



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

53



Programa de lucha contra la contaminación. Impactos y experiencias en la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas (Acinox Las Tunas)	1
Modelo de evaluación cualicuantitativa. Urbanismo y vivienda sustentable	27
Evaluación técnico económica y ambiental del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro para la obtención de lupias de arrabio	53
Estudio comparativo de estaciones de prospección eólica, con respecto a la torre de referencia meteorológica de El Ramón, en Holguín	73
Evaluación y reparación del foto sensor de luminaria del alumbrado público en la Ciudad de Camagüey	84
Uso del sifón autocebante en una central hidroeléctrica cubana (Najasa I)	92

Programa de lucha contra la contaminación. Impactos y experiencias en la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas (Acinox Las Tunas)

Pollution Control Program. Impacts and experiences in the Steel mill Company of Las Tunas (Acinox Las Tunas)

*Ing. Victoria Serrano Pérez**

** Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas, Cuba.*

e-mail: victoria@acinoxtunas.co.cu

Resumen

Este trabajo expone los aspectos esenciales de un programa de lucha contra la contaminación que abarca la protección de los suelos, el agua, la atmósfera, la capa de ozono y los recursos naturales, mediante un esquema integrador y con visión estratégica; ello permite su gestión como parte de un sistema integrado, en el cual la responsabilidad individual y colectiva, el seguimiento y la medición de los procesos permite garantizar un desarrollo enfocado hacia la sostenibilidad. Se aseguró que el programa cumpliera las exigencias de la norma ISO 14001-2004 y que organizara el manejo integrado como parte de la mejora, para dar cumplimiento a la Política del Sistema Integrado de Gestión, dando cumplimiento a los lineamientos del Partido. Se aplicaron métodos de análisis de información, y se identificaron y evaluaron los aspectos e impactos ambientales, estableciendo objetivos y metas bajo principios básicos y acciones a realizar, con identificación de los responsables y las fechas de cumplimiento; esto posibilita un seguimiento y medición de los procesos a través del cumplimiento del Programa y el cálculo de indicadores, aplicando opciones de producción más limpia y analizando la eficacia del sistema, partiendo de los impactos favorables para la mejora continua. Se diseñó una gestión de residuos a partir de la reutilización, reciclaje y reúso, así como producciones alternativas, y se exponen los resultados y el impacto en lo social, económico y ambiental.

Palabras claves: Programa, contaminación, impacto ambiental

Abstract

In this paper we discuss the main aspects of the pollution control program that embraces soil, water and, atmosphere protection, as well as ozone layer and natural resources, through an integrating scheme and strategic vision. This allows its management as part of an integrated system, in which the individual and collective responsibility, the monitoring and measurement

of the processes guarantee sustainable development. It was ensured that the program fulfilled the requirements of ISO 14001-2004 and the organization of an integrated management as part of the progress, in order to meet the terms of the Integrated Management System Policy, in agreement with the Party's Guidelines. Information analysis methods were applied, and environmental aspects and impacts were identified and evaluated, establishing objectives and goals under basic principles and actions to be carried out, with identification of those accountable and the dates of accomplishment. This allows monitoring and measuring the processes through compliance with the Program and the calculation of indicators, implementing clean production concepts and analyzing the efficiency of the system, starting from the favorable impacts for continuous improvement. Waste management was designed based on reuse, and recycling, as well as alternative productions, and the results and impact on the social, economic and environmental aspects are exposed.

Keywords: Program, pollution, environmental impact

Desarrollo

La clave del logro del desarrollo sostenible depende en gran medida de la atención a los factores sociales, lo que para Cuba es consustancial con su sistema político y de respeto al medioambiente, en especial, de la real imbricación de las políticas económicas y ambientales en todos los horizontes de planificación, y de la consideración, en esos horizontes, del balance en el uso de los recursos naturales.

El trabajo expone que por la no existencia de un Programa Integral para la lucha contra la contaminación que abarcara todos los elementos, que cumpliera las exigencias de la norma ISO 14001-2004 y que organizara el manejo integrado como parte de la mejora continua para dar cumplimiento a la Política del Sistema Integrado de Gestión y la Estrategia de la empresa Acinox Las Tunas para dar cumplimiento a los Lineamientos del Partido, resultó necesario identificar y establecer criterios metodológicos especializados, que se exponen a continuación:

Cap. 1. Modelo de gestión económica.

Lineamientos generales.

Lin. 07, Cap. V. Política de ciencia, tecnología, innovación y medioambiente.

Lin. 129, Lin: 133; Lin. 1; Lin. 60; Lin 61; Lin. 6; Lin. 135.

VIII. Política industrial y energética.

Lin. 235; Lin. 253, entre otros.

El trabajo se desarrolló en varias etapas con el objetivo de:

Establecer el programa de lucha contra la contaminación en todas las actividades, productos y servicios de la empresa, con el propósito de manejar adecuadamente cada elemento y prevenir la contaminación medioambiental.

Objetivos específicos:

1. Diseñar e implantar un Programa integrador enfocado hacia el desarrollo sostenible.
2. Tener un programa y estrategia de mejora continua para proteger la atmósfera, los suelos, el agua y el aire.
3. Aplicar tecnologías de producción limpias para mejorar la gestión ambiental, disminuyendo la contaminación.
4. Establecimiento de un Plan de Acción para disminuir la contaminación, análisis de sus resultados, su impacto económico y ambiental, así como la estrategia para la mejora continua del proceso productivo.

La permanente imbricación del binomio Economía y Medio Ambiente en el país, es una de las condiciones claves para la consecución del desarrollo sostenible; además, es premisa metodológica del perfeccionamiento del modelo económico cubano

Los conceptos del derecho ambiental precisan:

- Ambiental: capacidad institucional: *cultura de la denuncia poblacional* (se refiere a la respuesta de la población ante sucesos que dañen el entorno).
- Económica: igualdad distributiva en la calidad de vida: *trabajo*.
- Social: participación social en la toma de decisiones: *educación*.

Estas estrategias se encuadran en dos vertientes principales:

- Un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas.
- Un tipo de desarrollo que comulgue con los sistemas económicos y la biosfera, en una relación complementaria.

