de las dos corrientes que salen del doble cono W_1 y W_{II} [Rodríguez, 1988]. Como resultado de la influencia conjunta del giro con el incremento de la velocidad del aire primario, tiene lugar un incremento de las dimensiones relativas¹ de la ZRI y

$$(l_{rec}^{rel} \text{ hasta } 1.4 \text{ y } d_{rec}^{rel,max} \text{ hasta } 1.8).$$

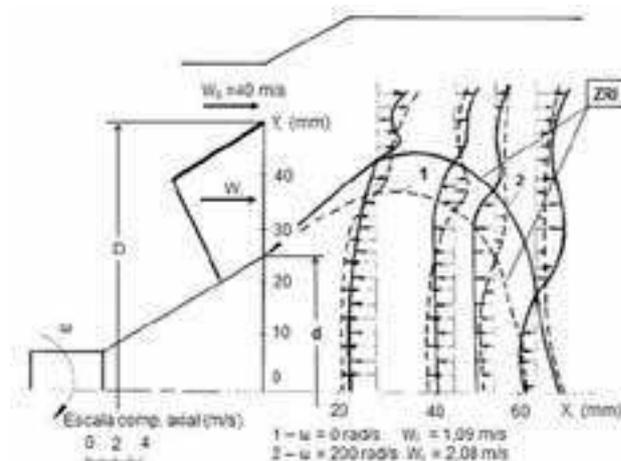


Fig. 2 . Perfil de la componente axial de la velocidad detrás del estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC). (Fuente: [Rodríguez, 1988]).

El nuevo mecanismo aerodinámico genera un torbellino medio ($S = 0,33$) [Rodríguez, 1988; Rosabal, 2006] con un momento angular insuficiente para causar la ruptura del vórtice, lo que demuestra que la función principal de este torbellino no es la formación de la ZRI, como en los dispositivos clásicos de estabilización. Como se explicó anteriormente, el incremento de la intensidad de la turbulencia en la frontera de esta región y en la corriente periférica, favorece el mezclado, y actúa como un mecanismo secundario de estabilización, lo que representa una ventaja de esta nueva organización aerodinámica. La ZRI en la estructura del doble cono presenta un flujo mássico reverso normalizado de 0,19 [Rosabal, 2006], lo que se considera adecuado para el flujo reverso establecido y está en correspondencia con los resultados de las investigaciones de [Weber y Dugue, 1992; Vanoverberghe *et al.*,2001].

En la Fig. 3 se presenta el esquema del quemador que fue diseñado como resultado de las investigaciones aerodinámicas antes expuestas. En el esquema se puede observar el mecanismo de auto-alimentación del combustible, basado en el enrarecimiento que tiene lugar en el espacio anular denominado difusor, por donde pasa la corriente principal de aire primario. El volumen de aire primario total es la suma del aire que pasa a través del difusor, más el aire de arrastre.

$$l_{rec}^{rel} = l_{rec} / d \text{ y } d_{rec}^{rel,max} = d_{rec} / d$$

La precámara del quemador rotatorio de doble cono es el espacio donde tiene lugar el desarrollo del proceso de combustión, jugando un importante rol en el mezclado y en el proceso de estabilización de la reacción.



Fig. 3. Esquema del quemador desarrollado a partir del ERDC. (Fuente: [Rodríguez, 1988; Rodríguez *et al.*, 2000]).

La primera aplicación del trabajo se realizó en la fábrica de tableros de bagazo del municipio de Cruces, en Cienfuegos en 1987 (Fig. 4) y la instalación fue diseñada para quemar todo el meollo que se generaba en la producción; hay que destacar que en esta instalación la humedad del meollo alcanzaba valores entre 4 y 6 %. En la Fig. 5A aparece una vista del interior del quemador con el ERDC y la precámara, y en la Fig. 5B una imagen en la que se puede observar la definición que alcanza la llama durante el proceso de combustión del meollo pulverizado y seco sin combustible adicional.



Fig. 4. Primer quemador rotatorio para meollo. Fábrica de tableros de bagazo de Cruces. (Fuente: [Rodríguez, 1988; Rodríguez 1995]).

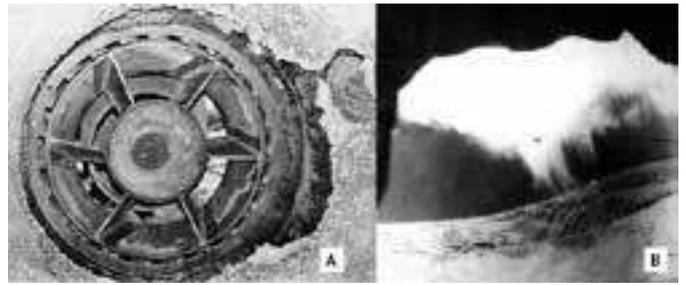


Fig. 5. Vista del ERDC y la precámara (A); llama de meollo, definición y dimensiones (B).

El meollo al salir del proceso de separación del bagazo lleva un alto contenido de humedad (aprox. 53 %), por lo que para poder utilizar esta biomasa como combustible fue necesario desarrollar un secador que está basado en el mismo principio, las secciones de paso en rotación. Al nuevo equipo se le denominó secador dinámico por ser una rueda con un doble cono que gira y permite el secado de la biomasa en pequeñas partículas. En la Fig. 6 se presenta un esquema del secador dinámico, que consta de dos cámaras compactas de secado, la primera que dispone de un ERDC con álabes en la periferia del cono exterior, para la manipulación del fluido de trabajo y la segunda que consta de un cono central con paletas inclinadas en su parte exterior. En ambas cámaras se logra un intenso régimen turbulento que además de retener las pequeñas partículas, intensifica los procesos de transferencia de calor y de masa, lo que permite en un reducido espacio evaporar un alto porcentaje del agua contenida en el combustible. Este modelo de alrededor de 5 m de largo, fue diseñado para secar 12 t/h de meollo, que entran con una humedad aproximada entre 53 y 55 % y salen con humedades entre 15 y 18 %.

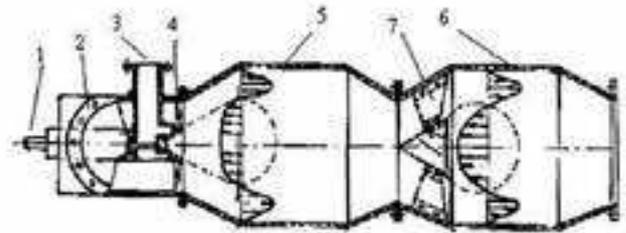


Fig. 6 Secador dinámico. (Fuente [Rodríguez y Rosabal, 2000; Rodríguez, 1997]).

1. Sistema motriz; 2. Entrada de gases; 3. Conducto de entrada del meollo; 4. ERDC especial para el secado; 5. Cámara primaria; 6. Cámara secundaria; 7. Dispositivo de retención.

En la Fig. 7 se presenta un esquema de la instalación que fue montada de forma demostrativa en una fábrica de azúcar, en una caldera de «Combustión» con una capacidad de 45 t/h de vapor [Rodríguez y Rosabal, 2017]. La caldera originalmente consumía 22 t/h de bagazo integral con 50 % de humedad y una eficiencia de 70 %.

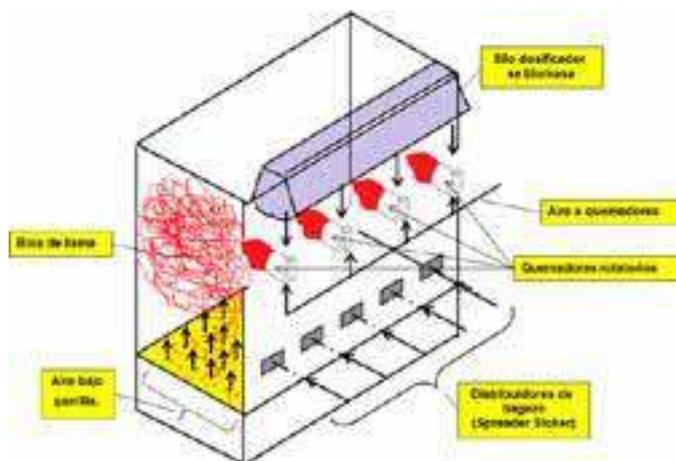


Fig. 7. Esquema de la instalación demostrativa montada en una caldera de 45 t/h de vapor.

En la parte superior del horno se instalaron cuatro quemadores de meollo de 3,5 MW_t cada uno, lo que equivale a una sustitución de 31 % de la energía requerida por la caldera, la diferencia era suministrada por el bagazo con el sistema de quema en parrilla con lanzador.

El consumo de combustible fue de 3,43 t/h de meollo con 17 % de humedad y 13,5 t/h de bagazo con 50 % de humedad. La eficiencia de la caldera se elevó 7 %, y el consumo aproximado de bagazo integral, disminuyó en 8,4 t/h, lo cual se corresponde con una sustitución de bagazo por meollo equivalente a 6,4 t/h, y 2 t/h de reducción de consumo por concepto de elevación de la eficiencia de la caldera.

La eficiencia de la caldera se incrementa debido a varios factores; primero, el coeficiente global de exceso de aire disminuye, ya que los quemadores trabajan con un coeficiente muy bajo (1,10–1,16) con respecto al requerido por el lecho fijo para bagazo (de 1,8 a 2,0). Por otra parte, en el caso del meollo una porción de los gases es recirculada para agotar una parte de la energía disponible en los mismos en el sistema de secado, con una marcada influencia en el incremento del poder calorífico del combustible adicional, lo que propicia estabilidad y eficiencia en la organización del proceso de combustión de los dos combustibles dentro del horno.

Esta nueva organización que se logra en el proceso de combustión en el horno, además de disminuir las pérdidas en los gases de salida, reduce los inquemados, por el cierre de las llamas en la parte superior del horno, lo que da lugar a un alto agotamiento de los elementos combustibles contenidos en los gases productos de la combustión del bagazo. Cuando el sistema combinado de quema está en operación es posible reducir el exceso de aire en la parrilla hasta los valores mínimos que limitan la estabilidad en este tipo de calderas ($\alpha=1,4-1,5$).

El sistema de parrilla está diseñado para asegurar la combustión de la masa de combustible requerida para alcanzar la carga máxima de la caldera, que en este caso equivale aproximadamente a 22 t/h de bagazo, con una velocidad en la entrada de aire por la parrilla que asegura la combustión estable del mismo. Al reducir el suministro de combustible a 13 o 14 t/h, aunque se regule el exceso de

aire, hay un sobredimensionamiento de la parrilla para las nuevas condiciones que puede ser mejorado si se realizan modificaciones en el diseño.

Estudios teóricos recientes [Carrasco *et al.*,2018] para evaluar la aplicación de esta tecnología a una caldera Retal de 45 t/h de vapor, durante su operación con bagazo integral en la parrilla y RAC pulverizado (en quemadores rotatorios), revelan las ventajas que ofrece la nueva tecnología. En este estudio solo se evaluó el incremento de eficiencia por concepto de reducción del exceso de aire cuando se utilizan quemadores. En la Fig. 8 se puede observar la reducción que experimenta la temperatura de los gases de salida, a medida que se incrementa la sustitución de la energía base por el combustible adicional, lo que a su vez conduce al incremento de la eficiencia.

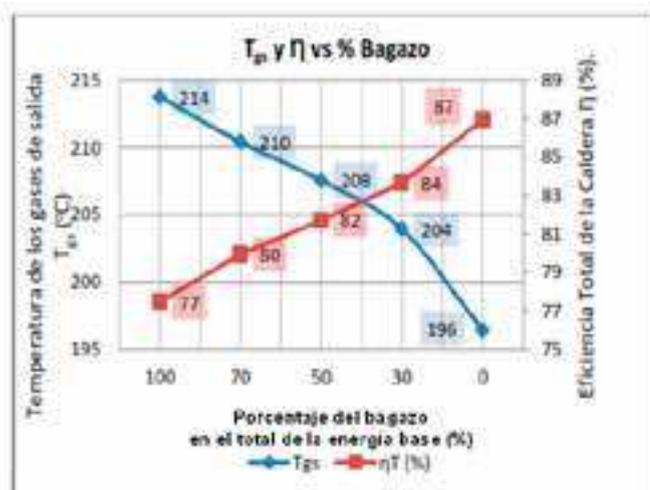


Fig. 8. Comportamiento de la eficiencia de la caldera para diferentes porcentajes de la energía base, utilizando RAC como combustible adicional (15 % W), para coeficientes de exceso de aire: en los quemadores $\alpha = 1,10$ y en la parrilla $\alpha = 1,8$ (Fuente: [Carrasco *et al.*,2018]).

Una fase superior de aplicación de la tecnología pudiera ser en la producción de electricidad en las nuevas bioeléctricas que se proyectan en el país, con la sustitución parcial o total del bagazo integral por bagazo pulverizado seco y la incorporación de otras biomásas sólidas disponibles en el país para el periodo de no zafra, siempre con preparación previa (molida, secado y compactación para su transportación eficiente).

IV. Conclusiones

El uso de quemadores en las calderas de bagazo, sustituyendo un porcentaje de la energía base, permitiría un incremento significativo de los niveles de eficiencia de estas instalaciones y sería el primer paso para la sustitución de los lechos fijos, por sistemas de combustibles pulverizados, utilizando como combustible diferentes biomásas con preparación previa.

La combustión pulverizada en la industria azucarera permitiría el diseño de calderas más compactas y eficientes que las existentes en la actualidad.

Los sistemas de combustión pulverizada son una opción promisoriosa para el futuro de la producción de electricidad con biomasa sólida.

V. Recomendaciones

Continuar el desarrollo de la tecnología y su implementación industrial.

VI. Bibliografía

- ABRAMOVICH, L. S. (1984). *Teoría de las corrientes turbulentas*. M.: Ciencia 1984. 716 pág.
- ATCHISON, J. E. (1980). «The fuel value of bagasse pith and developments in pith burning at leading bagasse pulp and paper mills and/or sugar mills». *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 17, 2515-2532
- ATCHISON, J. E. (1971). «Review of modern methods of bagasse depithing». *Proceed. ISSCT*, 14: 1202-1217.
- BOYD, R. K., J. H. KENT (1986). «Three-dimensional furnace computer modelling». *Proceedings of the Combustion Institute* 21, 265-274.
- BUTOVSKI L. S., JRISTICH V. A., Y OTROS (1982). «Algunas particularidades de la combustión en la ZRI detrás del estabilizador». *IsvestiaVusov. Serie Energética* 1982. No 1 – pag.105 – 109.
- BUTOVSKI L. S.; V. A. JRISTICH (1972). «Estructura de la zona de mezcla y caracterización de la quema de gas en la llama, detrás del estabilizador. Teoría y práctica de la quema de gas». L Nedra, 1972. 76 – 82.
- CARRASCO GARCÍA, SERGIO YANIEL, A. D. RODRÍGUEZ ARIAS, EDUARDO BASTIDA LÓPEZ, REINIER JIMÉNEZ BORGES (2018). «Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomasa a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal». Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Cienfuegos, 2018.
- COLECTIVO DE AUTORES BAJO LA DIRECCIÓN DE LUIS O. GÁLVEZ TAUPIER (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. ICIDCA 2000. 458 pág.
- DIXON, T. F. (1984). «Preliminary measurements in the flame region of a bagasse fired Boiler». *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 6, 165-171.
- EYERUSALEM BIRRU, ANDREW MARTIN; CATERINA ERLICH (2016). «Sugar cane industry overview, and Energy Efficiency Considerations. KTH School of Industrial Engineering and Management». Department of Energy Technology. Division of Heat and Power Technology. SE – 100 44 Stockholm 2016, p 61.
- GIERTZ H. W.; R. S. VARMA (1979). «Studies on the pulping of bagasse and the influence of pith on paper properties». In 'Non-wood plant fiber pulping progress report'. pp. 53-69. (Tappi Press: Atlanta).
- ISSERLÍN, A. S. (1987). *Fundamentos de la combustión de los combustibles gaseosos*. Leningrado. Editorial Nedra.
- LOIS, J. A.; R. SUÁREZ Y O.L. GARCÍA (1980). «Some aspects of depithing and storage of Bagasse in Cuba». *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 2462-2471.
- LUO, M.; B. R. STANMORE, T. F. DIXON (1993). «A thermal survey of a bagasse fired boiler». *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 15, 108-118.
- MANN, A. P.; I. M. O'HARA (2012). «Predicting the effects of bagasse depithing operations on boiler combustion performance». Queensland University of Technology 2012.
- O'HARA I. M.; A. P. MANN, T. J. RAINEY, C. M. BAKIR, P. A. HOBSON, T. W. FARRELL (2011). «Reducing the economic and environmental risks of large scale bagasse storage through depithing». SRDC final report QUT039.
- PATURAU, J. M. (1989). *By-Products of Sugar Cane Industry*, 3rd ed., Elsevier, Amsterdam, 1989.
- PAUL, S. K. AND K. S. KASI VISWANATHAN (1998). «Influence of pith on bagasse pulp, paper and black liquor properties». *IPPTA Journal*. 10, 1-8 (1998).
- POMERANSEV, V. V. (1983). *Manual de problemas de teoría de la combustión*. Leningrado: Editorial Energoatomoizdat.
- RAINEY, T. J. (2009). «A study into the permeability and compressibility properties of Australian bagasse pulp». PhD Thesis. Queensland University of Technology, Faculty of Built Environment and Engineering, Brisbane.
- RAINEY, T. J.; DOHERTY WOS, R. J. BROWN, D. M. MARTINEZ Y N. A. KELSON (2009). «An experimental study of Australian sugarcane bagasse pulp permeability». *Appita Journal* 62, 4 296-302.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. (1988). «Quemador Rotatorio con autosucción del aire primario para la quema de meollo». Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Kiev 1988 – 142 pág.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. (1995). «Quemador rotatorio para combustibles líquidos y sólidos pulverizados». Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22526. Cuba 1995.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. (1997). «Secador de sólidos pulverizados». Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22485. Cuba 1997.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. Y OTROS (1994). «Siló dosificador para sólidos pulverizados». Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22488 Cuba 1994.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D.; L. B. ROSABAL PONCE (2001). «Dispositivo rotatorio para la estabilización de la llama». Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22752. 2001.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D.; L. B. ROSABAL PONCE (2017). «Tecnología de las Secciones de Paso en Rotación para la Quema Eficiente del Meollo en las Calderas de Bagazo». *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. Vol. 7, No. 3, Año 2017.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D.; L. B. ROSABAL PONCE Y P. B. MARTÍNEZ DE VILLIER (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*. La Habana: Ed. Academia, 453 pág.
- ROSABAL PONCE, L. B. (2006). «Desarrollo de turbulizadores rotatorios cónicos para quemadores de alta regulabilidad, baja caída de presión y bajo NOx». Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Universidad de Cienfuegos.
- VANOVERBERGHE, K. (2004). «Flow, turbulence and combustion of premixed swirling jet flames». In *Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven Belgium*.
- VANOVERBERGHE, K.P.; E. V. VAN DEN BULCK, W. A. HUBNER AND M. J. TUMMERS (2001). «Multi-Flame Patterns in Swirl Driven Partially Premixed Natural Gas Combustion». ASME, FACT Division International Joint Power Generation Conference, JPG-C2001=FACT-19055, pp. 1–8, New Orleans, LA, 4–7 June.
- WEBER, R. and J. DUGUE (1992). «Combustion accelerated swirling flows in high confinements». *Prog. Energy Combust. Sci.*, 18, 349–367.
- WOODFIELD, P. L.; J. H. KENT, T. F. DIXON (1997). «Temperature measurements in a bagasse fired furnace-experimental and numerical results». *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 19, 473-478.
- YEGIAN, D.T. and R.K. CHENG (1996). «Development of a vane-swirler for use in a low NOx weak-swirl burner». Energy and Environment Division. Lawrence Berkeley National Laboratory: USA.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ESTUFAS HÍBRIDAS, ECOLÓGICAS, EFICIENTES Y DE BAJO COSTO

Por M. Sc. Prof. Aux, Ing. Ángel Eugenio Infante Haynes*, Ing. Gerardo Hernández Ramírez*, M. Sc. Lic. Ivette del Carmen Quevedo Pérez*, M. Sc. Ing. Roberto Ramírez González*, Dr. C. Irisbel Infante Valiente* e Ing. Zolio Bienvenido Suárez Pérez, profesor Auxiliar*

* Departamento de Mecánica, Universidad de Holguín, Ministerio de Educación Superior, MES, Cuba
E-mail: ehaynes@uho.edu.cu

Resumen

En el presente trabajo se realizó un rediseño de una cocina eficiente, ecológica y de bajo costo, aplicando el software Solidword, para dar respuesta, en primer lugar, a la cocción de alimentos como alternativa al suministro de gas licuado del petróleo y al ahorro de electricidad, dadas las condiciones de bloqueo impuestas por la administración norteamericana; en segundo lugar, al saneamiento de los residuales de carpintería en los basureros improvisados que existen en los barrios periféricos de la ciudad de Holguín; y en tercer lugar, darle solución a otro problema ambiental, la acumulación de sargazos en las playas del país, con alto grado de metales pesados y arsénico, y que afecta el entorno turístico de la misma. Esta biomasa pudiera convertirse en una briqueta, logrando con su quema un alto valor calorífico y pudiera ser una opción de ayuda a las familias que viven cerca de las costas y con bajos ingresos, teniendo en cuenta que además con la cocina se ahorraría 50 % de materia que se utilizaría en las cocinas convencionales de leña. Por otro lado se pudieran aprovechar las briquetas de serrín y papel como resultado también de los residuos sólidos de las empresas. Otras de las variantes de esta estufa que la hace híbrida, es cuando se diseñan con dos hornillas: una trabajaría con biomasa sólida, como práctica de la agroenergía y la otra con biogás, o hidrógeno, o ambos combustibles juntos. Se debe destacar también que no solo es una solución para los hogares, sino también para unidades militares, tanto en puntos fijos como en maniobras, así como para las empresas, escuelas, seminternados, círculos infantiles y unidades de salud públicas.

Palabras clave: Solidword, biomasa, agroenergía.

DESIGN AND FABRICATION OF ECO-FRIENDLY, EFFICIENT AND LOW-COST HYBRID COOKSTOVES

Abstract

In this paper an efficient, ecological and low-cost stove was redesigned, using Solidword software, in order to respond, firstly, to the cooking of food as an alternative to the supply of liquefied petroleum gas and to save electricity, given the blockade conditions imposed by the North American administration; secondly, to the sanitation of carpentry waste in the improvised dumps that exist in the peripheral neighborhoods of the city of Holguín; and thirdly, to provide a solution to another environmental problema: the accumulation of seaweed on the country's beaches, with a high level of heavy metals and arsenic, which affects the tourist environment of the same. This biomass could be converted into a briquette, achieving with its burning a high calorific value and could be an option to help families living near the coasts and with low income, taking into account that the stove would also save 50 % of the material that would be used in conventional wood stoves. On the other hand, sawdust and paper briquettes could be used as a result of solid waste from companies. Another variant of this stove that makes it hybrid, is when it is designed with two burners, one would work with solid biomass, as a practice of agroenergy and the other with biogas, or hydrogen, or both fuels together. It should also be noted that it is not only a solution for homes, but also for military units, both in fixed points and in maneuvers, as well as for companies, schools, seminternships, children's circles and public health units.

Keywords: Solidword, biomass, agroenergy

I. Introducción

Según la Agencia Internacional de Energía, la dependencia de energía basada en combustibles fósiles no es sostenible, tanto en términos de seguridad del suministro como de sus efectos ambientales [FAO, 2008b]. La agroenergía dispone del potencial para contribuir a satisfacer, al menos en parte, la creciente demanda energética. En este sentido ello exige el desarrollo de nuevos conocimientos y políticas que promuevan el acceso a la energía mediante la técnicas de energía del agro, pero logrando una seguridad alimentaria sin afectaciones al medio ambiente; por tanto, las iniciativas que se desarrollen pueden ofrecer nuevas oportunidades a las comunidades rurales. Una de ellas es la producción de energía a partir de la biomasa en sistemas agroforestales integrados, que permitan compatibilizar la seguridad alimentaria y la protección ambiental; en 2007 la biomasa se utilizó para satisfacer alrededor de 10 % de la demanda mundial de energía primaria [FAO, 2008c].

En los últimos 20 o 30 años, la presión causada por el crecimiento demográfico y la explotación comercial de los bosques en el Tercer Mundo, han causado que la leña sea cada día más escasa. Son muchas las comunidades, tanto urbanas como rurales, que están enfrentando problemas de escasez de biomasa para la cocción y, por su alto costo, no pueden darse el lujo de otras fuentes de energía como el kerosene, electricidad o gas. Teniendo en cuenta estas últimas tecnologías para mejorar la salud, el sustento y la calidad de la vida al reducir la exposición a la contaminación del aire intradomiciliario, sobre todo entre mujeres y niños, debido al uso de combustible en la casa. Por lo que se debe trabajar para aumentar el uso de prácticas limpias, confiables, comprobables y eficientes de cocción y calefacción en el hogar, que reduzcan la exposición de las personas a la contaminación del aire en el interior de la vivienda, principalmente en países en vías de desarrollo.

La contaminación del aire intradomiciliario causa serios problemas de salud para dos mil millones de personas en todo el mundo que usan biocombustibles tradicionales para sus necesidades de cocción y calefacción, según la Organización Mundial de la Salud (OMS). En los últimos años han crecido la sabiduría sobre el costo ambiental y social del uso de combustibles tradicionales y de estufas, y los conocimientos sobre formas de reducir las emisiones de estas cocinas. No obstante, las estufas mejoradas actualmente disponibles a los clientes más pobres no siempre representan la mejor práctica o un concepto del diseño que se base en la ingeniería moderna, es por eso que se debe tener en cuenta: que se use menos material de combustión (leña, briquetas) para hacer fuego, que el humo toxico salga afuera del lugar donde se cocine, que no hayan accidentes por volcamiento de las cazuelas, que no afecte el cuerpo por la posición de agachados, que no se irriten los ojos por el humo, que la preparación de la comida sea higiénica, y que tenga buen sabor.

II. Materiales y métodos

Materiales

1. Tubo de acero de 2000x100x3 mm
2. Platinas de acero 1000x500 mm

3. Barra de acero 1000x10 mm
4. Bisagras de metal 6
5. Plancha de madera 1000x500x10 mm
6. Ruedas de gomas 2
7. Perfil L 2000x150 mm
8. Electrodo para acero 1kg

Métodos

Diseño con Software Profesional Solidworks Premium 2016.

III. Desarrollo

Desde la antigüedad los alimentos se preparaban en grandes cocinas públicas, y con el fuego no solo se utilizaba para la cocción de los alimentos, sino también para alumbrarse y obtener calor. La leña es la principal fuente de energía en la mayoría de países en desarrollo y constituye en algunos casos hasta 90 % de la matriz energética para usos casi exclusivamente domésticos. La gran mayoría de personas que la utiliza viven en países en desarrollo, y casi todas son de escasos recursos económicos. Aunque los fuegos abiertos suelen malgastar el combustible, principalmente el sólido, como la leña, cuando se realizan cuidadosamente en estufas como la diseñada o en laboratorio, esos fuegos han demostrado que se pueden quemar en forma eficaz y limpia. El Dr. Grant Ballard-Tremeer y el Dr. Kirk Smith fueron los primeros científicos en descubrir que el fuego de tres piedras podía ser más eficiente y más limpio en combustión que algunas cocinas «mejoradas». Teniendo en mente que las tecnologías indígenas se han desarrollado sobre incontables años de experimentación y son de gran valor, ha cambiado la perspectiva de los científicos que lidian contra las causas del sufrimiento humano. Observar las formas en las que los expertos realizan un fuego abierto ha enseñado a los ingenieros a diseñar estufas todavía más avanzadas. Las modernas para cocinar se han diseñado primariamente para lograr una combustión más limpia. Se puede después forzar el calor contra la olla sin aumentar las emisiones nocivas.

El Dr. Larry Winiarski ha dedicado su vida a promover una variedad de tecnologías domésticas limpias y eficientes. Su mayor logro, y del que está más orgulloso, es la invención de la estufa cohete y su adopción a gran escala en los países en desarrollo. Se partió como base de los preceptos del químico suizo, Aimé Argand, quien en 1780 desarrolló un artilugio de mechero circular, el cual comenzó a llamarse Quinquet por las mejoras introducidas por el francés Antoine Quinquet, como por ejemplo el tubo de vidrio, desplazando con mucha rapidez, las lámparas de aceite usadas hasta entonces. Cientos de miles de estufas han sido fabricadas usando su tecnología. La estrategia de Larry para asegurar la adopción a gran escala se basa en la adaptación de la tecnología para utilizar materiales, técnicas de construcción y maquinaria locales con el fin de producir modelos adecuados al nicho de mercado local y al rango de costos. Él ha compartido libremente esta tecnología con el mundo entero, y ha trabajado para detener cualquier patente o derechos exclusivos con el fin de garantizar un suministro comercial sostenible de la cocina a un precio

justo. Viaja por todo el mundo para enseñar a individuos y grupos los principios de la estufa cohete y ayudarles a iniciar pequeñas tiendas y fábricas locales. «Puedes tener una buena cocina», aconseja, «pero también necesitas un buen entrenamiento y seguimiento».

Los principios del Dr. Larry Winiarski, a tener en cuenta a la hora del diseño, fabricación y puesta en marcha de una estufa, son:

1. *En la medida de lo posible, es necesario aislar alrededor del fuego con materiales livianos y resistentes al calor.* Si es posible, no use materiales pesados como la arcilla y la arena.

2. *Instalar una chimenea corta y aislada directamente encima del fuego.* Esa chimenea estimula una fuerte corriente de aire y hace que el fuego queme caliente y feroz. La chimenea debe ser aproximadamente tres veces más alta que su diámetro.

3. *Calentar y quemar las puntas de los palos a medida que se meten al fuego.* Si únicamente la madera que se quema está caliente, habrá mucho menos humo. Intente que el resto del palo esté tan frío que no pueda estar incandescente ni hacer humo.

4. *Crear temperaturas altas y bajas según la cantidad de leña que se expone al fuego.* Ajuste la cantidad de gas y el fuego creado conforme a la tarea prevista. (La madera se calienta y emite gas. El gas prende fuego y crea calor.)

5. *Mantener una corriente de aire buena y rápida en todo el carburante.* Justo como soplar el fuego o el carbón puede crear calor, tener una corriente apropiada ayudará a mantener altas temperaturas en su estufa. Un fuego caliente es un fuego limpio.

6. *La falta de corriente de aire en el fuego resulta en humo y exceso de carbón.* Sin embargo, demasiado aire enfría al fuego y no es útil. Aberturas más pequeñas en el fuego ayudan a reducir el exceso de aire. Mejorar la eficiencia del intercambio térmico a la olla o plancha es el factor más importante que reducirá el uso de combustible en una estufa de cocina. Mejorar la eficiencia de combustión reduce la contaminación, pero es menos importante cuando se quiere ahorrar leña.

7. *La abertura al fuego, el tamaño de los espacios dentro de la estufa por donde pasan los gases calientes y la chimenea externa deben ser aproximadamente del mismo tamaño.* Esto se llama mantener una superficie transversal consistente y ayuda a mantener una corriente pareja en la estufa. Una buena corriente no solo mantiene el calor del fuego, sino que también es esencial para que el aire caliente creado por el fuego pueda transferir efectivamente su calor a la olla.

8. *Usar una reja debajo del fuego.* No ponga los palos en el piso de una cámara de combustión; tiene que pasar aire por debajo de los palos que queman, por el carbón y dentro del fuego.

9. *Aislar la trayectoria del aire caliente.* Los materiales aislantes en una estufa mantienen calientes los gases de combustión para que calienten mejor la olla o la plancha.

10. *Aumentar el intercambio térmico de la olla con espacios adecuados.* Transmitir calor a una cazuela o a una plancha es más fácil con canales pequeños.

Los gases calientes de combustión están forzados por estos canales estrechos, donde rozan las cazuelas o la plancha. Si los canales son muy grandes, los gases pasan por el centro y no transfieren su calor a la superficie apropiada.

Forzar que los gases de combustión pasen por la superficie de una olla o plancha por un canal angosto es una estrategia de diseño popularizada por el Dr. Samuel Baldwin y el Dr. Larry Winiarski. En 1982, el Dr. Winiarski creó una falda para ollas, un cilindro de metal delgado que rodea la olla, formando un canal estrecho y mejorando la eficiencia del intercambio térmico.