Aunque la llamada economía verde es una propuesta nacida del interés del gran capital, y pretende ser una vía de salida de la crisis que afecta al modelo económico capitalista, no se deben desaprovechar los conceptos válidos que aporta, y que resultan aplicables dentro del contexto de nuestros intereses nacionales, entre ellos:

- Ahorro.
- Reciclaje, reúso y racionalidad del consumo material.
- Desmaterializar el PIB.
- Uso de las energías renovables.
- Aumento de la eficiencia energética.
- Uso de mecanismos financieros como impuestos, subsidios y créditos verdes.
- Modificación de los patrones de producción y consumo.

La Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas está inmersa en la implantación de un Sistema de Gestión Ambiental siguiendo los requisitos establecidos por la norma NC ISO 14001:2004, en aras de certificar el Sistema Integrado de Gestión y lograr una gestión ambiental planificada y correctamente organizada, que contribuya a alcanzar avances importantes en la conservación del medioambiente, y que permita que la protección ambiental forme parte de su política y eficiencia económica.

Es por ello que la Empresa ha establecido un programa de lucha contra la contaminación, que abarca todos los aspectos en aras de proteger los suelos, el agua, la atmósfera y los recursos naturales, con un enfoque integrador con visión estratégica a largo plazo, que le permita ir gestionando su proceso productivo y la mejora continua su gestión como parte de un sistema integrado, en el que la responsabilidad individual y colectiva, el seguimiento y la medición de los procesos, garanticen un futuro sostenible. Para ello se ha diseñado el Programa y Estrategia de lucha contra la contaminación, con varios aspectos metodológicos que incluyen una Introducción, la Misión y la Visión de la Empresa, los objetivos, la base institucional y los instrumentos para su materialización.

Este trabajo se desarrolló en varias etapas:

- Diagnóstico de la situación ambiental en la Empresa.
- Determinación de los principales efluentes contaminantes y sus efectos para la salud y el medioambiente.
- Aplicación de los nuevos conceptos de producciones más limpias, identificando las opciones y oportunidades.
- Establecimiento de un Programa de Prevención de la Contaminación, con las principales acciones para ello, análisis de sus resultados, su impacto económico, social y ambiental, así como la Estrategia para su mejora continua dentro del proceso productivo.

Principales acciones desarrolladas

1. Diseño de un Programa y Estrategia Integral de Lucha contra la Contaminación, que cuenta con:

Introducción

Misión, visión

Lograr metas superiores en favor del medioambiente, previniendo la contaminación acorde con los objetivos de la Estrategia:

- Definir principios y medidas ambientales de la Empresa.
- Identificar los aspectos e impactos de las diferentes áreas de la Empresa, que inciden en el medioambiente.
- Crear las bases para un trabajo sistemático de protección del medioambiente.
- Buscar soluciones a los impactos ambientales identificados como significativos.

Base institucional

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 las prioridades de la Empresa.
- Promover el ahorro de energía y el consumo de agua mediante su adecuado manejo en cada una de las actividades, así como de recursos de todo tipo, materias primas e insumos.
- Reducir los impactos ambientales en los procesos, durante todas sus etapas.
- Cumplir la legislación ambiental que resulte aplicable.
- Promover y desarrollar una cultura ambiental en los trabajadores para que actúen de forma responsable.
- Establecimiento de una política de compra de recursos amigables con el medioambiente.
- Identificación y evaluación de los aspectos e impactos ambientales en cada una de las actividades y procesos de la Empresa, o vinculados a ella.
- Fijar y revisar anualmente nuestros objetivos y metas ambientales, de modo que den respuestas a la presente política.

Principales aspectos e impactos ambientales en los que incide la empresa Acinox Las Tunas.

Teniendo en cuenta la política ambiental del país, del Ministerio y el territorio, la estrategia de la Empresa está dirigida a enfrentar los problemas siguientes:

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

Otras acciones para la mejora continua y la aplicación de la estrategia ambiental. Instrumentos para materializar la estrategia ambiental

El programa provincial de medioambiente y desarrollo.

La legislación ambiental.

La evaluación del impacto ambiental.

La licencia ambiental.

La inspección ambiental estatal.

La investigación científica y la innovación tecnológica.

La educación y divulgación ambiental.

Los indicadores ambientales para la evaluación del problema y la toma de decisiones.

Sistema de auditoría y mantenimiento.

2. Planes de manejo de sustancias peligrosas y no peligrosas, en los que se encuentran el adecuado manejo de todas las sustancias que se utilizan, y que abarca los aspectos siguientes:

- Introducción
- Objetivo
- Dotar a la Empresa de una guía para el manejo de los residuos, peligrosos y no peligrosos.
- Descripción de las actividades de la empresa e identificación de las unidades generadoras.

Etapa I: diagnóstico de la situación existente.

Condiciones generales de transporte, almacenamiento y estado de los envases.

Etapas II: identificación, selección y aplicación de alternativas de solución.

Etapas III: desarrollo de acciones de carácter preventivo.

Etapas V: recursos materiales y financieros para la ejecución de acciones de solución, y mejoramiento de las condiciones para el manejo de los desechos peligrosos.

- Los recursos financieros para la ejecución de las acciones de solución, y el mejoramiento de las condiciones de manejo de los desechos peligrosos, serán asignados por la propia Empresa y los mismos se encuentran desglosados en las tablas que aparecen en las etapas II, III y IV.
- Etapas VI: cumplimiento y responsabilidad.
- El calendario de cumplimiento para la ejecución de las tareas previstas y la asignación de las responsabilidades específicas para el cumplimiento de las acciones a realizar, se exponen en las tablas que aparecen en las etapas II, III y IV.
- La responsabilidad de garantizar los recursos financieros para las acciones de solución y el mejoramiento de las condiciones de manejo de los desechos peligrosos, es del director general y el director económico.
- Se evaluará la marcha del cumplimiento de las tareas previstas en los Consejos de Seguridad, Salud y Medioambiente que se efectúan mensualmente.

3. Acciones para el enfrentamiento al cambio climático.

- Estrategias de logística verde con la inclusión de la protección ambiental en las relaciones contractuales y laborales de Acinox Las Tunas.
- Medidas para mitigar la huella ecológica, mediante el uso de residuos peligrosos como son los aceites usados como combustible, para incrementar la eficiencia energética y para su conservación en condiciones de seguridad.
- Modificaciones en las torres de enfriamiento para mejorar la temperatura del agua (sistemas de ventiladores).
- Conductora de agua para el suministro a la Empresa, para enfrentamiento a la sequía (desde el Cornito y perforación de pozos cercanos a la planta).
- Utilización de gases refrigerantes ecológicos, para evitar el calentamiento global (reconversión tecnológica y aplicación de gases ecológicos).
- Reforestación de áreas aledañas a la Empresa.