Reducción de emisiones de dióxido de carbono

Una de las contribuciones más relevantes del uso de estufas eficientes está relacionado con el potencial de reducir la degradación de los bosques existentes asociado a prácticas extractivas insostenibles y su impacto sobre el cambio climático global. De acuerdo al IPCC [2007], 17 % de las emisiones mundiales de CO₂ se deben a la deforestación, y aunque de acuerdo a FAO [2008] el consumo de combustibles leñosos ha fluctuado entre 1800 y 1900 millones de metros cúbicos en la última década, no se tiene certeza de qué porcentaje de las emisiones de dióxido de carbono corresponde a la utilización de leña para propósitos domésticos. Como en cualquier combustible, son el carbono y el hidrógeno los que le confieren las propiedades térmicas a la madera que, al incinerarse eficientemente, generan dióxido de carbono y vapor de agua como productos residuales del proceso; sin embargo, cuando se produce una combustión ineficiente se generan gases no deseados como el metano (CH₄), el monóxido de carbono (CO) y óxido nitroso (N₂O), los cuales presentan un potencial de efecto invernadero mucho mayor que el CO₂.

Resultados de la discusión

Los planos de ensamble de las cocinas híbridas, ecológicas, eficientes y de bajo costo se presentan en las figuras 1 y 2.

Primera versión:

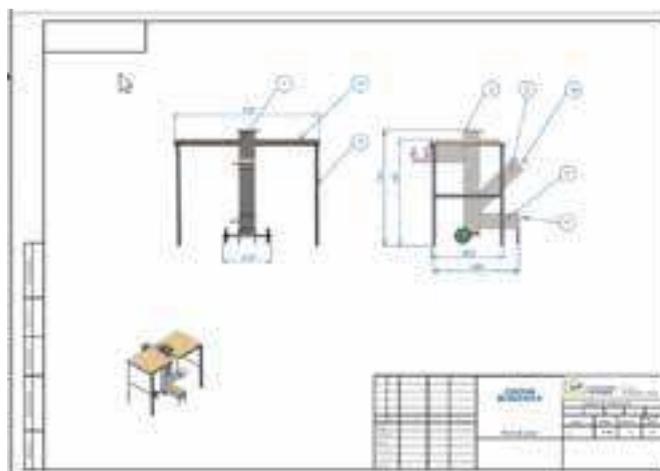


Fig. 1. Plano de ensamble de la cocina en primera versión.

MÉTODO DEL CAMPO UNIVERSAL PARA EL CÁLCULO DE CAMPOS DE HELIOSTATOS DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS HÍBRIDAS BAGACERAS-SOLARES

Por Luis Bérriz Pérez*

* Presidente de la Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto ambiental, Cubasolar.

Resumen

El trabajo trata sobre la determinación de las características que debe tener un campo de heliostatos de una planta de generación de electricidad híbrida de bagazo y solar, como variante independiente del uso de las fuentes renovables de energía en el contexto cubano actual por el desarrollo sostenible.

Las centrales termoeléctricas solares del tipo de «torre» no se consideran entre las instalaciones de mayores perspectivas en la sustitución de las fuentes de energía convencionales, precisamente por su alto costo.

Pero en el caso de las centrales eléctricas bagaceras, la parte de las turbinas y generadores de electricidad se construyen y quedan libres durante buena parte del año. O sea, solo es necesario considerar la parte generadora de vapor en estas centrales solares, esto es, el campo de heliostatos. Una variante económicamente ventajosa a considerar es la construcción de una central termoeléctrica híbrida a partir del bagazo y la radiación solar como fuentes renovables de energía.

Por este motivo se ha procedido, en este trabajo, a la optimización de la forma y el movimiento de cada heliostato del campo, además de su posición más adecuada dentro del terreno con relación a la caldera, previamente seleccionada. Este método se diferencia por esto de los métodos actualmente utilizados, los cuales seleccionan en primer lugar, el tipo de heliostato y realizan solamente optimizaciones parciales del sistema. Si se tiene en cuenta que un campo está compuesto generalmente por miles de heliostatos, con un costo de miles de pesos cada uno, se podrá comprender la necesidad de trabajar con los parámetros optimizados. Al final del trabajo se dan los datos de optimización tanto del campo como de los heliostatos.

Palabras clave: Bioeléctrica, planta termoléctrica solar, heliostato, campo de heliostatos, alternativas de integración; biomasa cañera; cogeneración; esquemas energéticos; generación de electricidad.

UNIVERSAL FIELD METHOD FOR CALCULATING HELIOSTAT FIELDS OF BAGACERAS-SOLAR HYBRID THERMOELECTRIC PLANTS

Abstract

The work deals with the determination of the characteristics that a heliostat field must have of a plant for the generation of hybrid electricity from bagasse and solar, as an independent variant of the use of renewable energy sources in the current Cuban context for sustainable development.

Solar thermal power plants of the «tower» type are not considered among the facilities with the greatest prospects for replacing conventional energy sources, precisely because of their high cost.

But in the case of bagasse power plants, part of the turbines and electricity generators are built and free for much of the year. That is, it is only necessary to consider the steam generating part in these solar power plants, that is, the heliostat field. An economically advantageous variant to consider is the construction of a hybrid thermoelectric plant from bagasse and solar radiation as renewable sources of energy.

For this reason, we have proceeded, in this work, to optimize the shape and movement of each heliostat in the field, in addition to its most appropriate position on the ground in relation to the boiler, previously selected. This method differs by this from the methods currently used, which first select the type of heliostat

and only perform partial system optimizations. If one takes into account that a field is generally composed of thousands of heliostats, with a cost of thousands of pesos each, the need to work with optimized parameters can be understood. At the end of the work the optimization data of both the field and the heliostats are given.

Keywords: Bioelectric, solar thermoelectric plant, heliostat, heliostat field, integration alternatives; cane biomass; cogeneration; energy schemes; electricity generation.

Introducción

En el período de transición de una política energética dependiente y contaminante hacia una independiente y que garantice el desarrollo sostenible, cobra una importancia relevante la organización energética basada en las redes locales con el uso de los recursos energéticos locales y muy especialmente los residuales agropecuarios junto con la radiación solar, el viento y el agua. Por definición, las redes energéticas locales son híbridas pues aprovechan todas las posibles fuentes energéticas locales económicamente disponibles.

En Cuba, una de las fuentes renovables disponibles es el bagazo, un producto residual en la fabricación de azúcar y que pudiera convertirse en un gran problema de contaminación o en la solución de muchos problemas, en dependencia de los que decidan sobre su uso. Un uso es en la producción de electricidad. Pero la zafra es de solo tres a cinco meses como máximo.

Una de las ventajas de las termoeléctricas bagaceras es que pueden ser concebidas con acumulación en este caso, de bagazo y calor, y entregar dentro de determinado rango la electricidad en dependencia de sus necesidades. Pero en todo caso la planta trabajaría con bagazo solamente menos de la mitad del tiempo anual. El tiempo restante de la termoeléctrica con los generadores de vapor y electricidad sería tiempo muerto.

Una de las variantes que se han considerado es el uso del marabú, el cual ha infestado nuestros campos. De esta manera, dichos campos quedarían libres para poder sembrar de nuevo caña de azúcar. Otra variante es sembrar alguna planta energética, por ejemplo, caña energética, y así poder trabajar el año entero o la mayor parte del tiempo.

Otra variante a considerar es hacer una termoeléctrica bagacera solar, ya que dentro de las plantas solares una de las partes que más cuesta son las turbinas y los generadores eléctricos y en este caso ya existen, lo que pueden hacer a la planta que trabaje con la radiación solar económicamente ventajosa. Puede considerarse la variante de generar 50 % del vapor diario con radiación solar y el otro con bagazo y extender el uso del bagazo el año entero.

En todo caso se hace necesario saber las características del campo de heliostatos a utilizar en las condiciones de Cuba. Este trabajo va específicamente dedicado a ese propósito.

Descripción del método del campo universal para el cálculo de campos de heliostatos de centrales termoeléctricas solares

Como primer paso se selecciona el receptor o caldera de tal forma que la relación entre el área definida por la proyección de la misma sobre la superficie perpendicular a la dirección del heliostato y el área total de captación de la mis-

ma, sea máxima. Por este motivo se ha seleccionado una caldera circular plana, cuya relación es la más alta posible.

Como segundo paso se procede a seleccionar el plano del campo de heliostatos. En los métodos tradicionales se calcula un campo de heliostatos particular para las condiciones específicas de un lugar, teniendo en cuenta la latitud y las características del terreno, especialmente la inclinación. Ahora bien, considerando que la radiación solar cae sobre la superficie de la Tierra en forma de rayos relativamente paralelos, se ha tomado un plano independiente de la latitud, perpendicular a la radiación solar al mediodía en los días de equinoccio, lo que equivale a un plano horizontal en el Ecuador. En este plano, la declinación del Sol al mediodía solar es máxima en los días de solsticio, tomando valores límites de $\pm 23,45^\circ$. Los cálculos efectuados para este plano, llamado «plano universal de referencia U», pueden ser utilizados para el proyecto de un campo de heliostatos en cualquier lugar de la Tierra y para cualquier inclinación del terreno, mediante unas transformaciones que se dan más adelante.

El tercer paso es el estudio de los heliostatos, su cinemática y mecanismos y el desarrollo de un esquema cinemático tal que permitiera optimizar tanto la forma como el movimiento de cada heliostato del campo. Por medio de las ecuaciones desarrolladas se estudiaron los distintos tipos de montaje de heliostatos, tales como el mecanismo altacimutal, el polar, el polar trasladado y diferentes modelos de heliostato horizontal. Se llegó a la conclusión de que para poder optimizar el movimiento y la forma de cada heliostato, es necesario la introducción de un nuevo tipo de montaje, el cual se le llamó «heliostato direccional». El mecanismo de heliostato direccional (Fig. 1) se caracteriza por tener su eje principal de rotación situado en el mismo plano vertical donde está situado el vector \mathbf{c} que apunta el receptor, esto es, en el mismo plano formado por el vector \mathbf{c} y el cenit.

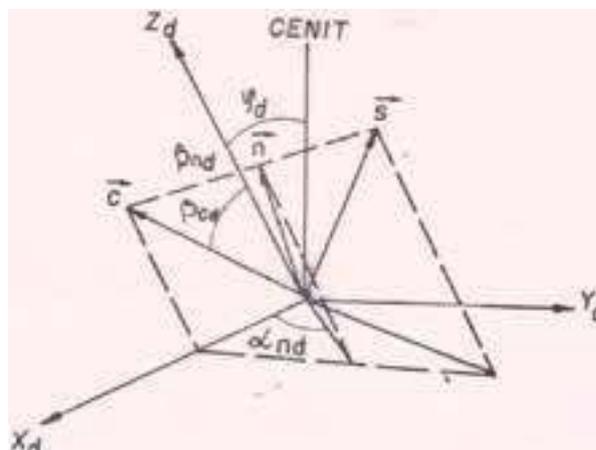


Fig.1. Sistema direccional.

Sea un sistema X_d, Y_d, Z_d tal que el eje Z_d esté en la dirección del eje principal de rotación del heliostato y tanto Z_d como X_d estén en el mismo plano que forma el vector c con el cenit. El sistema $X_d Y_d Z_d$ se representa con relación al sistema polar, por los ángulos de Euler ϑ, ψ, φ . En este caso, el ángulo de precesión es igual al complemento de la latitud y como la latitud en el plano universal es cero, entonces, $\psi = (\pi/2) - \phi = \pi/2$. El ángulo de nutación es igual al ángulo acimutal de la dirección al receptor c , representado por ϑ_α . El ángulo ϑ_α está formado por la dirección Sur y la proyección del vector c sobre el plano horizontal. El ángulo de rotación neta φ_δ puede tomar cualquier valor y según esto definir las distintas variantes de este modelo de mecanismo.

En el sistema direccional descrito, el vector unitario s que apunta siempre al Sol se puede representar por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x_{sd} &= (l_{1d} \cos \omega + m_{1d} \sin \omega) \cos \delta + n_{1d} \sin \delta \\ y_{sd} &= (l_{2d} \cos \omega + m_{2d} \sin \omega) \cos \delta + n_{2d} \sin \delta \\ z_{sd} &= (l_{3d} \cos \omega + m_{3d} \sin \omega) \cos \delta + n_{3d} \sin \delta \end{aligned}$$

donde:

l_{1d}	$-\cos \phi \sin \varphi_d + \cos \vartheta_a \sin \phi \cos \varphi_d$
m_{1d}	$+\sin \vartheta_a \cos \varphi_d$
n_{1d}	$-\sin \phi \sin \varphi_d - \cos \vartheta_a \cos \phi \cos \varphi_d$
l_{2d}	$-\sin \vartheta_a \sin \phi$
m_{2d}	$+\cos \vartheta_a$
n_{2d}	$+\sin \vartheta_a \cos \phi$
l_{3d}	$\cos \phi \cos \varphi_d + \cos \vartheta_a \sin \phi \sin \varphi_d$
m_{3d}	$\sin \vartheta_a \sin \varphi_d$
n_{3d}	$\sin \phi \cos \varphi_d - \cos \vartheta_a \cos \phi \sin \varphi_d$

En este mismo sistema, el vector unitario c que apunta al receptor está dado por las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} x_{cd} &= \sin \beta_{cd} \\ y_{cd} &= 0 \\ z_{cd} &= \cos \beta_{cd} \end{aligned}$$

donde β_{cd} es el ángulo formado por el eje Z_d y el vector c .

Entonces, el vector n , normal al plano del heliostato está representado por:

$$\begin{aligned} x_{nd} &= \frac{1}{2}(x_{sd} + x_{cd}) \\ y_{nd} &= \frac{1}{2}(y_{sd}) \\ z_{nd} &= \frac{1}{2}(z_{sd} + z_{cd}) \end{aligned}$$

Los valores de los ángulos α_{nd} y β_{nd} con los cuales se puede determinar la rotación del vector n alrededor de los ejes de rotación principal y secundario, están dados por las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \tan \alpha_{nd} &= y_{nd} / x_{nd} \\ \tan \beta_{nd} &= (x_{nd}^2 + y_{nd}^2)^{1/2} / z_{nd} \end{aligned}$$

y por lo tanto, los ángulos de rotación alrededor del eje principal α_{nd} y secundario β_{nd} , así como las respectivas velocidades angulares $\dot{\alpha}_{nd}$ y $\dot{\beta}_{nd}$ dependen del ángulo φ_d , el cual define la posición del eje principal de rotación, lo que significa que se puede seleccionar para cada heliostato, el ángulo φ_d más ventajoso que permita el mejor aprovechamiento del área especular de cada heliostato del campo.

El cuarto paso consiste en la optimización de movimiento y la forma del heliostato en el campo universal de referencia. El montaje óptimo de un heliostato es aquel que en dependencia de su posición relativa con respecto al receptor y también con respecto a la forma de este, el área especular del heliostato tenga la máxima eficiencia. A cada montaje óptimo le corresponde un «área ideal» del heliostato. Para determinar esa área ideal es necesario conocer la proyección del área captadora del receptor sobre el plano del heliostato, es decir, la proyección del haz de rayos necesarios para alimentar completamente al receptor, sobre la superficie especular del heliostato. Esta proyección varía con el tiempo, según el movimiento relativo del Sol en la esfera celeste. Este es uno de los pasos más importantes en el diseño de la forma y el movimiento del heliostato.

La proyección del receptor sobre el plano del heliostato

Sea X_f, Y_f, Z_f un sistema de coordenadas fijo al plano del heliostato, de tal manera que el eje Z_f tenga la misma dirección que la normal n ; el eje Y_f esté en la dirección del eje secundario de rotación y que tanto Y_f como X_f estén en el mismo plano reflector del heliostato (Fig. 2).

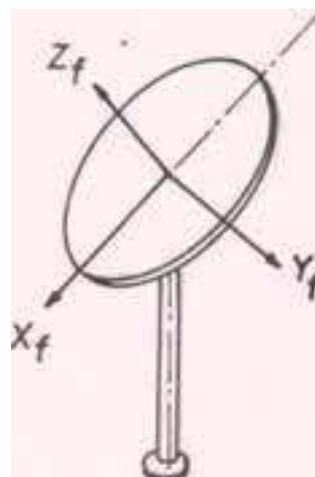


Fig. 2. Sistema fijo al heliostato.

La proyección, en cada momento, del receptor sobre el plano del heliostato está dada por:

$$\begin{aligned} x_{Rf} &= x'_R \cos \gamma - y'_R \sin \gamma \\ y_{Rf} &= x'_R \sin \gamma + y'_R \cos \gamma \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} x'R &= R(\cos\beta_u \cos\alpha_n \cos\varepsilon + \sin\alpha_n \sin\varepsilon) / \cos\beta_n \\ y'R &= R(\cos\alpha_n \sin\varepsilon - \cos\beta_u \sin\alpha_n \cos\varepsilon) \end{aligned}$$

donde ε es un parámetro variable de 0 a 2π

$$\begin{aligned} \text{sen}\gamma &= \text{sen}(\beta_u - \varphi_u) \text{sen}\alpha_{nd} / \text{sen}\beta_n \\ \text{cos}\gamma &= \text{cos}\alpha_n \text{cos}\alpha_{nd} + \text{sen}\alpha_n \text{sen}\alpha_{nd} \text{cos}(\beta_u - \varphi_u) \end{aligned}$$

donde (Fig.3):

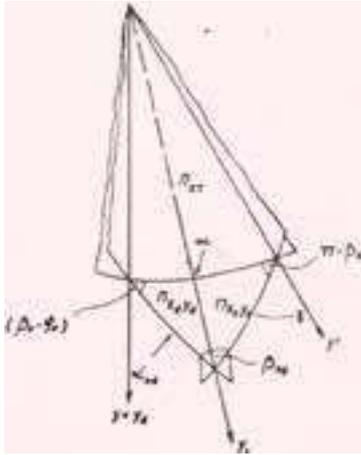


Fig. 3. Relación entre los planos XY, $x_d y_d$ y $x_f y_f$.

α_n ángulo que forma la proyección de la normal n sobre el plano XY y el eje X

XYZ sistema de coordenadas direccional, donde el eje Z está en la dirección c

β_n ángulo formado por la normal n y el eje Z

α_{nd} ángulo que forma la proyección de la normal n sobre el plano $X_d Y_d$ y el eje X_d

$X_d Y_d Z_d$ sistema de coordenadas direccional donde el eje Z_d tiene la dirección del eje principal de rotación

β_{nd} ángulo formado por la normal n y el eje Z_d

j_u ángulo de rotación neta del sistema $Z_d Y_d Z_d$

b_u ángulo cenital del receptor en el campo U

g ángulo formado por la recta de intercepción de los planos XY y $X_f Y_f$ y la recta Y_f

Los valores de $\text{sen}\alpha_n$, $\text{cos}\alpha_n$, $\text{sen}\beta_n$, $\text{cos}\beta_n$, $\text{sen}\alpha_{nd}$, $\text{cos}\alpha_{nd}$ vienen dados por:

$$\begin{aligned} \text{sen}\alpha_n &= y_n / (x_n^2 + y_n^2)^{\frac{1}{2}} & \text{sen}\alpha_{nd} &= y_{nd} / (x_{nd}^2 + y_{nd}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \text{cos}\alpha_n &= x_n / (x_n^2 + y_n^2)^{\frac{1}{2}} & \text{cos}\alpha_{nd} &= x_{nd} / (x_{nd}^2 + y_{nd}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \text{cos}\beta_n &= z_n^{-1} & \text{sen}\beta_n &= (1 - z_n)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

El heliostato óptimo

Por medio de un programa de cálculo se demostró que el montaje óptimo de un heliostato que alimenta una caldera central está definido por el valor:

$$\varphi_{OPT} = \beta_u \pm \pi/2$$

Donde b_u es el ángulo cenital del vector c de cada heliostato en el campo universal U. Entonces, si $Z_o Y_o Z_o$ es el sistema de coordenadas que define el mecanismo óptimo, se tiene:

$$\begin{aligned} \tan\alpha_{no} &= y_{no} / x_{no} \\ \cos\beta_{no} &= z_{no} / x_{no}^{-1} \end{aligned}$$

El ángulo α_{no} define la rotación del heliostato alrededor del eje principal Z_o y el ángulo β_{no} define la rotación del heliostato alrededor de su eje secundario. Las velocidades de rotación alrededor de cada eje son:

$$\begin{aligned} \alpha'_{no} &= (x_{no} y'_{no} - y_{no} x'_{no}) / (x_{no}^2 + y_{no}^2) \\ \beta'_{no} &= (x'_{no} z_{no} - z'_{no} x_{no}) / 2x_{no} (x_{no}^2 - z_{no}^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

donde: $x_{no} = \frac{1}{2} [(\cos\beta_u \cos\omega + \text{sen}j_u \text{sen}\beta_u \text{sen}\omega) \text{cos}\delta - \text{cos}\vartheta_u \text{sen}\beta_u \text{sen}\delta + 1]$

$$y_{no} = 1(\text{cos}j_u \text{sen}\omega \text{cos}\delta + \text{sen}j_u \text{sen}\delta)$$

$$z_{no} = 1[(\text{sen}b_u \text{cos}\omega - \text{sen}\vartheta_u \text{cos}\beta_u \text{sen}\omega) \text{cos}\delta + \text{cos}\vartheta_u \text{cos}b_u \text{sen}\delta]$$

Debido a que el eje de rotación principal es perpendicular a la dirección c, las velocidades de rotación son mínimas comparadas con otros mecanismos de heliostato. Por medio de las fotografías obtenidas en el programa, el área ideal de cada heliostato del campo está definido por:

$$A_i = \pi R^2 \cos\beta_u / \cos\beta_{n\text{MÍNIMO}}$$

Donde R es el radio del área captadora del receptor y $(\beta_n)_{\text{MIN}}$ es el menor ángulo formado por el vector c y el vector n durante el trabajo del heliostato i. A_i da la mayor cantidad de energía que puede dar un heliostato en la posición i, sin que el haz de rayos se sobresalga del receptor.

Caracterización energética del campo de heliostatos

La cantidad de radiación instantánea enviada por el heliostato i al receptor es calculada por la ecuación:

$$E_{ii} = \rho \cdot \gamma_i \cdot A_i \cdot p_{i0} \cdot \cos\beta_n \cdot \tau_i \cdot \sigma_i$$

Donde: ρ coeficiente de reflexión de la superficie especular

γ_i coeficiente de captación

A_i área del heliostato en la posición i

p_{i0} radiación directa instantánea que cae sobre la superficie perpendicular al haz de rayos

$\cos\beta_n$ factor coseno instantáneo

τ factor de sombra

σ factor de bloqueo

La eficiencia geométrica del heliostato está definida como la relación entre la energía que envía el heliostato y la máxima energía que pudiera enviar.

Entonces, la eficiencia instantánea está dada por:

$$\eta_t = \cos\beta_n \cdot t \cdot s$$

El factor coseno se determina por la ecuación:

$$\cos\beta_{nm} = \{(\cos\beta_u \cos\omega + \text{sen}\vartheta_u \text{sen}\beta_u \text{sen}\omega) \text{cos}\delta_m - \text{cos}\vartheta_u \text{sen}\beta_u \text{sen}\delta_m + 1\}^{\frac{1}{2}}$$

La eficiencia diaria del heliostato i en un día cualquiera del año está dado por el valor de:

$$h_d = \int \rho_i h_t dt / \int \rho_i dt$$

Para el diseño óptimo de un campo de heliostatos, uno de los datos más importante es el valor de la energía solar que envía cada heliostato i del campo al receptor durante un año de trabajo. Este valor viene dado por:

$$E_{ai} = A_i \sum_m \eta_m \sum_n \rho_m \gamma_m \tau_m \sigma_m \cos \beta_{nm} t_m (\rho_i)_m$$

Para su uso en el cálculo se definió como «factor de concentración potencial» del heliostato, el valor dado por la expresión:

$$C_{pi} = 4E_{ai} / 8760 \pi D^2$$

El factor de concentración potencial del campo está dado por:

$$C_{pc} = \sum C_{pi}$$

Este factor caracteriza al campo, ya que con él es muy fácil determinar todos los parámetros del campo de heliostatos para una potencia requerida. Así, para una CTS de una potencia de salida P y un factor de concentración potencial C_{pc} , el valor del diámetro del receptor está dado por:

$$D = (4P / \pi \eta_p C_{pc})^{1/2}$$

Donde η_p es la eficiencia de la estación generadora.

En la figura 4 se dan los valores de los factores de concentración promedio correspondientes a las zonas definidas por los ángulos β_u y ϑ_u .



Fig. 4. Valor de CPC en el plano U.

Para una altura H_u del receptor sobre el campo universal U , el ángulo b_u define sobre el mismo plano una circunferencia. Así, a cada circunferencia del campo universal U

le corresponde una cónica (elipse) en el campo L dada por el corte del plano local L con el cono de vértice V y ángulo β_{ui} . La línea de intersección de los planos U y L está dada por el eje Y_L como se aprecia en la Fig. 5.

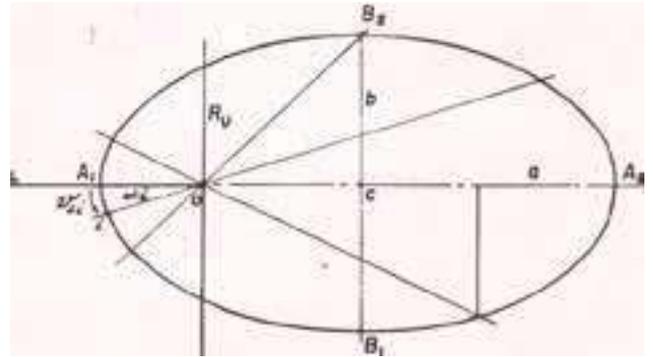


Fig. 5. Plano local L.

Un parámetro importante en la construcción del campo equivalente L es el ángulo equivalente al ángulo acimutal ϑ_u . El valor de este ángulo está dado por:

$$\tan \vartheta_{Li} = \tan \vartheta_{ui} \cos \phi$$

El radio de giro de la elipse en el sistema de coordenadas $XLYL$ está dado por el segmento OD y representado por:

$$d_i = H_u \sin \beta_{ui} / \cos(\beta_{ui} - \varphi_{Li})$$

donde φ_{Li} es un parámetro que está dado por la ecuación:

$$\varphi_{Li} = \arctan(\tan \beta_{ui} \cos \vartheta_{ui})$$

Con los valores ϑ_{ui} y d_i se puede situar cualquier punto i del campo universal de referencia en el campo local equivalente L .

En la Fig. 6 se aprecia un campo local equivalente para un valor de la latitud igual a 23° .

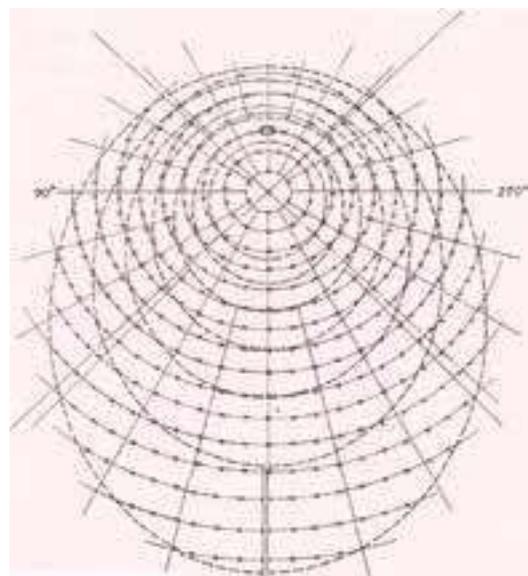


Fig. 6. Campo equivalente.

Por último, partiendo de los cálculos anteriores, se ha confeccionado un gráfico que permite generalizar el método para diferentes potencias de salida, +así como para distintas concentraciones en la caldera.

Utilizando el método anteriormente expresado y a manera de ejemplo, se ha efectuado el cálculo de un campo de heliostatos de una potencia uniforme de salida de 2 MW eléctricos durante 12 horas.

Tabla 1. Parámetros del campo local L

Concepto	Simbología	Unidad	Campo L
Cantidad de heliostatos	k	uno	380
Coefficiente de eficiencia geométrica	h_{ac}		0,86
Área del heliostato	A_i	m ²	91
Área especular total	A_c	m ²	34 552
Área del receptor	A_r	m ²	143
Altura del receptor	H_L	m	115
Área total del campo	A	m ²	117 938
Coefficiente de llenado	K_3		0,29
Potencia calórica (I=0,77kW/m ²)	E_{hc}	MW	16,7
Concentración	C_{tc}	kW/m ²	116,5

Conclusiones

Las velocidades de rotación del heliostato alrededor de sus ejes principal y secundario varían en dependencia del ángulo formado entre el eje principal de rotación y el vector que apunta al receptor. Si este ángulo es cero, las velocidades son máximas; si este ángulo es de 90°, las velocidades son mínimas.

El llamado efecto «gimbal lock», esto es que la velocidad de rotación tiende a infinito cuando la dirección al Sol coincide con el eje principal de rotación, no se presenta en los heliostatos como plantean algunos autores. Para que suceda el efecto mencionado es necesario, además, que el ángulo formado entre el eje principal de rotación y la dirección al receptor sea cero.

Solo un tipo de mecanismo tiene una velocidad alrededor de su eje principal de rotación constante e igual y contraria a la velocidad de rotación de la Tierra, independientemente de la posición del heliostato en el campo. Este es el mecanismo llamado «mecanismo polar trasladado». En este mecanismo, la velocidad alrededor del eje secundario es nula.

El eje motriz de un heliostato no tiene por qué coincidir con los ejes de rotación. Por esto, todo tipo de montaje, ya sea altacimutal, horizontal o direccional, puede ser movido por un mecanismo polar trasladado. Esto significa que cualquier campo de heliostatos, independientemente del tipo de montaje que utilice, puede utilizar el mecanismo polar trasladado para el movimiento de los heliostatos, y de esta manera todos pueden ser sincronizados con un mismo sistema central de control con velocidad constante.

El área útil de un heliostato de un campo que alimenta una caldera central, está dada por el contorno interior de las proyecciones del receptor sobre el plano del heliostato. El área que define este contorno depende del ángulo formado por el eje principal de rotación y el vector que apunta al receptor. Esta área es máxima, cuando dicho ángulo es de 90° y mínima, cuando el ángulo es de cero grados.

El heliostato óptimo para la formación de un campo de heliostato que alimenta a una caldera central, es el heliostato cuyo eje principal de rotación forma un ángulo de 90° con el vector que apunta hacia el receptor, ya que tiene un máximo aprovechamiento del lugar con una mínima velocidad de rotación.

El diseño de un campo de heliostatos se realiza con relativa facilidad para cualquier latitud e inclinación del terreno, si se conocen los parámetros de un campo universal de referencia. El campo calculado a partir del campo universal U, llamado «campo local equivalente L», tiene las mismas características geométricas del campo U.

El campo universal U es aquel donde el valor del «factor coseno» es máximo. Además, el movimiento de los heliostatos óptimos permite que el factor bloqueo del campo sea igual a la unidad y el factor de sombra sea más alto que utilizando otros tipos de montaje, para un campo de igual coeficiente de llenado. Por eso, el campo L es el campo de mayor eficiencia geométrica posible, lo que significa que para una potencia determinada, el campo L es el campo que requiere menor área especular.

Debido a que la relación entre el área de cada heliostato y el área del receptor es máxima en los heliostatos óptimos, el campo L es el que requiere una mínima cantidad de heliostatos para una potencia y temperatura requeridas.

Bibliografía

- ALMAZÁN DEL OLMO, OSCAR *et al* (2013). *El bagazo de la caña de azúcar. Conocimiento y potencial*. La Habana: Ed. ICIDCA. Octubre de 2013.
- BÉRRIZ PÉREZ LUIS, MARIO EDUARDO ÁLVAREZ-GUERRA JÁUREGUI, MARIO ANTONIO PLASENCIA Y FRANCISCO MONDELO GARCÍA (2009). «Hornos solares de niveles de concentración extremos». En *Eco Solar* 27 (enero-marzo, 2009). La Habana: Ed. Cubasolar.
- RUBIO-GONZÁLEZ ÁNGEL Y MANUEL RUBIO RODRÍGUEZ (2018). «Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad». En revista *Centro Azúcar*, Vol. 45, oct.-dic. 2018.
- VALDÉS, A. (2015). «Uso eficiente del vapor en el proceso de producción de azúcar crudo o blanco directo». *ATAC*, Vol. 76, No. 2, 2015, pp. 34-38.