- Reutilización de residuos y su inclusión como indicadores del desempeño ambiental.
- Mejoras en la planta de tratamiento y depuración de humos en sistemas de aspiración, hermetización, electro válvulas, filtros, mangas, caracoles, etc.

4. Acciones encaminadas al empleo de fuentes renovables de energía.

- Análisis de ofertas de calentadores solares y su montaje.
- Montaje de tejas traslúcidas; las primeras 100 en maquinado y armadura, permitiendo la disminución de 2880 horas de funcionamiento de las lámparas (incremento de la durabilidad). Ahorro de 31,104 MWh en un año.
- Se realizó estudio para el uso de sistemas fotovoltaicos (SFV) en el edificio administrativo de la Empresa.
- Se evaluó la posibilidad de emplear de la energía eólica.

5. Adecuada gestión de residuos.

- Planes de manejo.
- Nombramiento por resolución del representante de la Empresa ante la Ley 1288/75 Res.49-2010.
- Establecimiento de convenios de cooperación para el manejo de los residuos.
- Firma de contratos de suministro de residuos para el reciclaje con la Empresa de Recuperación de Materias Primas.
- Reutilización de residuos.
- Balance mensual de aceites usados.
- Producciones alternativas a partir de residuos.
- Inspección mensual en base a los requisitos legales.

6. Verificación en los Consejos de Seguridad y Salud y Medio Ambiente, del cumplimiento del programa ambiental, y verificación del cumplimiento de los objetivos, metas y acciones ambientales.

7. Inspecciones de medioambiente y rendición de cuentas al Consejo de Dirección, mensualmente (inclusión de ello como indicador).

8. Cálculo de indicadores y verificación de la eficacia del sistema través del seguimiento y la medición de los procesos.

9. Solicitud de licencias ambientales y verificación mensual de su cumplimiento, y chequeo como indicador.

10. Sustitución de productos nocivos y uso de otros ambientalmente seguros.

11. Acciones de capacitación a cuadros sindicales y directivos de diferentes niveles, para prevenir y luchar contra la contaminación.
12. Monitoreos ambientales.
13. Acciones de enfrentamiento al cambio climático.
14. Acciones para el uso creciente de las fuentes renovables de energía.

Principales impactos de su aplicación (impacto social, económico y ambiental)

Impacto social

- Eliminación de focos donde pueden proliferar vectores, evitando enfermedades, y la contaminación de aguas y el suelo, y la generación de gases que propician el efecto invernadero.
- Contribución a la paisajística de la Empresa y su entorno.
- Disminución de los costos como indicador condicionante y específico para el sistema de estimulación de varias áreas, permitiendo estimular en CUC al colectivo de trabajadores.
- Disminución de barreras que limitaban el paso ante emergencias y averías, para propiciar una más rápida y efectiva evacuación.
- Mejor imagen ante la comunidad y los clientes.
- Mejor imagen general y del ámbito laboral.
- Se ha mantenido el seguimiento a la gestión ambiental a través de las inspecciones y la rendición de cuentas en los Consejos de Seguridad y Salud y Medioambiente, así como con el cálculo de los indicadores mensuales, resultando con ello un control eficaz del desempeño ambiental.

Impactos de la gestión ambiental (Tabla 11)

1. En cuanto a los polvos y el humo, se logra que en los últimos 5 años se disponen 21 878 toneladas en el relleno sanitario y hacia otros destinos gestores (mantenimiento constructivo, e Industrias Locales de Pinar del Río).
2. En cuanto a la escoria, en los últimos 5 años se ubican 65 634 toneladas en el relleno sanitario, y en otros gestores por convenios de cooperación.
3. En cuanto a los aceites usados, su empleo como combustible representa unas 130,683 t de combustible convencional en estos cinco años, y un ahorro de 127 587,06 USD a precio de la tonelada de combustible (ver Tabla 5).

4. Se logran 10,6 ha reforestadas, es decir, se reforesta 83,46 % del entorno.
5. Se alcanza una reducción de 0,10 kg/t en el consumo de diésel, por debajo de lo consumido en los últimos cinco años.
6. En cuanto al consumo de agua (m³/t), se logra una reducción de 0,04 m³/t en los últimos cinco años.
7. El consumo de gasolina también se reduce en 0,162 kg/t en estos años.
8. Se reduce en estos últimos años el consumo de LPG de acería, en 0,90 kg/t.
9. Se reduce el consumo de fuel oil en acería en 0,68 kg/t en los últimos cinco años.
10. Se reduce el índice de consumo de fuel oil en planta de cal en 0,234 kg/t en comparación con el plan.
11. El índice de consumo de electricidad en acería se incrementa en 4,79 kWh/t, por inestabilidad de suministro de chatarra en los últimos años.
12. Se reduce el índice de consumo de LPG del taller de laminación en 0,41 kg/t en estos cinco años.
13. El índice de consumo de fuel oil en laminación se reduce en 5,61 kg/t en los mismos años.
14. En laminación se reduce el índice de consumo de electricidad en 42,81 kW/t en estos años.
15. En cuanto a los productos químicos ecológicos, se logra que 100 % de alguicidas, antincrustantes e inhibidores de la corrosión, sean utilizados en el tratamiento a las aguas.
16. Incremento de la carga ecológica en los últimos años de los equipos de refrigeración y climatización con freones ecológicos 134^a, R 404^a y 410^a, para un aumento de la carga ecológica de 9,9 kg.
17. Se reduce la carga de equipos de climatización y refrigeración no ecológicos R12 y R 22, y se sustituyen por equipamiento ecológico; se imparten cursos de buenas prácticas de refrigeración, así como de reconversión tecnológica. Se reduce en 240,9 kg (9,28 %), y se utilizan el R134^a, el R404^a y el R410^a.
18. En cuanto a la inadecuada disposición de desechos sólidos, hoy se destinan al relleno sanitario, vertedero municipal y otros receptores a través de convenios de cooperación, de acuerdo con el plan de manejo.
19. Se logra reducir el índice de consumo de agua en 0,43 m³/t año en los últimos cinco años.
20. Se elimina el vertimiento del residual fotográfico al medioambiente, en 7,5 L/año.