DISMINUCIÓN DE LOS COSTOS DEL KWH FOTOVOLTAICO

Por **Dr. C. Daniel Stolik Novygrad***

*Instituto de Materiales y Reactivos, Universidad de La Habana

E-mail: stolik@imre.uh.cu; dstolik@fisica.uh.cu

Resumen

El trabajo en diversos acápités describe el estado del arte de la disminución de los costos de la energía fotovoltaica, como son: disminución de los costos FV, limitaciones del cálculo denominado nivelado (LCOE) del kWh, variante de cálculo del Wh FV. Costos por sectores (Utility, Industria, comercio, comunidad, residencial), costos por componentes de las instalaciones FV, división en costos duros (*hard*) y blandos (*soft*), comportamiento por países, costos de capital, influencia de la radiación solar en el costo del kilowatt hora. Inversiones de PPA (compraventa de energía), inversiones propias, costos del kWh en Cuba. Se concluye que la fotovoltaica irá disminuyendo sus costos, y se pronostica el escenario de aplicación favorable para Cuba.

Palabras clave: Costo de instalaciones FV. Costo, nivelado. Costo evitado, Costo del kWh FV. Costo inicial. Costos posteriores. Costos duros (*hard*). Costos blandos (*soft*), Inversión en PPA. Inversión propia. Influencia del nivel de radiación solar. Encarecimiento por aumento del WACC.

REDUCTION OF PV COSTS

Abstract

The work in various sections describes the state of the art of the decrease in the costs of photovoltaic energy, such as: Reduction of PV costs. Limitations of the calculation called levelized (LCOE) of kWh. Calculation variant of kWh FV. Costs by sectors (Utility, Industry, commerce, community, residential). Costs for components of PV installations. Division in hard (*soft*) and soft (*soft*). WACC- Behavior Capital costs Influence of solar radiation on the cost of kilowatt hours. PPA investments (Power Power Agreement)). Own PV investments. kWh costs in Cuba. Conclusions.

Keywords: Cost of PV installations. Cost, level. Cost avoided, Cost of kWh PV. Cost starts. Subsequent costs Hard costs. Soft Costs, Investment in PPA. Own investment Influence of the level of solar radiation. Increase in WACC increase.

Introducción

Las aplicaciones fotovoltaicas comenzaron con la necesidad de generar electricidad en el espacio extraterrestre, a un enorme costo, pero pequeño comparado con el costo de cohetes, satélites y naves espaciales, el problema era de «tener o no tener» energía eléctrica al respecto. Posteriormente, más barato pero aún muy caro, en la década de los 80 comenzaron las aplicaciones FV en la superficie terrestre en lugares alejados de las redes eléctricas, por ejemplo, en faros marinos. Con la continua disminución de los costos FV se iniciaron las instalaciones conectadas a la red eléctrica, la que fue aumentando anualmente en forma vertiginosa para convertirse en el gran motor impulsor de la energía FV. Uno de los factores más decisivos para la disminución del costo FV fue el de los costos del

Watt pico (Wp) del módulo (panel) FV de silicio cristalino; por ejemplo, el de silicio poli cristalino, aproximadamente a puerta de fábrica ha tenido la siguiente impresionante evolución de costos en centavos de USD por Wp ([PVinsights, 2020]):

Cuadro 1

año	1995	2000	2005	2010	2015	2019
\$/Wp	800	500	300	180	56	19

Específicamente, las celdas de silicio cristalino componen actualmente alrededor de 96 % de la producción anual mundial de módulos FV. Fue determinante la disminución del costo FV debido a que el kg de silicio puro pasó en

2008 de superar los 400 USD, a unos 13 USD/kg en 2013 y hoy en 2020 está en algo menos de 8 USD/kg.

Toda esta evolución de costos más procesos de automatización fue motivando paralelamente un descomunal aumento de la producción de economía de escala y de instalaciones FV mundiales anuales, como se muestra a continuación en términos de MW:

Cuadro 2

	1995	2000	2005	2010	2015	2019
MW	64	440	1400	17 000	53 000	120 000

El kilowatt hora (kWh) fotovoltaico

El elemento central en el costo FV es el kilowatt hora (kWh) [Pvinsigts, 2020], cuyos promedios han dependido en varios factores [Stolik, 2016; 2012, 2012a]:

Cómo y cuánto se aplica. Costos de las componentes, celdas, módulos, inversores, entre otros. En el espacio extraterrestre o en la superficie del planeta. Remoto aislado o en las inmediaciones de la red. Conectado o no conectado a red. Centralizado o descentralizado. Instalación de nivel utility, residencial, comercial, industrial o social. Sistemas experimentales o reales. De pequeñas potencias, menores de 1kW, a plantas FV de cientos de MW.

Nivel de radiación solar del lugar, entre 750 kWh/m²/año y 2400 kWh/m²/año.

Momento: anterior, actual o pronóstico futuro. Duración en años del sistema fotovoltaico. Variantes de financiamientos. Conocimientos, experiencias y mejores prácticas alcanzados.

Cálculo del costo del kilowatt hora fotovoltaico

La fórmula para calcular el kilowatt hora durante toda la vida útil de una instalación fotovoltaica [Stolik, 2016a] es:

$$\text{Costo } (\$/kWh) = \frac{\$/kWp}{kWh / kWp} = \frac{\$}{kWh}$$

Donde:

\$/kWp es el costo total (inicial, posterior, costo de capital, etcétera)

kWh/kWp son las horas pico que genera durante toda la vida útil, que dependen del nivel de radiación solar del lugar y de la degradación del módulo. En el numerador se suman todos los costos y gastos; pero pueden existir compensaciones que se restan.

Costo nivelado

Para calcular el costo del kWh de electricidad, con fines comparativos entre distintas fuentes y combustibles, se ha utilizado una herramienta denominada como «costo nivelado» [Wikipedia, s/a], con el objetivo de definir el costo del kilowatt hora promedio por la vida útil de cualquier fuente de generación eléctrica. Para ello se han utilizado distintas variantes de fórmula, como:

$$LEC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

I_t Gastos de inversión en el año t

M_t Gastos de O-M año t

F_t Gastos de combustibles por años (en caso fósiles)

E_t Generación eléctrica por año t

r% de tasa de descuento

n años de vida útil del sistema

Otra variante de formula LCOE:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$

Donde:

I_0 : Erogación de la inversión inicial

A_t : Costos anuales (operación, mantenimiento) en toneladas

$M_{t,el}$: Energía eléctrica producida

i: % de tasa de descuento

n: años de vida útil del sistema fotovoltaico

t: año correspondiente de 1, 2, ...n

Existen otras variantes de fórmulas para el cálculo del LCOE como:

$$LCOE = \frac{\text{Costo del proyecto} = \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+DR)^t} + \frac{I_0}{(1+DR)^0}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+DR)^t}}$$

Donde:

A_t : Gastos de mantenimiento

R_v : Valor residual (ej.: reciclaje de muchas partes).

$$LCOE = \frac{\frac{I_0 - \sum_{t=1}^n \frac{TR}{(1+TR)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+TR)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{LP}{(1+TR)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{INT}{(1+TR)^t} + (1-TR) \frac{R_v}{(1+TR)^n}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+TR)^t}}$$

Donde:

- PCI: *Project Cost Investment Tax Credit* (proyecto con deducción de cuota)
- DEP: depreciación
- TR: *Tax Rate* (tipo impositivo de impuesto)
- LP: *Loan Payment* (pago por préstamos)
- INT: *Interest Paid* (desembolso por interés)

En las fórmulas se utilizaron distintas siglas para tasa de descuentos $r = DR = i$.

Con relación a las fórmulas anteriores de LCOE o costo energético nivelado, en el Investor Guide «New business models for PV international markets» de agosto de 2014, pág. 20 se plantea [New bussiness..., 2014]:

«Es importante notar que este método es una abstracción de la realidad con el propósito de comparar diferentes tipos de plantas generadoras, y no es apropiado para determinar la eficiencia de costo de una planta específica».

En otros trabajos [IEA, 2013; 2017] también se argumenta la complejidad de tomar decisiones de inversiones para la generación eléctrica de acuerdo con la diversidad de factores que influyen (Fig. 1).

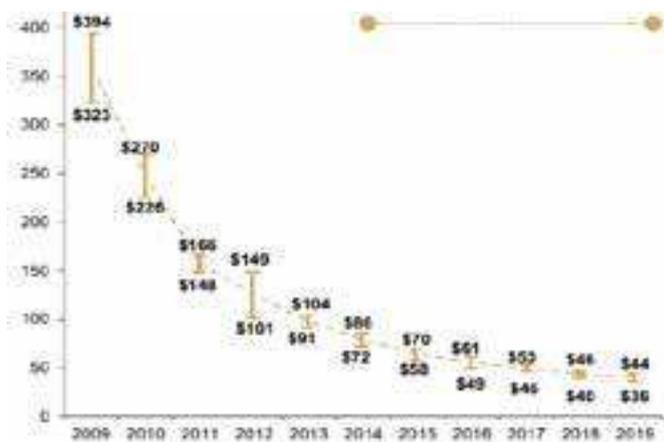


Fig.1. Evolución de costos del kWh FV de escala utility [IEA, 2013]. Fuente: Lazard, nov. 2019.

Según Lazard el costo del kWh FV pasó de estar como promedio entre 32,3 y 39,4 centavos USD/kWh en 2009, a entre 3,6 y 4,4 centavos USD/kWh.

Los costos records FV de nivel utility son aún más bajos en variantes de financiamiento en Contrato de compra de energía (PPA, Power Purchase Agreement) [Señal, 2018], según se muestra en la figura 2:



Fig. 2. Precios records del kWh FV por PPA.

En términos de potencia los costos de instalación en USD/kW, según Lazard [2019] por sectores muestran los rangos siguientes (Fig. 3).



Fig. 3. Costos de instalación FV por sectores. Fuente: Lazard, 2019.

En términos de energía los costos por kWh FV generado por sectores [Lazard, 2019] son los siguientes (Fig. 4):



Fig. 4. Costos del kWh FV por sectores. Fuente: Lazard, 2019.

Costo evitado

Para disminuir las limitaciones de los LCOE es necesario complementarla con el análisis del «costo evitado» (LACE-Levelized avoided cost of electricity), al que se puede acceder en [IEA, 2013, 2017]. Este elemento es muy apropiado para determinaciones económicas, ya que en parte depende de qué alternativas se quieren promover o sustituir y de la distribución de componentes existentes del MIX; de cuáles son las bondades o problemas de las tecnologías que se plantean aplicar; si la solución es nacional o de importaciones de las capacidades de energías primarias que se disponen, entre otros factores.

Para calcular el costo evitado es necesario precisar el costo del kWh de la fuente de generación eléctrica con que se compara la FV. Según cálculos del autor, actualmente en Cuba el costo del kWh FV es unas tres veces más barato que la del promedio fósil, diferencia que aumentará con el transcurso de los años, aspecto a tener muy en cuenta en la definición del aporte FV al desarrollo de la estrategia de la generación eléctrica del país.

Cálculo explícito del kilowatt hora fotovoltaico (kWh FV)

Para precisar el cálculo de los costos FV en Cuba de forma integral, es necesario tener en cuenta las características propias del país, así como los diversos costos de componentes y elementos relacionados con el posible desarrollo y aporte fotovoltaico a la problemática eléctrica. En la fotovoltaica, el peso mayor lo tiene el costo inicial, lo que permite tratar de evitar las sumatorias de las fórmulas LCOE antes referidas, con el objetivo de ofrecer a un escenario más claro de los cálculos de los costos,

$$S/kWh = \frac{\text{Costo inicial} + \text{Tasa de intereses} - \text{TAX al Inversor} - \text{Saldo residual}}{\text{MWh/kWh} \times \text{Vida útil de per vida: } 3360 \times 25 = 34\ 000 \text{ (Teniendo en cuenta de prestar de temporal)}}$$

Fig. 5. Cálculo del costo de por vida del kWh FV.

Donde las componentes son:

Costo inicial: Módulos, inversor, estructura soporte, cableado obra civil, otros.

Tasa, préstamos: Financiamientos (Costos de capital, Créditos, Intereses, tasas de descuentos, WACC (Weighted Average of Capital Cost).

O-M: Operación, Mantenimientos, Salarios.

Tax al inversionista: Impuestos Ganancias, Permisos, Arrendamientos.

Valor residual: Reutilización, Recuperación, Reciclajes.

En la fórmula de la Fig.5, en el numerador se suman:

- Todos los costos iniciales y posteriores (módulos, inversor, estructura, cableado, obra civil, instalación y montaje, labor, etcétera).
- Préstamos, créditos, otros financiamientos, tasas de descuento, otros del acápite WACC (costo promedio ponderado del capital), créditos.
- Operación y mantenimiento (O-M), que incluye salarios (para la fotovoltaica son la O-M menor de todas las fuentes de generación eléctrica).
- Costos por imprevistos que incluyen falta de experiencia del cliente receptor.

En el numerador se restan:

- Impuestos a pagar por el inversionista por ganancias, permisos y arrendamientos.
- Incentivos existentes en distintos países (la subvención mundial a los combustibles fósiles es mucho mayor que las de las FRE).
- Costos por reutilización, recuperación, reciclajes de partes de la instalación
- fotovoltaica, sobre todo al final de su vida útil.

En el denominador se expresa el costo kilowatt hora/kilowatt pico, horas pico totales efectivas. Cuba tiene una radiación promedio de 1825 kWh/m²/año; pero debido a la degradación paulatina de la eficiencia del módulo de aproximadamente 20 % al cabo de entre 20 y 25 años, el autor toma aproximadamente 1360 kWh/kWp x 25 años = 34 000 horas. Para zonas con distinta radiación este parámetro cambia.

Costos duros (*hard*) y costos blandos (*soft*)

Es de gran utilidad dividir en dos grupos todos los elementos anteriores que determinan el costo total final de la instalación fotovoltaica, desde el costo inicial hasta durante toda la vida, denominados en el argot fotovoltaico: 1.-*hardcost* (costos duros) y 2.-*softcost* (costos blandos) [Señal, 2016].

Los costos duros (*hardcost*) están compuestos por componentes físicos tangibles: 1- Módulo FV, 2- Inversor FV, 3- EBOS (*electric base of System*) - componentes físicos eléctricos 4- SBOS - parte de componentes físicos de mecánica. O sea, el *hardcost* incluye todo lo relativo a equipamientos, dispositivos y partes de las instalaciones. En él se diferencian los módulos e inversores por sus características más comunes en costos y prestaciones, quedando varios aspectos agrupados en «otros *hardcosts*».

La relación de las componentes por concepto de «otros *hardcost*» (sin incluir módulos e inversores también del grupo «*hard*») es la siguiente:

- Cableado: cables CD y CA, conectores y cajas de strings.

- Estructura: sistemas de montaje, perfiles, fundamentos, materiales para estructuras e inversores.
- Seguridad: cercas, cámaras y sistemas de seguridad, equipamientos de protección y antiincendios.
- Conexión a la red: cables y conectores, switchgears, pizarras de control, transformador y subestaciones.
- Sistemas de monitoreo y control: metrología, sensores de irradiación y de temperatura, y sistemas de datos.

El soft cost incluye las componentes que dependen directamente de la labor y la mente humana como: 1- Márgenes, 2- Impuestos, 3- Cadena de suministros, 4- Miscelánea, 5- Permisos e interconexiones, 6- Diseño e ingeniería, 7- Instalación, mano de obra, O-M.

Desagregación de costos *hard* y *soft* por países

Para Cuba es sumamente importante analizar los costos divididos en *hard* y *soft*, ya que la importación y erogación en MLC coincide más con la parte *hard*, mientras que los gastos *soft* se pueden afrontar mayormente en CUP.

Además de que los costos actuales promedios FV se diferencian por sectores, también dentro de un mismo sector se diferencian notablemente por países. En el gráfico siguiente (Fig. 6) las grandes diferencias de costos totales FV en el sector utility en 19 países, desde 793 USD/kW en India a 2427 USD/kW en Canadá [Irena, 2016], desagregadas por las subcomponentes *hard* y *soft*.

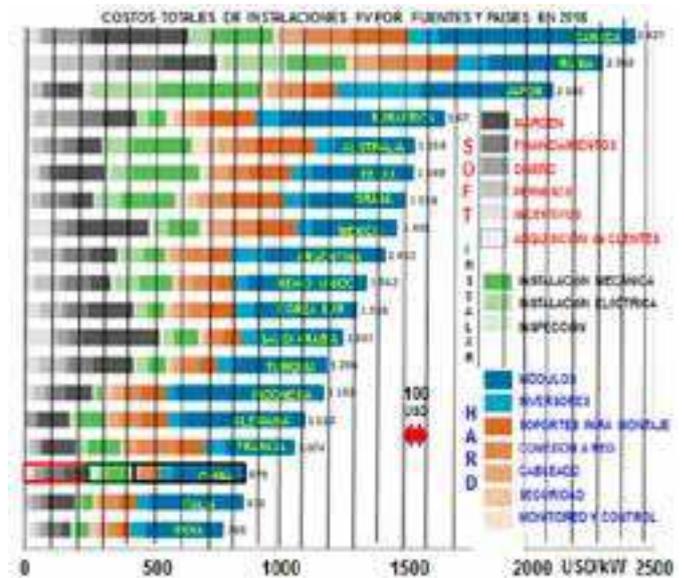


Fig. 6. Costos totales de instalaciones FV. Datos: IRENA 2019.

A continuación se analizan los comportamientos específicos de *hard* y *soft* para el disímil grupo de países abordados.

Hard cost por países

Comencemos por la parte de costos *hard* de módulos + inversores. En el gráfico de la Fig. 7 se muestra la notable diferencia por países de costos *hard* del módulo + inversor FV (entre unos 300 USD/kW y 900 USD/kW), según se puede apreciar en el gráfico siguiente:

- Permisos: todo tipo de autorizaciones para el desarrollo constructivo, de operación y regulaciones sobre el medioambiente.
- Diseños: costos sobre conceptos y detalles de los diseños. Costos de planificación y documentación. Costos de reconocimientos geológicos y de agrimensura.
- Adquisición de cliente: costos de convencimiento al cliente de los proyectos. Costos (de existir) de derechos de proyectos. Pagos por derechos de aprobaciones locales.
- Costos financieros: para el desarrollo, construcción y financiamiento del sistema fotovoltaico.
- Margen: para la empresa o empresas desarrolladoras del proyecto y construcción del sistema fotovoltaico, incluyendo ganancias, riesgos, finanzas, servicios al cliente, aspectos legales, recursos humanos, rentas, suministros de oficina, gastos de servicios profesionales corporativos y de matrículas de transporte.

El resto de costo soft se comporta según el siguiente gráfico de la Fig. 11:



Fig. 11. Otros costos soft (sin incluir instalación).

El costo soft total

Es el resultado de sumar los costos *soft* de instalación + el resto *soft*, el objetivo con respecto a Cuba sería realizar todas las erogaciones y gastos realizarlo en CUP. Actualmente es muy difícil hacer el cálculo de estas inversiones, pero la diferencia es que la erogación en MLC sería mucho menor que la del *hardcost*,

Costos de capital

Con la disminución de los costos del sistema fotovoltaico, sobre todo los *hardcost*, la componente de costos de capital se ha convertido en uno de los factores de mayores costos de las instalaciones fotovoltaicas.

En la figura 12 [Clean technical, 2014], se plantea la influencia de los porcentajes habituales del *Weighted average cost of capital* (WACC), con tasas de intereses de 5 %, 7,5 % y 10 % que origina sobre el porcentaje de todo el costo final de la instalación. En la figura se aprecia que 5 % del costo total del sistema FV de WACC origina 33 %, y un WACC de 10 % origina costos mayores que el resto de todos los demás costos *hard* y *soft* juntos.

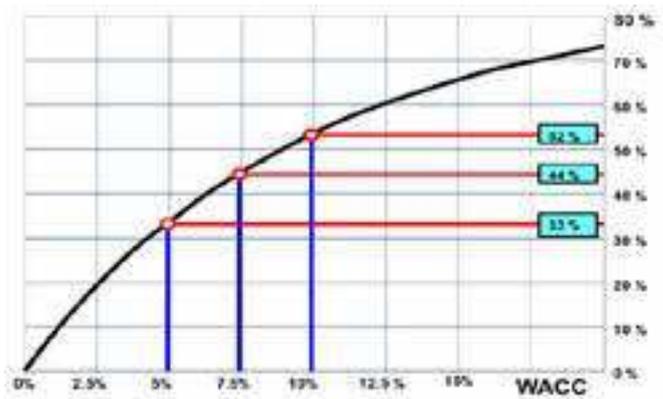


Fig.12. Costos de capital.

Aporte del WACC al costo del sistema fotovoltaico [Clean technical, 2014]. Fuente: Clean technical. 2014/Solar power costs headed toward 4¢/kWh. Oct. 2014.

Es evidente que es al costo de capital un problema dominante donde se requiere la necesidad de disminuir al máximo posible en las inversiones el porcentaje del WACC, que exige realizar un profundo análisis de las variantes existentes con la concurrencia de especialistas en economía en el tema en cuestión.

Influencia de la radiación solar en el costo del kilowatt hora fotovoltaico

Suponiendo que para una radiación solar de 2400 kWh/m²/año se logre un rango de costos entre 2 centavos de USD/kWh y 5 centavos de USD/kWh, y que para todos los intervalos de radiación solar se mantenga igual costo del kWp FV en USD, en la figura 13 se muestra el aumento del costo del kilowatt hora para menores niveles de radiación solar. Es importante señalar que realmente la curva representada se aplana algo, debido a una menor pérdida de eficiencia de las celdas fotovoltaicas con la disminución de la temperatura ambiente a menores niveles de calentamiento solar de los módulos.

La diferencia de costos para instalaciones similares en distintos países también influye en esos rangos. Aproximadamente, para Cuba, el encarecimiento podría estar en alrededor de 1 centavo de USD/kWh.

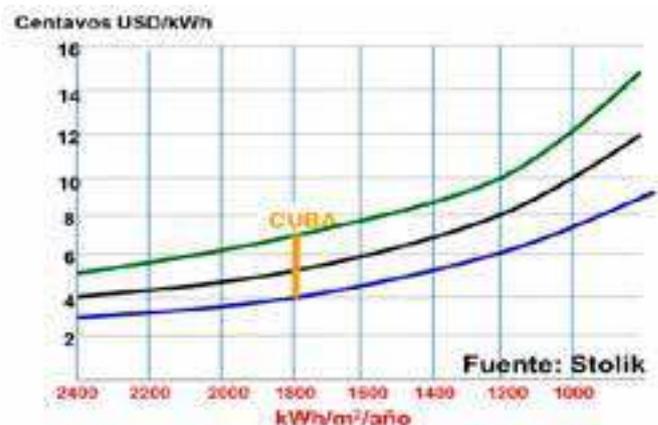


Fig.13. Influencia de la radiación solar en el costo del kilowatt hora fotovoltaico.

Conclusiones

Los costos FV divergen notablemente por sectores y por países.

Los costos en PPA, corresponden a la variante de compra venta de kWh FV inyectado a red, con financiamiento total de inversionistas extranjeros, los records en algunos lugares llegan a 2 centavos de USD por kWh, pero en Cuba de acuerdo con sus características, sobre todo de «país riesgo», debido fundamentalmente al bloqueo de los EE.UU, que impone un alto WACC, los cálculos del autor ubican convenir actualmente el pago de aproximadamente en unos 6 centavos USD /kWh.

La variante PPA permite una erogación paulatina en pago por kWh al inversionista extranjero, pero es más cara que asumir la inversión con desarrollo nacional.

De asumir toda la instalación FV por Cuba, la inversión en divisas se haría solamente para las componentes *hard* (módulo, inversor, cables, estructuras), aprovechando la oportunidad de los bajos costos, aunque con el reto presente de la falta de liquidez del país.

Por otra parte, asumir todo el *softcost* en moneda nacional, el rango de erogación correspondiente en divisas, teniendo en cuenta el nivel de radiación solar promedio, estaría actualmente entre 1,5 y 2,7 centavos de USD/kWh. El costo *soft* se afrontaría fundamentalmente en moneda nacional y no en divisas, proceso también que presenta el reto de hacerlo con buenas prácticas.

Todos los pronósticos señalan que la FV continuarán disminuyendo paulatinamente los costos FV. Mientras que los combustibles fósiles están destinados a continuar su aumento. Ambos comportamientos tributan con el tiempo a un mayor costo evitado fósil que propiciara el autofinanciamiento FV, tema que se aborda en [Stolik, 2019].

Referencias bibliográficas

- «Cleantechica.com/2014/ Solar Power Costs Headed Toward 4c/kWh». Oct. 2014.
- IEA (2013). «Assessing the economic value of new utility-scale electricity generation projects». July, 2013.
- IEA (2017). «Levelized cost and levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy outlook». April, 2017.
- IRENA (2019). 2016.
- LAZARD (2019). «Levelized cost of energy». Version 13.0.
- PVinsights (2020). En <http://pvinsights.com/ES/All Solar PV Price>. Enero 2020.
- SEÑAL FV (2016). «Los costos *Hard* y *Soft* “Utility” por países». En *Señal FV*, no. 35. Sept. 2016. UNE.
- SEÑAL FV (2018). «La FV al comienzo de 2018». En *Señal FV*, no. 53. Enero, 2018. UNE.
- SEÑAL FV (2018a). «Costos kWh FV vs. fósil en 2018. 2da parte. En *Señal FV* # 57. Enero 2018. UNE.
- STOLIK D. (2012). «100 Preguntas y respuestas sobre la energía fotovoltaica. 1ra parte». En revista *Energía y Tú*. 2012, (58) (abril-junio). La Habana: Ed. Cubasolar.
- STOLIK D. (2012a). «La energía fotovoltaica». En revista *Energía y Tú*. 2012, (59) (julio-septiembre). La Habana: Ed. Cubasolar.
- STOLIK D. (2016). «La impresionante evolución del costo del kilowatt hora fotovoltaico». En *Señal FV*, no. 18, junio, 2016. UNE.
- STOLIK, D. (2016a). «Cálculo del Costo del kilowatt hora fotovoltaico». En *Señal FV*, no.26. Boletín *Gestión del conocimiento*. UNE. Junio, 2016.
- STOLIK, D. (2019). *Energía FV para Cuba*. La Habana: Ed. Cubasolar.
- WIKIPEDIA (s/a) En https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source
- «New business models for PV international markets». Agosto, 2014.p 20.

PRINCIPALES IMPACTOS DEL MANEJO INTEGRADO DEL RECURSO AGUA EN LA EMPRESA DE ACEROS INOXIDABLES DE LAS TUNAS (ACINOX LAS TUNAS)

Por **M. Sc. Victoria Serrano Pérez***

* Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas (ACINOX)

E-mail: victoria@acinoxtunas.co.cu

Resumen

Este trabajo se desarrolló en la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas (ACINOX Las Tunas), perteneciente al Ministerio de Industria donde se realizó un diagnóstico de la situación del recurso agua. Fueron identificados efluentes, aspectos ambientales, impactos, aplicación de producciones limpias en la siderurgia. Ha sido diseñada la Estrategia para la mejora continua, que abarca la evaluación de esta gestión con su impacto en lo social, económico y ambiental para prevenir la contaminación.

Palabras clave: Manejo del recurso agua, gestión del agua.

MAIN IMPACTS OF INTEGRATED WATER RESOURCE MANAGEMENT IN THE LAS TUNAS STAINLESS STEEL COMPANY (ACINOX LAS TUNAS)

Abstract

This work was carried out at the Las Tunas Stainless Steel Company (ACINOX Las Tunas), belonging to the Ministry of Industry where a diagnosis of the water resource situation was made. Effluents, environmental aspects, impacts, application of clean productions in the steel industry were identified. The Strategy for continuous improvement has been designed, which covers the evaluation of this management with its social, economic and environmental impact to prevent pollution.

Keywords: Water resource management, water management.

Introducción

La Empresa ACINOX Las Tunas cuenta con un Sistema Integrado de Gestión, con una política y estrategia dirigida a la prevención con la finalidad de producir un acero más seguro y saludable. Se muestran algunas de las acciones desarrolladas en función de prevenir, y mitigar la contaminación ambiental y gestionar adecuadamente este recurso vital para nuestra existencia.

Se diseñó una estrategia ambiental encaminada a: aprovechamiento económico de los residuales sólidos, reducción de la carga contaminante, manejo de productos químicos, manejo sostenible de los recursos hídricos, manejo sostenible de los recursos forestales, producción más limpia y educación ambiental, encaminada a evitar:

deterioro de las condiciones ambientales de la atmósfera, contaminación de las aguas terrestres, degradación de los suelos y deforestación, afectaciones a la capa de Ozono, y enfrentamiento al cambio climático. Se identificaron los aspectos y evaluaron los impactos.

La Producción Más Limpia (PML) es una práctica empresarial aplicable a cualquier tipo de empresa o sector de la producción y los servicios, que tiene como fin incrementar la productividad y las utilidades económicas, mediante el uso óptimo del agua, portadores energéticos, materias primas e insumos por unidad de producto o servicio, minimizando al mismo tiempo la generación de residuos y los costos inherentes a su manejo (recolección, tratamiento y disposición final de los mismos).

Objetivo general

Lograr la identificación de los efluentes contaminantes de las aguas en la Empresa ACINOX Las Tunas y sus aspectos ambientales, estableciendo un Plan de Acción para su minimización, así como la verificación de los resultados y trazar la Estrategia para la mejora continua.

Objetivos específicos

- Tener un enfoque integral de los problemas ambientales que tienen una implicación directa en la contaminación de las aguas, definiendo sus efluentes y sus aspectos ambientales.
- Aplicar las tecnologías de producción más limpias para mejorar la Gestión Ambiental, disminuyendo con estas la contaminación por estos conceptos.
- Establecer un Plan de Acción para prevenir y mitigar los contaminantes que generamos en cuanto a:

Contaminación de las aguas.

- Determinar las enfermedades que se pueden manifestar por la exposición a los factores nocivos que se generan en el ambiente.
- Identificar las afectaciones de este riesgo en el colectivo de ACINOX y en su patrimonio.
- Exponer las medidas de ahorro del agua llevadas a cabo por la entidad, evaluando su impacto social, económico y ambiental.

Desarrollo

Como se plantea en uno de los objetivos de desarrollo sostenible, el Objetivo 12 (Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles), el consumo y la producción sostenibles consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la eficiencia energética, infraestructuras sostenibles y facilitar el acceso a los servicios básicos, empleos ecológicos y decentes, y una mejor calidad de vida para todos. Su aplicación ayuda a lograr los planes generales de desarrollo, reducir los futuros costos económicos, ambientales y sociales, aumentar la competitividad económica y reducir la pobreza.

El objetivo del consumo y la producción sostenibles es hacer más y mejores cosas con menos recursos, incrementando las ganancias netas de bienestar de las actividades económicas mediante la reducción de la utilización de los recursos, la degradación y la contaminación durante todo el ciclo de vida, logrando al mismo tiempo una mejor calidad de vida. En ese proceso participan distintos interesados, entre ellos empresas, consumidores, encargados de la formulación de políticas, investigadores, científicos, minoristas, medios de comunicación y organismos de cooperación para el desarrollo. También es necesario adoptar un enfoque sistémico y lograr la cooperación entre los participantes de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final. Consiste en involucrar a los consumidores mediante la sensibilización y la educación sobre el consumo y los modos de vida sostenibles, facilitándoles información adecuada a través de normas y etiquetas, y partici-

pando en la contratación pública sostenible, entre otros.

Principios en que se sustentan la gestión y la Política Ambiental de ACINOX Las Tunas

- El reconocimiento de la Gestión Ambiental con una mejora continua como una de nuestras prioridades.
- Promover el ahorro de energía y el consumo de agua con un adecuado manejo de estos en cada una de las actividades, así como recursos de todo tipo, materias primas e insumos.
- Reducir los impactos ambientales de nuestros procesos durante todas sus etapas.
- Cumplir la legislación ambiental aplicable.
- Promover y desarrollar una cultura en los trabajadores para que actúen de forma ambientalmente responsable.
- Establecimiento de una política de compras de recursos amigables con el medio ambiente.
- La identificación y evaluación de los aspectos e impactos ambientales en cada uno de las actividades y procesos vinculados a la empresa.
- Fijar y revisar anualmente nuestros objetivos y metas ambientales de modo que den respuestas a la presente política.

El trabajo ha estado encaminado a:

- Aprovechamiento económico de los residuales sólidos.
- Reducción de la carga contaminante orgánica e inorgánica.
- Manejo de productos químicos.
- Manejo sostenible de los recursos hídricos.
- Manejo sostenible de los recursos forestales.
- Producción más limpia.
- Educación ambiental.