21. Se logra la sustitución polvos de coberturas por ceniza de paja de arroz, disminuyendo 374,66 CUC/t, que se adquiría a 400 CUC/t.
22. Se incrementa el conocimiento, la sensibilidad y la disposición de los trabajadores en las diferentes categorías ocupacionales.
23. Uso racional de las materias primas y productos (inventario, almacenamiento y manejo adecuado de los materiales utilizados).
24. Actualización del inventario de fuentes contaminantes generadoras de residuales líquidos y sólidos, y emisiones a la atmósfera, como parte del programa de lucha contra la contaminación.
25. Monitoreo por Cubaenergía de emisiones a la atmósfera según las normas internacionales, en la planta de tratamiento de humos.
26. Monitoreos de agua.
27. Reparaciones a la planta de tratamiento de humos en el sistema de extracción, tiro, electro válvulas, sustitución de mangas, disminuyendo los contaminantes a la atmósfera.
28. Vertimiento de los polvos y la escoria en el relleno sanitario, aprobado por licencia ambiental No 3/2006, Ampliación Relleno Sanitario para escorias y polvos de la producción de aceros, y su reutilización con varios gestores a través de convenios de cooperación .
29. Cumplimiento de la licencia ambiental para almacenamiento temporal de aceites usados como combustible en la Planta de Cal y Laminador 200T, y para la conservación del equipamiento en condiciones de seguridad; Licencia No 03/2010.
30. Sustitución de baterías de ácidos por alcalinas, eliminación total del ascarel de las instalaciones de la Empresa, y adecuado manejo de las baterías en coordinación con Materias Primas, evitando la contaminación al medioambiente por plomo, el electrolito ácido de las baterías de plomo o el aceite dieléctrico con bifenilos policlorados de transformadores y condensadores, así como dioxinas y furanos.
31. Realizados 76 convenios de cooperación con industrias, empresas, cooperativas de producción agropecuaria, MININT y Educación, y utilización de la escoria en actividades de apoyo a la agricultura urbana y suburbana, en el deporte para los centros biosaludables, canteros para lombricultura, reparación de hornos de ladrillos, actividades del jardín botánico, fabricación de bloques y otros materiales de construcción, cimentación de exteriores, fabricación de contenes con Ingeniería y Tránsito y jardinerías del MINFAR y MININT, así como plazas y cercado perimetral de diversas áreas. Esto permitió utilizar 480 sacos de cemento escoria y solo 180 sacos de cemento para la construcción de la plaza central del Regimiento Militar.

32. Opción de empleo a trabajadores no necesarios en la Empresa y ajenos a esta.
33. Construcción de instalaciones biosaludables en los municipios de Colombia y Jobabo, en coordinación con el INDER y Gobierno municipal.
34. Utilización de residuos de cal en la construcción, y como agente microbiológico en la estrategia ambiental.
35. Utilización de 24 toneladas de la cascarilla para la fundición en la Planta Mecánica de Santa Clara.
36. Rehabilitación de construcciones en la franja costera de la provincia, en coordinación con el CITMA de la provincia.
37. Fabricación de 8000 bloques en las comunidades de Becerra y Majibacoa, con bloqueras manuales; 7000 bloques en coordinación con Mantenimiento Constructivo, MINFAR y MININT mediante la cooperación entre empresas (5322 en el 2012 y 3443 en el 2013), representando un aporte al ingreso de la provincia de 47 898,00 y 30 987,00 MN, respectivamente.
38. Construcción de aceras en los proyectos locales y rehabilitación de viviendas dañadas por los huracanes; utilización en más de 5032 m² de aceras en varias comunidades de la provincia, con un ahorro aproximado de 50 % del cemento tradicional. Rehabilitación de aceras en aproximadamente 3212 m en el 2013, en comunidades de nueva creación y diversos centros de nuevo tipo, así como rehabilitación de centros sociales afectados por el ciclón.
39. Utilización de escoria y polvo de humo en la construcción y rehabilitación de las 7 parrilladas en el Cornito para la celebración de la Jornada Cucalambeana; reparación de 22 letrinas en escuelas rurales, así como paredes, aceras e instalaciones de Educación en el municipio Majibacoa.
40. Construcción de cochiqueras como apoyo al programa alimentario, en coordinación con las CCS Fortalecidas de Menéndez, Majibacoa y Holguín, MININT y MINED provinciales.
41. Reparación de 325 viviendas afectadas por el ciclón en el 2013, como cooperación al programa de apoyo al desarrollo local.
42. Ubicación laboral de 76 trabajadores no necesarios de diversas entidades. Rehabilitación de obras ingenieras en instituciones de instrucción militar, U/M y otras obras de las FAR y el MININT; construcción de las plazas militares en la Zona Oriental.
43. Con la recuperación de electrodos se ahorraron 6297,32 MN y 14 266,12 USD.
44. Fabricación de una máquina para procesar aproximadamente una tonelada de alimento diario para la acuicultura.

45. Ahorro de 10 000,00 USD al no tener que adquirir un equipo de ese tipo en el mercado internacional, con un impacto favorable en el desarrollo local endógeno.
46. Respuesta favorable a la implementación de los Lineamientos del Partido y a su Conferencia Nacional.
47. Mejores resultados en la prevención de la contaminación y en la imagen de la Empresa.
48. Mayor cumplimiento de las instrucciones ambientales por parte de terceros; el total de contratos ya poseen anexos sobre diversos aspectos, impactos e instrucciones ambientales, en las relaciones contractuales.
49. Mayor conciencia de la prevención.
50. Disminución de conflictos entre las partes.
51. Cumplimiento de las exigencias de la norma NC ISO 14 001:2004, con su soporte documental.
52. Se logró que los trabajadores de la brigada de climatización y refrigeración se capacitaran con la Oficina Técnica del Ozono en los cursos de buenas prácticas de refrigeración, y se mantienen inventariados los equipos con sus respectivas cargas. Se eliminó toda la carga de freón 12, lo que representó 9,6 % las emisiones de gases que afectan a la capa de ozono, y se mantiene dicha estrategia de reducción.

Impactos de la aplicación de producciones más limpias

1. Proceso de fusión en el horno de arco eléctrico (HAE) de la chatarra: se logra la utilización de lanza de oxígeno para corte y aprovechamiento de esta opción en tiempos de interrupción.
2. Control del nivel de las líneas de acero en el proceso de vaciado; se establecen mejoras por radiaciones nucleares, lo que permite vaciado estable, sin averías; aumenta la productividad y eficacia de la IVC (Instalación de Vaciado Continuo), disminuye la sobrecarga del vaciador, y se realiza una mejora en el sistema de automatización del control del nivel.
3. En el proceso de fusión de metal en el HAE, se aplica la tecnología de escoria espumosa, aplicación de oxígeno y carbón, lográndose mantener temperatura, lo cual facilita las reacciones químicas y el ahorro de energía.
4. En la generación de contaminantes atmosféricos (polvos) en el proceso de fundición, se logra la utilización de los polvos de humos como colorantes en la industria de la construcción y en la cerámica, realizándose con resultados positivos la pigmentación de mosaicos para mantenimiento constructivo (ahorra 9,0 CUC por kg de pigmentos para fabricación de mosaicos), así como en la

- pigmentación de pinturas con empresas de industrias locales de Pinar del Río; se entregaron 12 t en el 2014.
5. Con el montaje de tejas traslúcidas en maquinado, armadura y enrollado, se logra que las 100 tejas representaran un ahorro de 2880 horas de funcionamiento de las lámparas (incremento de la durabilidad). Ahorro de 31,104 MWh en un año.
 6. En cuanto al manejo de agua en el proceso industrial, se logra su recirculación a través de un ciclo 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 de la IVC y volviendo a utilizar el agua, permitiendo una disminución del consumo de 0,80 m³/t en los últimos años, además de reducir los sólidos en suspensión en menos de 30 ppm y lograr que, en cuanto al reciclado en los últimos cinco años, este sea de 4 610 875 m³.
 7. En cuanto a la evaluación del consumo de agua, se logra la adquisición y puesta en explotación de flujómetros que permiten controlar el consumo de agua, así como los gastos.
 8. En el proceso de tratamiento de agua se logra la sustitución de una gama de productos por polielectrolitos, controladores microbiológicos, antincrustantes, alguicidas y otros productos ambientalmente seguros (biodegradables).
 9. En cuanto la generación de residuos sólidos en el proceso de fundición: en la escoria, del 2011 hasta la fecha se establecen 76 convenios de cooperación con varios sectores como cooperativas, centros educacionales, dirección de deportes, órganos del Poder Popular, FAR y MININT, entre otros, y se utiliza la escoria generada como extensor del cemento para su mezcla con materiales alternativos (ceniza de polvo de arroz, cemento y aserrín de madera), a fin de crear una superficie porosa e impermeabilizar los tanques de combustibles y conductoras, logrando un ahorro en la planta de producción de cal, de 21 MWh anuales. Con la escoria se ha ahorrado 70 % del cemento tradicional, y ha permitido su uso en fabricación de bloques, aceras, rehabilitación del fondo habitacional, reparación y construcción de viviendas, plazas e instituciones de la FAR y el MININT, rehabilitación de escuelas en coordinación con Educación, fabricación de cochiqueras y otros centros biosaludables de la provincia; en total se entregaron 100 t de escorias en el 2014.
 10. En cuanto a la cascarilla y su generación en el proceso de cristalización del metal en la IVC, la primera (de acero al carbono) se utiliza como materia prima en Planta Mecánica de Santa Clara, entregando en el 2014, a través de convenios de cooperación, un total de 17 t durante las paradas planificadas de la planta,

utilizándola en la fundición, disminuyendo los residuos y proporcionando un aporte económico a esa entidad.

11. En cuanto a la planta de tratamiento y depuración de polvos y humos, la adquisición de motores de 6 kV para su mejor funcionamiento, la modificación de electroválvulas y hermeticidad de los sistemas, la reparación de filtros y la sustitución de mangas, han permitido que, según monitoreos de Cubaenergía, los resultados de las emisiones estén dentro de las normas establecidas.
12. Generación de chatarra en varias partes del proceso; se logra la reutilización de 22 054,52 en los últimos cinco años, ahorrando por no tener que adquirir chatarra 1 648 860,72 CUC, aproximadamente, considerando a 75,00 CUC la tonelada; se reduce el impacto en la imagen visual, su acumulación en el terreno y la posibilidad de proliferación de vectores.
13. Mediante la utilización de polvos de cobertura en el proceso de fundición, se ha logrado la sustitución de la ceniza de la paja de arroz, sustituyendo unos 400 USD/t y logrando utilizar los residuales de los CAI arroceros que solo cuestan 25,34 CUC/t, ahorrando alrededor de 374,66 CUC/t.
14. La utilización de gases ecológicos en los equipos de refrigeración y climatización, la sustitución por equipamiento ecológico, la realización de cursos de buenas prácticas de refrigeración, reconversión tecnológica, permiten hoy con buenas prácticas la reducción de 234,1 kg (50,71 %). Para esto se utilizan el R134^a, el R404^a y el R410a, que son refrigerantes ecológicos.

Conclusiones

El presente trabajo permitió:

1. Servir de base y estrategia para la prevención de la contaminación en la Empresa, y avanzar hacia su desarrollo sobre bases sostenibles.
2. Alcanzar un importante impacto en lo económico, social y ambiental, conjugado con un fuerte impacto en el desarrollo local y en el apoyo a otros territorios y provincias.
3. Enfoque que puede ser generalizado a cualquier entidad.
4. La clave del avance hacia el desarrollo sostenible depende de muchos factores, de la efectiva imbricación de las políticas económicas y ambientales en todos los horizontes de planificación, y de la consideración en el corto, mediano y largo plazos, del balance en el uso racional de los recursos naturales.

5. Apremiar que el cumplimiento de los Lineamientos y la actualización constante de la política ambiental a tono con los cambios, son el respaldo a la voluntad política en aras de la sostenibilidad.
6. En cada aspecto de los planes anuales de la economía, y sus programas económicos a mediano plazo, debe tomarse en cuenta el factor ambiental, indisolublemente unido a las diferentes categorías de la planificación.
7. La evaluación ambiental estratégica debe ser parte de las definiciones de los programas de desarrollo a largo plazo, o en lo posible precederlas.
8. Ser previsores en la lucha contra la contaminación.