Se identificaron los principales aspectos e impactos ambientales en los que incide la Empresa ACINOX Las Tunas y se estableció un programa ambiental para dar cumplimiento a la política ambiental del país, del ministerio, y el territorio: la Estrategia de nuestra empresa está encaminada a evitar:

- Deterioro de las condiciones ambientales de la atmósfera.
- Contaminación de las aguas terrestres.
- Degradación de los suelos y deforestación.
- Afectaciones a la capa de Ozono.
- Deterioro de las condiciones ambientales de la atmósfera.
- Enfrentamiento al cambio climático.

En cuanto a la gestión del recurso agua, existen diversas fuentes que pueden propiciar su contaminación:

1. Aguas residuales (desoxigenación del agua) por Agentes infecciosos.

2. Nutrientes vegetales (al descomponerse, agotan el oxígeno disuelto y producen olores desagradables).
3. Sustancias radiactivas (residuos producidos).
4. Productos químicos detergentes, y sustancias tenso activas.
5. Petróleo, vertidos accidentales.
6. Sedimentos por partículas del suelo y minerales arrastrados por tormentas y escorrentías.

Por ello se identificaron los efluentes contaminantes:

1. Aguas albañales.
2. Aguas residuales.
3. Residuos sólidos.
4. Residuos radioactivos.
5. Productos químicos tóxicos y peligrosos.
6. Emanaciones arrastradas por aguas escorrentías.

A partir de estos elementos se identificaron aspectos que podían provocar afectaciones físicas, químicas, bacteriológicas y microbiológicas al recurso agua como:

1. Derrames de fuel oíl provenientes de las operaciones de descarga de fuel oíl en las estaciones de fuel oíl en ambos laminadores, así como fallas en las válvulas de quemadores de calentamiento de cazuelas, tanques de suministro diario de P. Cal y del Taller de Laminación y deterioros en tuberías.
2. Reparaciones y labores de engrase y lavado del transporte automotor y ferroviario.
3. Residuos de los polvos de humos y procesos de extracción de los residuos de la planta de tratamiento de Humo y acería y de esta hacia la zona del Relleno sanitario.
4. Productos químicos lanzados al alcantarillado sin previo proceso de tratamiento.
5. Procesos de análisis químicos en laboratorios.
6. Reenvase de productos en los almacenes.
7. Emanaciones y salideros de ácidos en la Planta de tratamiento de agua (gases de ácido clorhídrico y sosa cáustica desde los tanques de almacenamiento y durante su manipulación).
8. Procesos de limpieza en la Acería.
9. Descomposición de las basuras y desechos de alimentos no ubicados adecuadamente en supiadero.
10. Deterioro de conductoras de combustibles por el envejecimiento y corrosión y que estaban soterradas.
11. Procesos de limpieza de los decantadores.
12. Deterioro de la cisterna TR3 de los residuos de los intercambiadores iónicos de la planta de agua.
13. Depósitos de áridos y materiales de la construcción en los alrededores de las plantas.

Partiendo de la contaminación de las aguas puede traer las consecuencias siguientes:

1. Trastorno diarreico agudo, así como lesiones en el hígado y los riñones.
2. Agotamiento del oxígeno en el agua.
3. Produce un crecimiento anormal de las plantas

4. Precipitación de Carbonato de calcio en las aguas duras.
5. Problemas estética, como mal sabor y olor del agua, y un cúmulo de algas o verdín que resulta estéticamente poco agradable
6. La presencia de nitratos (sales del ácido nítrico) en el agua potable puede producir una enfermedad infantil que en ocasiones es mortal.

La entidad se propone e implementa una estrategia de prevención de la contaminación, ahorro de este preciado líquido y acciones para su adecuada gestión.

- Se identificaron los aspectos ambientales y evaluaron los impactos en las áreas de trabajo.
- Establecimiento de un indicador del sistema de gestión ambiental como índice de consumo de agua m³/t.
- Estrategias de logística verde con la inclusión de la protección ambiental en las relaciones contractuales y laborales en ACINOX Las Tunas.
- Medidas para mitigar la huella ecológica, con el uso de residuos peligrosos (aceites usados) como combustible para incrementar la eficiencia energética y como conservación en condiciones de seguridad. En los últimos siete años representa unas 144,935 t como combustibles y 4,245 t para la conservación, que representan un ahorro de 154,259 t de combustible convencional y de 86 407,48 USD a precio de la tonelada de combustible.
- Modificaciones en las torres de enfriamiento para lograr mejor calidad, uso, temperatura del agua, así supresión de pérdidas.
- Construcción y seguimiento al estado de los pozos de la entidad para enfrentar sequías.
- Alternativas de fuentes abasto, conductora desde la presa El Cornito, como fuente de abasto a la entidad.
- Sustitución de productos nocivos y aplicación de P+L.
- Restablecimiento sistemas de ciclo sucio.
- Mantenimiento a redes y sistemas, y sustitución de bombas y rehabilitación torres de enfriamiento.
- Aprovechamiento de aguas residuales y de desechos.
- Aprovechamiento de aguas pluviales.
- Disposición adecuada de desechos comunales y productivos.
- Establecimiento de índices de consumo.
- Acciones de formación y capacitación.
- Interconexión de cisternas.
- Niveles en tanques, cisternas, otros.
- Sistema de residuales 200 T.
- Reciclaje de aceites usados.
- Evacúan los desechos de escoria y polvos de la entidad en el relleno sanitario con su licencia ambiental correspondiente.
- Repararon los supiadero de ambos laminadores.
- Se construyó un sistema de residuales para evitar la emanación de los desechos al medio ambiente y la contaminación.
- Reparación de las juntas de los intercambiadores iónicos de la planta de agua y su sustitución.
- Conexión de las cisternas para asumir el agua de reboso y no permitir que se derramara, logrando reci-

clar toda la misma ya sea la proveniente de las instalaciones de la acería como las que se vertían por los deterioros en las juntas de los intercambiadores.

- Se rehabilitó el sistema de tratamiento de agua del taller de Laminación 200T y se colocó bandejas colectoras y se levantó el muro de contención para evitar derrames de fuel oíl hacia esta zona y recuperar el agua para el ciclo de enfriamiento de la planta.
- Se repararon y diseño un sistema de conexión en las estaciones de combustibles para evitar derrames de hidrocarburos.
- Se impermeabilizó la zona de la pista de combustible para evitar el paso de los mismos al manto freático.
- Se colocaron las nuevas 300 juntas evitando el derrame, así como se conectó el sistema a las cisternas directamente para reutilizar el agua.
- Se hermetizó la carreta de humos para evitar los derrames de polvos que a través de las aguas de escurrías provocaban una afectación al manto freático.
- Reparación de los muros de contención de las estaciones de fuel oíl del tanque diario del taller de Laminación y de la acería.
- Solucionaron los salideros de los paneles del Horno de Arco Eléctrico evitando derrames.
- Se colocaron tanques de ácido de material más resistente modificando la estación del mismo.
- Se reparó la campana de extracción del laboratorio mejorando su hermeticidad y se conectó la trampa de sus desagües al alcantarillado
- Se tienen identificado las sustancias peligrosas y nocivas y poseen sus correspondientes tarjetas de peligrosidad brindando adecuado tratamiento para no verterlas al manto freático.
- Se han impartido conferencias sobre desechos para el conocimiento de estos riesgos y su ubicación correcta, así como su adecuada disposición para evitar la contaminación del suelo y las aguas.
- Se construyó el sistema de residuales del laminador 200T que se vertía a cielo abierto sus residuos y su inclusión en sistema de mantenimiento.
- Se disponen adecuadamente los residuos de escoria y polvos en el Depósito para estos desechos aprobados con la licencia ambiental correspondiente.
- Se extraen los desechos de las áreas de trabajo, así como los supiadero de ambos laminadores se hermetizaron y adecuaron con un revestimiento de lozas antiácidas.
- Se han construido trampas de recolección de combustibles.
- Se colocaron pisos, bandejas colectoras, muros de contención a las estaciones y locales de lubricantes y se reúsan los mismos para evitar sus derrames inadecuadamente.
- Se modificó la estación del lavador engrasador de transporte y se han realizado limpiezas periódicas de las trampas y canales de evacuación de las aguas.
- Se construyó la tubería nueva de suministro de fuel oill a la Acería.
- Se construyó sistema de recolección de agua en la zona inferior de la zona de reparación de artesas interconectándola al decantador vertical.
- Adecuada gestión de residuos.
- Planes de manejo de sustancias peligrosas y no peligrosas.
- Solicitud de Licencias ambientales y verificación de su cumplimiento mensual y chequeo como indicador. (Licencia Nro. 3/2006 Sobre la ampliación del relleno sanitario y Lic.3/2010 Sobre los aceites usados).
- Nombramiento por resolución al representante de la Ley 1288/75 Resolución 49/2010.
- Firma de contratos de suministro de residuos para el reciclaje con ERMP y Convenios de Cooperación con otros gestores para la gestión de residuos.
- Balance del uso de aceites usados, y la Inspección sobre cumplimiento de requisitos legales.
- Verificación en los Consejos de Seguridad y Salud y Medio Ambiente, del cumplimiento del programa ambiental, de los objetivos, metas y acciones ambientales y cálculo de indicadores y verificación de la eficacia del sistema.
- Actualización del inventario de fuentes contaminantes generadoras de residuales líquidos, residuos sólidos y emisiones a la atmósfera, sustitución de productos nocivos por productos ambientalmente seguros, tanto en el tratamiento de agua como inhibidores de la corrosión, antincrustantes y pasivos de hierro, sustituyéndolos por una gama de productos como poli electrolito, controladores microbiológicos, antincrustantes, alguicidas (biodegradables).
- Acciones de capacitación a cuadros sindicales, y a directivos de diferentes niveles para prevenir la contaminación y cooperación con las universidades en esta materia.
- Monitoreos ambientales de gases y partículas con estudios de evaluación de la contaminación atmosférica (emisiones y modelación) realizado por el Centro de gestión de la información y Desarrollo de la Energía (Cubaenergía), así como las aguas tanto aguas arriba y abajo del relleno sanitario como las residuales por la Empresa Nacional de Servicios Técnicos UEB Las Tunas.

Impacto social, económico y ambiental

- Eliminación de focos donde pueden proliferar vectores, evitando enfermedades, y la contaminación de aguas, suelo y la generación de gases que inciden en el efecto invernadero.
- Contribución a la paisajística de la entidad.
- Disminución de los costos como indicador condicionante y específicos para el sistema de estimulación de varias áreas permitiendo estimular en CUC al colectivo de trabajadores.
- Disminución de barreras que limitaban el paso frente a emergencias y averías para más rápida y efectiva evacuación.
- Mejor imagen frente a la comunidad y clientes.
- Mejor imagen y entorno laboral.
- El reciclaje con la ERMP representa un ingreso a la entidad de 36 082,58 pesos y de 2036,52 cuc desde el 2010 por la venta a ERMP con un Impacto en la susti-

- tución de importaciones por la venta de lo aportado en el reciclado según precios de DESEQUIP un total de 185 556,591 USD.
- Reutilización de chatarra interna con la repercusión por evitar la acumulación en la superficie, contaminación de las aguas y el suelo, impacto visual y riesgo biológico de un total de 30 911,815 t con un impacto por dejar de comprar chatarra de 2 313 157,35 CUC.
 - Respecto a los polvos y humos, se logra que 25 644 t en los últimos seis años, se disponen adecuadamente en el Relleno Sanitario y hacia otros gestores (Mantenimiento constructivo, e Industrias locales Pinar del Río).
 - En cuanto a la Escoria, se ubican adecuadamente 80 698 t en los últimos seis años en el Relleno Sanitario, y los Residuos sólidos urbanos en el vertedero municipal y otros gestores a través de Convenios de Cooperación, gestionándolos con el Plan de manejo.
 - Al aprobarse en el objeto social la venta de los residuos de escoria permitió ingresos a la entidad tanto a empresas como trabajadores: 2015 por 9020,00 pesos; en 2016, 560 252,440 pesos por venta a trabajadores, así como 25 102,950 pesos por venta a empresas y cooperativas.
 - Utilización de residuos de cal en la construcción y como agente microbiológico, en la estrategia de sostenibilidad, así como neumáticos no recuperables para larvi trampas.
 - El consumo de agua se logra una reducción de 0,93 m³/t en estos últimos seis años, con el Programa de Ahorro de Agua, la recirculación a través de un ciclo sucio de las aguas residuales de la acería y en el laminador 200T, utilización de aguas pluviales, minimizar consumo realizando extracción de fondo de las cisternas, etc.
 - Se elimina el vertimiento del Residual fotográfico vertido a medio ambiente en 7.5 litros / año y la sustitución de polvos de coberturas por ceniza de paja de arroz, disminuyendo 374,66 cuc/ton ya que se adquiriría a 400 cuc/ton.
 - Sustitución de baterías de ácidos por alcalinas, eliminación del sacarle y adecuado manejo de las baterías evitando la contaminación por plomo de las baterías, el electrolito ácido de las baterías de plomo o el aceite dieléctrico con bienios poli clorados de transformadores y condensadores, así como dioxinas y foranos al medio ambiente.
 - Se depositan adecuadamente los desechos sólidos tanto de la producción directa, así como los desechos comunales brindando adecuado tratamiento en los supiadero y áreas de disposición final.
 - Se eliminó el vertimiento de fuel oíl al manto freático con el montaje de la nueva conductora de suministro a la estación de fuel oíl de la Acería.
 - En el Laminador 200T se ha logrado rehabilitar las piletas con una utilización del agua para el enfriamiento de los sistemas.
 - Se trabaja en la recolección del guijo y el lubricante del sistema de hidrobarrido y el reúso como combustible en el tanque diario del 200T.
 - Sustitución del Bicromato de potasio cancerígeno y nocivo para la salud y el ambiente por VAPEN producto biodegradable con un ahorro de divisas y con un impacto importante para la salud y el ambiente, así como productos de la Firma PISCIS, representando un ahorro de 840 USD/t.
 - Recuperación de los desechos de las pruebas de laboratorios alrededor de 7 litros por año.
 - Se eliminó el vertimiento de polvos con la hermetización de la carreta de humo y la extracción de los desechos hacia la zona del relleno sanitario.
 - Reutilización de chatarra interna con la repercusión por evitar la acumulación en la superficie, contaminación de las aguas y el suelo, impacto visual y riesgo biológico de un total de 30 911,815 t con un impacto por dejar de comprar chatarra de 2 313 157,35 CUC.
 - Ahorro de 9855,50 CUC por la recirculación de agua y la puesta en funcionamiento de los ciclos sucios de las plantas, y la utilización de productos biodegradables y ecológicos.
 - Se dejó de verter los desechos hidra sanitarios al ambiente con el sistema de residuales del 200T, interconectando el sistema a la red de alcantarillado.
 - Al reciclar 1,2 t de papel y cartón, se obtienen una tonelada de pulpa virgen, ahorrándose talar de 15 a 17 árboles de diez años de vida, 65 % de la energía (electricidad y petróleo), 82 % del agua, y 92 % de la contaminación.
 - Se incrementa el conocimiento, la sensibilidad y disposición al cambio de los trabajadores en las diferentes categorías ocupacionales.
 - Uso racional de las materias primas y productos (inventario, almacenamiento y manejo adecuado de los materiales utilizados).
 - Actualización del inventario de fuentes contaminantes generadoras de residuales líquidos, residuos sólidos y emisiones a la atmósfera, como parte del programa de lucha contra la contaminación.
 - Monitoreo de emisiones a la atmósfera por debajo de las normas cubanas de calidad del aire en la Planta de tratamiento de Humos, Planta de Cal y taller de laminación, realizados por entidades competentes como el Centro de Gestión de la información con su grupo de estudio de impacto ambiental, así como los monitoreos de agua con la ENAST.
 - Ubicación de los polvos y escoria en el Relleno Sanitario, aprobado con su Licencia ambiental, Lic. Nro3/2006 Ampliación Relleno Sanitario para escorias y polvos de la producción de aceros y su reutilización con varios gestores a través de convenio de cooperación.
 - Cumplimiento de la Licencia Ambiental (Aceites usados), para almacenamiento temporal, como combustible en la Planta de Cal y Laminador 200T y para la conservación del equipamiento en condiciones de seguridad; dicha licencia es la Nro. 03/2010.
 - Sustitución de baterías de ácidos por alcalinas, eliminación total del sacarle de las instalaciones de la entidad, y adecuado manejo de las baterías en coordina-

ción con materias primas. Evitando la contaminación por plomo de las baterías, el electrolito ácido de las baterías de plomo o el aceite dieléctrico con bienios poli clorados de transformadores y condensadores, así como dioxinas y furanos al medio ambiente.