Recomendaciones

1. Generalizar esta experiencia, tan necesaria para prevenir la contaminación.

Bibliografía

CITMA (2009). *Resolución 136/2009. Reglamento para el manejo integral de desechos peligrosos.*

COLECTIVO DE AUTORES UNJC (2011). *Retos y tendencias del derecho ambiental contemporáneo.* Sociedad cubana de derecho constitucional y administrativo.

Constitución de la República de Cuba (1976). Consultada en febrero de 2015: <http://www.ecured.cu>.

NC ISO 14001:2004. *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.*

Anexos. Tablas

Anexo A



Anexo B



Tabla 1. Resultados productivos en los últimos años (producción de acero y de barras corrugadas)

Año	Acero carbono	Por destino			Plan acero terminado	Cumplimiento plan, %
		Exportación	Nacional	L200T		
2007	110 805,599	69 139,472	1274,214	40 391,913	96 278	115
2008	109 258,106	66 425,896	1157,434	41 674,776	109 478	100
2009	118 538,844	78 469,394	768,363	39 301,087	114 248	104
2010	108 271,345	88 067,392	1454,853	18 749,100	125 390	86
2011	131 730,981	90 842,960	9980,878	30 907,143	113 887	116
2012	141 243,808	84 826,824	12 664,582	43 752,402	130 312	108
2013	137 329,763	85 910,616	5687,459	45 731,688	132 672	104
2014	128 575,224	85 838,240	460,024	42 276,960	132 212	97

Tabla 2. Producción de barras

Año	Total barras	Producción plan	Cumplimiento plan, %
2007	36 864,791	31 434	117
2008	38 808,864	38 600	101
2009	35 664,467	40 000	89
2010	13 608,924	42 833	32
2011	31 078,934	33 400	93
2012	40 303,723	38 043	106
2013	41 504,838	40 000	104
2014	40 171,760	40 000	100

Tabla 3. Consumo de agua

Meses	Producción (t)	Agua (Plan = 0,91 m ³ /t)	
		Consumo (m ³)	Ind. Real (m ³ /t)
Año 2010	112 365,000	94 926,62	0,84
Meses	Acero Liq.(t)	Agua (Plan = 0,91 m ³ /t)	
		Consumo (m ³)	Ind. Real (m ³ /t)
Año 2011	137 827,200	120 239,70	0,87
Meses	Acero Liq.(t)	Agua (Plan = 0,91 m ³ /t)	
		Consumo (m ³)	Ind. Real (m ³ /t)
Año 2012	147 304,800	115 122,00	0,78
Meses	Acero Liq.(t)	Agua (Plan = 1,79 m ³ /t)	
		Consumo (m ³)	Ind. Real (m ³ /t)
Año 2013	142 762,560	96 913,38	0,68
Meses	Acero Liq.(t)	Agua (Plan = 1,474 m ³ /t)	
		Consumo (m ³)	Ind. Real (m ³ /t)
Año 2014	134 204,074	117 416,50	0,87

Tabla 4. Cantidad de agua filtrada y reciclada como gestión del recurso agua

Año	Agua filtrada m³/t año	Recirculación m³/t año
2010	90 406,3	915 200,0
2011	11 4514,0	923 560,0
2012	11 0080,0	104 1480,0
2013	92 268,0	884 513,0
2014	91 120,0	846 122,0

Tabla 5. Impacto por la reutilización de residuos (aceites usados)

Utilización	2010	2011	2012	2013	2014
Combustible	22,48 t	41,703 t	13,44 t	18,32 t	25,324 t
Conservación	0,78 t	0,642 t	0,389 t	2,18 t	0,112 t
Ahorro índice de consumo	0,2 kg/t acero	0,27 kg/t acero 0,45 kg/TN barras	0,19 kg/t acero	0,09 kg/t acero y 0,120 kg/t de barras	0,118 kg/t acero y 0,368 kg/t de barras
Ahorro (TCC)	23,26 (89,07 barril)	42,345 (95,62 barril)	13,829 (100,0 barril)	26,06 (100,0 barril)	25,189 (80,0 barril)
Ahorro (USD)	13 466,49	26 318,69	8 988,85	16 939	13 100

Tabla 6. Impactos en la sustitución de importaciones por el reciclaje

Denominación	2010	2010	2011	2011	2012	2012	2013	2013	2014	2014
	t/año	\$/año	t/año	\$/año	t/año	\$/año	t/año	\$/año	t/año	\$/año
Chatarra inoxidable	0,000	0,00	0,000	0,00	0,297	551,83	0,038	70,60	2,874	5339,89
Acero	19,247	11 269,12	23,756	13 909,14	0,167	97,78	9,148	5356,15	18,267	10 695,33
Hierro (partes y piezas)	9,101	3658,60	19,781	7951,96	2,784	1119,17	18,143	7293,49	2,732	1098,26
Cobre	1,035	7887,62	0,613	4671,61	0,739	5631,84	0,863	5675,80	0,652	4968,82
Aluminio	0,00	0,00	0,005	94,24	0,033	62,20	1,014	1 911,12	0,133	250,67
Bronce	0,017	45,78	0,189	508,96	0,179	482,03	0,177	476,64	0,282	759,25
Chatarra electrónica	0,046	4,6	1,322	132,2	0,118	11,80	0,149	14,80	0,965	96,50
Plásticos	0,025	46,30	0,091	168,53	0,138	255,58	0,158	292,62	0,156	288,91
Cartón	1,057	175,57	0,877	145,67	1,325	220,08	1,615	323,00	1,141	228,20
Papel	0,084	16,80	0,843	168,60	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Acumuladores (plomo)	0,420	788,99	0,710	1316,87	0,283	527,71	1,089	2030,65	0,441	822,33
Toner (U)	35,000	296,10	67,000	566,82	121,000	1023,66	121,000	1023,66	72,000	609,12
Total		23036,687		28766,965		8948,20		23107,391		25157,288

Tabla 7. Resultados de la gestión. Reutilización interna (ahorro por no tener que importar chatarra) e impacto por no afectar la imagen visual, no provocar acumulación en la superficie y ser fuente de proliferación de vectores, entre otros impactos favorables

Año	Chatarra interna (t/a)	CUC
2010	3150,37	236 277,75
2011	3082,25	229 258,87
2012	5440,00	404 681,6
2013	5078,30	380 872,50
2014	5303,60	397 770,00

Tabla 8. Ingresos por concepto de gestión de residuos

Año	Ingresos MN	CUC
2007		55,56
2008	11,40	159,42
2009	36,42	922,53
2010	17,09	410,05
2011	253,36	488,96
2012	3808,15	Se contrata en MN
2013	3570,70	Se contrata en MN
2014	5608,48	Se contrata en MN

Tabla 9. Utilización de electrodos en la fabricación de crisoles para la fabricación de hélices de barcos, mediante convenio con la Empresa Pesquera de Caibarién

Año	Hélices de barcos (U)	CUC
2011	36	90 000,00
2012	49	122 500,00
2013	56	140 000,00
Total	141	352 500,00

Tabla 10. Reciclaje de neumáticos

Año	Neumáticos recapados	CUC
2011	48	5760,00
2012	26	3120,00
2013	80	9600,00
2014	48	5760,00
Total	154	24 240,00

Tabla 11. Resultados de la gestión

Efluentes contaminantes	Antes de la gestión	Resultados de la gestión	Reducción y(o) incrementos de la aplicación
Polvos y humo (t) en los últimos cinco años	21 878 t	0 (100 %)	21 878 t en los últimos 5 años. Se disponen adecuadamente en el relleno sanitario y hacia otros gestores (mantenimiento constructivo, industrias locales de Pinar del Río)
Escoria (t) en los últimos cinco años	65 634 t	0 (100 %)	65 634 t en los últimos 5 años. Se disponen adecuadamente en el relleno sanitario y hacia otros gestores por convenios de cooperación
Aceites usados como combustible	Muy poco	121 267 t	Su uso representa unas 130 683 t de combustibles convencional en estos cinco años, y ahorro de 127 587,06 USD a precio de la tonelada de combustible (ver Tabla 5)
Áreas deforestadas	12,7 ha	2,1 ha	10,6 ha reforestadas, es decir, se reforesta 83,46 %

Consumo de diésel (kg/t)	3,48	3,38	0,10 kg/t se reduce en los últimos cinco años
Consumo de agua (m ³ /t)	0,91	0,87	0,04 m ³ /t se reduce en los últimos cinco años
Consumo de gasolina (m ³ /t)	0,28	0,118	0,162 se reduce en los últimos cinco años
Consumo de LPG en acería (kg/t)	4,86	3,959	0,90 se reduce en los últimos cinco años
Consumo de fuel oil en acería (kg/t)	9,92	9,241	0,68 se reduce en los últimos cinco años
Consumo de fuel oil (P.Cal kg/t)	7063	6829	0,234 se reduce con respecto al plan
Consumo de electricidad (kWh/t) acería	762,95	767,7	Se incrementa en 4,79 por inestabilidad de suministro de chatarra en los últimos 5 años.
Consumo de LPG 200T (kg/t)	0,72	0,31	0,41 se reduce en los últimos cinco años
Fuel oil (kg/t) laminación	58,93	53,32	5,61 Se reduce en los últimos cinco años
Consumo de electricidad (kWh/t)	172,15	129,34	42,81 se reduce en los últimos cinco años
Productos químicos ecológicos	70 %	100 %	100 % (alguicidas, antincrustantes e inhibidores de la corrosión)
Equipos con freones ecológicos 134 ^a , R 404 ^a y 410 ^a carga ecológica	55 kg	64,9 kg	9,9 kg Incremento la carga ecológica en los últimos años
Equipos con freones no ecológicos R12 y R22	475 kg	234,1 kg se eliminó totalmente el freón 12 (72 kg)	Sustitución por equipamiento ecológico, realizando cursos de buenas prácticas de refrigeración y reconversión tecnológica. Se reduce en 240,9 kg (49,28 %) Se utilizan el R134 ^a , el R404 ^a y el R410a.
Inadecuada disposición de desechos sólidos	87 512 de escoria, polvos y residuos sólidos urbanos	0 (100 %) disponen de planes de manejo, reutilización y reciclaje	Se destina al relleno sanitario, vertedero municipal y otros gestores a través de convenios de cooperación
Índice de consumo de agua (m ³ /t de acero) por diseño y real alcanzado	1,23 m ³ /t año	0,80 m ³ /t año como promedio en los últimos años, por debajo de lo planificado	0,43 m ³ /t año se reduce en los últimos cinco años
Residual fotográfico vertido al medioambiente	7,5 L/año	0	7,5 L/año
Sustitución de polvos de coberturas por ceniza de paja de arroz	400 USD/t	25,34 USD/t	374,66 CUC/t

Tabla 12. Tabla de aplicación de producción más limpia

Oportunidades de PML identificadas	Situación anterior	Situación actual
Proceso de fusión en HAE de la chatarra de la acería	No se utilizaba el corte de chatarra con oxígeno en los tiempos de interrupción en (HAE)	Utilización de la lanza de oxígeno para el corte y aprovechamiento de esta opción.
Control del nivel de las líneas de acero en el proceso de vaciado	Mejoras en la automatización del control del nivel, que era vaciado manualmente en el acero, lo que trae consigo poca productividad y mayores averías	Control de nivel en la Instalación de Vaciado Continuo (IVC) por radiaciones nucleares; permite vaciado estable, sin averías, aumenta la productividad y eficacia de la IVC, disminuye la sobrecarga del vaciador, se realiza una mejora en el sistema de automatización del control del nivel.
Proceso de fusión de metal en el HAE (horno de arco eléctrico)	No se aplicaba insuflado de oxígeno ni carbón	Aplicación de la Tecnología de Escoria Espumosa, aplicación de oxígeno y carbón logrando mantener la temperatura; facilita las reacciones químicas y el ahorro de energía.
Generación de contaminantes atmosféricos (polvos) en el proceso de fundición	Generación de 21 878 t de polvos al año, incorporándose al medio y disponiéndose adecuadamente en el relleno, pero no se utilizaba con otros gestores, luego de ser tratados en PTHumo	Utilización de los polvos de humos como colorantes en la industria de la construcción y en la cerámica, realizándose con resultados positivos la pigmentación de mosaicos con mantenimiento constructivo (ahorra 9,0 CUC por kg de pigmentos para fabricación de mosaico, así como en la pigmentación de pinturas); a la empresa de industrias locales de Pinar del Río se entregaron 12 t en el 2014
Montaje de tejas traslúcidas	No se habían utilizado	Se montan en maquinado, armadura y enrollado, y las 100 tejas representaron un ahorro de 2880 horas de funcionamiento de las lámparas (incremento de la durabilidad). Ahorro de 31,104 MWh en un año
Manejo de agua en el proceso industrial	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 de la IVC y volviendo a utilizar el agua, permitiendo una disminución del consumo de 0,80 m ³ /t en los últimos años, además de reducir los sólidos en suspensión en menos de 30 ppm. Se han reciclado 610 875 m ³ en los últimos cinco años
Evaluación del consumo de agua	Se realizaba estimando el consumo	Adquisición y puesta en explotación de flujómetros que permiten controlar el consumo de agua, así como los gastos
Proceso de tratamiento de agua	Se utilizaban alrededor de 70 % de productos ecológicos	Sustitución de productos para el tratamiento de agua, como polielectrolito, controladores microbiológicos, antiincrustantes, alguicidas y otros ambientalmente seguros (biodegradables)