Conclusiones

Con la realización de este trabajo investigativo arribamos a las conclusiones siguientes:

- Los efluentes contaminantes generados por la empresa tienen un gran impacto en todos los aspectos del medioambiente (Hombre-Naturaleza), y se evidencian en el contenido de este trabajo.
- Constituye una herramienta de trabajo valiosa para la dirección de la empresa ACINOX Las Tunas.
- La empresa ACINOX Las Tunas ha elevado su conciencia ambiental demostrada en los resultados de este trabajo.
- La aplicación de las producciones más limpias constituye la opción más inteligente de la industria cubana actual para lograr alcanzar el desarrollo sobre bases sostenibles, por lo que constituye un reto para dar cumplimiento a las medidas emanadas de este trabajo y que se abarcan en la Estrategia Ambiental.
- La gestión ambiental constituye un factor estratégico de competitividad.
- Para lograr el cumplimiento del plan de acción de la Estrategia Ambiental se requiere no solo de recursos humanos y financieros sino voluntad política para así obtener y mantener la Certificación o Reconocimiento Ambiental.
- Es generalizable para cualquier planta con la visión de la aplicación de producciones más limpias.
- Permitió alcanzar el Premio Nacional de medio ambiente en el 2007, la Distinción ambiental provincial y el Reconocimiento Ambiental durante cada uno de estos años como parte de la Gestión de Recurso Agua.

Bibliografía

- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR (2002). «Constitución de la República de Cuba».
- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR (1997). «Ley 81 de medioambiente. Cuba».
- BETANCOURT PINEDA, L, ET AL. (2000). «Gestión ambiental empresarial. Metodología para la realización de una revisión medio ambiental inicial». Centro de Información y Gestión Tecnológica (CIGET) Cienfuegos.
- CARRETERO PEÑA, A. (2007). «Aspectos Ambientales. Identificación y Evaluación». 2007, España: AENOR Ediciones.
- CASTRO RUZ, FIDEL (2003). «V Congreso del Partido Comunista de Cuba, octubre 6 de 1997». En *Capitalismo Actual. Características y contradicciones. Selección Temática 1991-1998*. Ciudad Habana: Edit. Ciencias Sociales.
- CEPAL – ILPES (2004). «Indicadores de desarrollo sostenible para América Latina y el Caribe. Curso – taller». Buenos Aires. Documento digital en CD-ROM.
- CEPAL (2011). «Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe». División de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: www.eclac.org/publicaciones/xml/6/45206/RVE105Completa.pdf
- CITMA & CIGEA (2006). «Metodología para la ejecución de los diagnósticos ambientales y la verificación del cumplimiento de los indicadores establecidos en la resolución CITMA 135/2004 para la obtención del reconocimiento ambiental nacional (RAN)». La Habana.
- CONSEJO DE MINISTROS (2017). «Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático (Tarea Vida), 25 de abril de 2017». La Habana, Cuba.
- FERNÁNDEZ IRIBAR, M. (2006). *El problema del medio ambiente en el mundo y en Cuba*. La Habana: Editora Universitatis.
- GRUPO DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (2016). «Objetivos de desarrollo sostenible». Disponible en: [//www.undp.org/cont/undp/es/home/sustainable-development-goals.html](http://www.undp.org/cont/undp/es/home/sustainable-development-goals.html)
- ISAAC GODÍNEZ, C. L. (2004). Modelo de gestión integrada calidad-medioambiente (CYMA) aplicado en organizaciones cubanas (Tesis doctoral). Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. La Habana.
- ISAAC GODÍNEZ, C. L. (2007). *Herramientas de Gestión ambiental Organizacional. Serie de cuadernos de Ingeniería Industrial. Actualización y nuevas tendencias*. Universidad de Carabobo, Venezuela.
- ISAAC GODÍNEZ, C. L. (2011). «Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental de los Centros de Educación Superior (CES)».
- LLOYD’S REGISTER QUALITY ASSURANCE (2002). «El enfoque de proceso para los sistemas de gestión». Portador digital. Traducido por J. B. Madrigal de LRQA Review.
- MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE (2007). «Estrategia Ambiental Nacional (2007). EAN 2007/2010. Anexo único de la Resolución No. 40 / 2007». La Habana.
- MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE (2008). «Programa Nacional de lucha contra la contaminación del Medio ambiente 2008 – 2015». La Habana.
- MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE (2011). «Estrategia Ambiental Nacional 2011- 2015». Disponible en: www.medioambiente.cu
- MURIEL FORONDA, R. D. (2006). «Gestión ambiental». *Revista Ide@ sostenible*, Año 3 No. 13. Universidad de Antioquía, Colombia. Disponible en: [HTTPS://idea.unal.edu.co/public/publicacac_revGA.htm](https://idea.unal.edu.co/public/publicacac_revGA.htm)
- NÚÑEZ, G. (2003) «La responsabilidad social corporativa en un marco de desarrollo sostenible». Santiago de Chile. CEPAL.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NC-ISO 14001(2015). «Sistemas de Gestión Ambiental-Requisitos con orientación para su uso». Tercera edición. 2015-09-15. LA Habana.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN NC-ISO 14044 (2009). «Gestión Ambiental— Análisis del ciclo de vida —Requisitos y directrices (Referencia ISO 14044:2006, IDT)». La Habana.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN NC-ISO (2004). NC-ISO 14001. Sistemas de Gestión Ambiental, Requisitos con Orientación para su Uso. La Habana.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (1992). «Informe de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo». Brasil. Disponible en: http://www.medioambiente.cu/declaracion_de_rio_1992.htm
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (2002). «Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, Johannesburgo (Sudáfrica), 26 de agosto a 4 de septiembre de 2002». Cap.

1, resolución 2 Documento de la Comisión de Educación y Comunicación (CEC) de la UICN sobre la Década de las Naciones Unidas de la Educación para el Desarrollo Sostenible. UNESCO.

ORMAZABAL, F. J. Y. L., E. (1999). «Guía de indicadores medioambientales para la empresa». Berlín, 30-48.

PARTIDO COMUNISTA DE CUBA (2016). «Actualización de los lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución para el periodo 2016 2021 aprobados en el

7mo congreso del Partido en abril del 2016 y la Asamblea Nacional del Poder Popular en julio del 2016».

PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) (2002). «Perspectiva del Medio Ambiente Mundial. GEO – 3». Nairobi.

Anexos A

Efluentes contaminantes	Antes de la gestión	Resultados de la gestión	Reducción y/o incrementos de la aplicación
Polvos y humo t (últimos seis años)	25 664 t/6 años	0 (100 %)	25 644 t/en los últimos seis años. Se disponen adecuadamente en el Relleno Sanitario y hacia otros gestores (Mtto. constructivo, Industrias locales Pinar del Río)
Escoria t (últimos seis años)	80 698 t/6 años	0 (100 %)	80698 t/en los últimos seis años. Se disponen adecuadamente en el Relleno Sanitario y hacia otros gestores por convenios de cooperación hasta 2015 y la venta a trabajadores y otros gestores a partir del último trimestre
Aceites usados como combustible y como conservación	22,48 t y 0,78 t poco	144,935 t usados como combustibles y 4,245 como conservación en los últimos seis años	Su uso representa unas 154,259 Toneladas de combustibles convencional en estos seis años y ahorro de 86 407,48 USD de acuerdo al precio de la tonelada de combustible
Consumo de agua m ³ /t	1,91	0,98	0,93 m ³ /t Se reduce en los últimos seis años
Almacenes certificados	0	12	100 % de los almacenes certificados
Productos químicos ecológicos	70 %	100 %	100 % (Alguicidas, antincrustantes e inhibidores de la corrosión y pasivos de hierro)
Inadecuada disposición de desechos Sólidos	87 512 Escoria y polvos y Residuos sólidos urbanos	0 (100 %) Disponen de planes de manejo, reutilización y reciclaje	106 342 t se destinan al relleno sanitario, vertedero municipal y otros gestores a través de convenios de cooperación y venta
Índice de consumo de agua m ³ /t acero por diseño y real alcanzado	1,19 m ³ /t año	0,98m ³ /t año últimos años por debajo de lo planificado	0,21m ³ /t año se reduce en los últimos seis años
Residual fotográfico vertido a medio ambiente	7,5 litros / año	0	7,5 litros / año

Anexo B

Utilización de aceites usados y sus impactos
Hasta septiembre 2017

UTILIZACIÓN	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Combustible (t)	22,48	41,703	13,44	18,32	25,324	19,15	4,57	0,83
Conservación(t)	0,78	0,642	0,389	2,18	0,112	0,08	0,04	0,07
Ahorro índice de consumo (kg/t acero)	0,2	0,27	0,19	0,09	0,118	0,216	0,07	0,00
Ahorro índice de consumo (kg/t barras)	0,00	0,45	0,00	0,120	0,368	0,00	0,00	0,034
Ahorro(TCC)	23,26	42,345	13,829	26,06	25,189	19,05	4,526	0,975
Precio (usd/barril)	89,07	95,62	100,00	100,00	80,00	51,83	40,00	49,55
Ahorro (usd)	13 466,49	26 318,69	8988,85	16 939,00	13 100,00	6417,65	1176,8	314,00

Se aprobó en el objeto social la venta de residuos a través de gestores a los trabajadores según Convenio colectivo y a otras entidades que ha permitido un ingreso de:

Ingresos (\$)		
Residuos	2016	2017
Escoria	56 252,44	25 102,950
Polvo Carbonato Calcio	1934,74	2433,60
Cascarilla	0,00	888,00

Ingresos por gestión de residuos (escoria) por venta a trabajadores y empresas			
Años	2015	2016	2017
Ventas (Pesos \$)	9020,000	56 252,440	25 102,950

En cuanto al reciclaje con la empresa de recuperación de Materias Primas se ha ingresado por este concepto:

Ingresos (\$)		
Residuos reciclables con:	2016	2017
Empresa de recuperación de materias primas (ERMP).	15 413,14	16 037,30

Anexo C

Oportunidades de pml identificadas	Situación anterior	Situación actual
Ahorro de agua	No se reciclaba el agua de lluvia y otras aguas del proceso consumo anterior por diseño 1,23 m ³ /t y por plan con nuevos métodos organizativos y soluciones de 1,91 m ³ /t	Se recicla una parte del agua que cae de lluvia conectando lo que proviene de los bajantes de la acería y lo que se colecta conectando hacia una rejilla y de esta hacia el decantador vertical. Se interconectan las cisternas se evacua el agua de los intercambiadores hacia las cisternas, no se pierde el agua por reboso pasa de una a otra y la asume para no derrochar agua, y se estableció con el proyecto del sistema de enfriamiento de la planta de agua y sus nuevas torres permitiendo un Consumo actual de 0,91 m ³ /t
Evaluación del consumo de agua	Se realizaba estimando consumo	Adquisición y puesta en explotación de flujómetros que permite controlar el consumo de agua, y controlar los gastos
Proceso de tratamiento de agua	Se utilizaban alrededor de 70 % de productos ecológicos	Sustitución por la gama de productos en el tratamiento de agua Piscis como controladores microbiológicos antincrustantes, alguicidas y productos ambientalmente seguros (biodegradables)
Manejo integral e egrado del recurso	Se realizaba del decantador vertical hacia la planta de agua directamente, pasando por el espesador de fango, con un índice de consumo de 1,23 m ³ /t según diseño, mantenía gran cantidad de sólidos en suspensión y turbidez	Recirculación a través de un ciclo sucio de las aguas residuales de la acería y hacia el decantador vertical y horizontal logrando realizar una extracción de fondo, reutilizando el agua en el sistema de enfriamiento y volviendo a utilizar el agua, permitiendo una disminución del consumo a 0,80 m ³ /t en los últimos años, además de reducir los sólidos en suspensión en menos de 30 ppm. Se han reciclado en los últimos cinco años 4 610 875 m ³

CONVOCATORIA

XIV Taller Internacional

CUBASOLAR 2020

Del 4 al 8 de mayo de 2020
Cayo Coco, Ciego de Ávila, Cuba



<http://www.cubasolar.cu> <http://www.eventocubasolar.com>

La Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (Cubasolar) convoca a la decimocuarta edición del Taller Internacional CUBASOLAR 2020, a celebrarse en el hotel Playa Paraíso, situado en la cuarta isla más grande del archipiélago cubano, nombrada Cayo Coco, perteneciente a la provincia de Ciego de Ávila.

El evento tiene como objetivo contribuir a la construcción consciente de un sistema energético sostenible basado en las fuentes renovables de energía y el respeto ambiental, propiciar y promover el diálogo e intercambio de experiencias y prácticas entre especialistas y personas interesadas en las temáticas de energía, agua y alimentación, así como en la cooperación y la transferencia de conocimientos y tecnologías.

En el Taller se incluyen conferencias magistrales y talleres, en los que participarán autoridades de gobierno, investigadores, educadores, especialistas, gestores, empresarios, profesionales, productores, usuarios de tecnologías y demás personas que trabajan por la sostenibilidad de nuestro planeta.

Temas centrales del evento

La soberanía alimentaria y las fuentes renovables de energía.

El abasto de agua y las fuentes renovables de energía.

El turismo y las fuentes renovables de energía.

Soberanía energética, medioambiente y desarrollo local sostenible.

Educación, cultura e información energéticas para la sostenibilidad.

Curso taller

Contenido esencial del Taller será el desarrollo de cursos talleres sobre las temáticas de agua, energía y alimentación, asociadas al uso de fuentes renovables de energía, y la educación y comunicación energética y ambiental. El curso se ofrece sin costo adicional, se acredita en coordinación con la Universidad de la provincia sede y se estructura a partir de diferentes formas organizativas que se integran como parte del programa del evento: conferencias magistrales, tres talleres y visitas de campo, favoreciendo un aprendizaje activo que permite la amplia participación y el intercambio sobre las temáticas, y el conocimiento de la experiencia cubana en el actual contexto de desarrollo social y económico del país.

Taller 1: Energización local

- Tecnologías renovables para el desarrollo local.
- Redes energéticas locales.
- Ahorro y eficiencia energética.
- Hábitat inclusivo, sustentable y resiliente.
- Programa de energía sustentable en la Estrategia de Desarrollo Municipal; autoabastecimiento energético municipal con fuentes renovables de energía (FRE).
- El turismo y las fuentes renovables de energía.
- Comunicación y educación energéticas para la sostenibilidad.

Taller 2: Movimientos o Redes de Biogás, agua y saneamiento

- Biogás como fuente renovable de energía, para pequeña, mediana y gran escalas: Incidencia en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y la Tarea vida.
- Aplicación del biol y biosol en los sistemas de producción agroecológicas con FRE.
- Cosecha de aguay tratamiento de las aguas residuales empleando las FRE.
- Uso racional del agua y la energía en armonía con el medio ambiente.
- Saneamiento ambiental y drenaje pluvial en el autoabastecimiento local.
- Vinculación Universidad-Sociedad-Tecnología, para potenciar el empleo del biogás, reúso y la gestión del agua en los sistemas a ciclo cerrados.
- Promoción, comunicación, género, equidad, cultura y jóvenes profesionales, en el contexto de las redes y movimientos relacionados con los temas de biogás, agua y saneamiento ambiental.

Taller 3: Alimentación sostenible: agroecología, resiliencia y consumo responsable

- Soberanía alimentaria y fuentes renovables de energía.
- Biodiversidad, agroecología y resiliencia socioecológica.
- Educación gastronómica y consumo responsable.
- Permacultura, reciclaje, conservación de alimentos y ciclos cerrados.
- Alimentación, salud y nutrición.
- Comunicación, género, equidad, educación y cultura alimentaria, en el contexto de las redes y movimientos de la alimentación buena, limpia y justa.

Los delegados nacionales deben dirigir sus trabajos al correo siguiente:
cubasolar2020@cubasolar.cu.

Los delegados extranjeros deben visitar la página web del evento
<http://www.eventocubasolar.com>

Seguir las instrucciones de la misma para el envío de sus trabajos.