<p>Generación de residuos sólidos (escoria) en el proceso de fundición</p>	<p>Disposición adecuada del residual, ampliando la aplicación a otros gestores, así como usar una parte del producto para insular tuberías y tanques para ahorro de energía</p>	<p>Del 2011 hasta la fecha se establecen 76 convenios de cooperación con varios sectores: cooperativas, centros educacionales, dirección de deportes, órganos del Poder Popular y de las FAR y el MININT, entre otros. Se utiliza la escoria generada como extensor del cemento para aislante a partir de mezclar materiales alternativos (ceniza de polvo de arroz, cemento y aserrín de madera) para crear una superficie porosa. El ahorro en la Planta de Producción de Cal es de 21 MWh anual. Con la escoria se ha ahorrado 70 % del cemento tradicional. Aplicación en fabricación de bloques, aceras, rehabilitación del fondo habitacional, reparación y construcción de viviendas, plazas de las FAR y el MININT, rehabilitación de escuelas en coordinación con Educación, fabricación de cochiqueras en los centros biosaludables de la provincia, entre otros; en total se entregaron 100 t de escoria en el 2014</p>
<p>Generación de cascarilla en el proceso de cristalización del metal en la IVC</p>	<p>No se usaba, y en el relleno sanitario se ubicaban solo como base alrededor de 705 t/año</p>	<p>La cascarilla de acero al carbono se utiliza como materia prima en Planta Mecánica de Santa Clara, entregando en el 2014 un total de 17 t durante las paradas planificadas de la planta, a través de convenios de cooperación. Se utilizan en la fundición, disminuyendo los residuos y propiciando un aporte económico a esta entidad</p>
<p>Planta de tratamiento y depuración de polvos y humos</p>	<p>Ineficiencia en el funcionamiento de los motores de extracción de menor potencia</p>	<p>Adquisición de motores de 6 kW para un mejor funcionamiento de la Planta de Tratamiento de humos y polvos; modificación de electroválvulas y hermeticidad de los sistemas, reparación de filtros y sustitución de mangas</p>
<p>Generación de chatarra en varias partes del proceso</p>	<p>No se reusaba 100 %, alrededor de 3560 t/año de metal</p>	<p>Se reutilizan 22 054,52 en los últimos cinco años, ahorrando 1 648 860,72 CUC, aproximadamente, por no tener que adquirir chatarra a 75,00 CUC la tonelada, y reducir el impacto en la imagen visual, la acumulación en la superficie y posibilidad de proliferación de vectores</p>
<p>Utilización de polvos de cobertura en el proceso de fundición</p>	<p>Uso de polvos de cobertura que eran importados, con un costo aproximado de 400 USD/t</p>	<p>Utilización de la ceniza de paja de arroz como polvo de cobertura en el proceso de fundición, sustituyendo unos 400 USD/t y logrando utilizar los residuales de los CAI arroceros que solo cuestan 25,34 CUC/t, ahorrando alrededor de 374,66 CUC/t</p>
<p>Utilización de gases no ecológicos en los equipos de refrigeración y climatización</p>	<p>Antes se utilizaban y permitían la entrada de equipos con freón 12 y 22 a la entidad, por un total de 475 kg</p>	<p>Sustitución por equipamiento ecológico, realizando cursos de buenas prácticas de refrigeración y acciones de reconversión tecnológica. Hoy, se reducen 234,1 kg (50,71 %). Se utilizan el R134^a, el R404^a y el R410a</p>

**Modelo de evaluación cualicuantitativa.
Urbanismo y vivienda sustentable**

**Qualitative-quantitative evaluation model.
Urban planning and sustainable housing**

Por Dr. Arq. Arnoldo Eduardo Álvarez López,
César Eduardo Álvarez González*
y M.Sc. Arq. Ernesto Pérez Hernández*
* Facultad de Construcciones,
Universidad Central Marta Abreu
de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
e-mail: arnoldo@uclv.edu.cu*

Resumen

Las crisis energéticas, la degradación del medio urbano, el alarmante aumento de los efectos del calentamiento global del planeta y la cada vez más limitada existencia de materias primas, hacen pensar que el paradigma de un planeta como fuente ilimitada de recursos, no es valedero. Ante eso existen razones para construir viviendas ambiental y energéticamente eficientes, hacia un hábitat totalmente consciente y amigable con el entorno, incorporando los resultados de la ciencia y la técnica de una manera sencilla y efectiva, avanzando siempre hacia un mundo mejor. En ocasiones son insuficientes las herramientas técnicas que permiten conocer con mayor certeza las tendencias del comportamiento ambiental y energético de las edificaciones de las viviendas, el contexto urbano, su adecuación a las normativas térmicas, lumínicas, acústicas y a las realidades climáticas, todo lo cual influye en la calidad y el confort de los espacios habitables. En este trabajo se aplican herramientas cualicuantitativas desarrolladas en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, a contextos urbanos realizados y reales, así como soluciones de viviendas que caminan por lo bioclimático y sustentable en sus propuestas, y aportan la información necesaria para evaluar los factores físico-ambientales y energéticos de las mismas. Se ilustra dicha propuesta y se grafican los resultados de su aplicación.

Palabras clave: Viviendas, normativas, herramientas cualicuantitativas, eficiencia energética

Abstract

Energy crises, the degradation of the urban environment, the shocking increase on the impacts of global warming and the increasingly limited

existence of raw materials, shows that the paradigm of a planet as a source of unlimited resources is not realistic. There are reasons to develop environmentally and energy efficient homes, in order to have an environmentally friendly habitat, integrating science and technology results in a simple and effective way, evolving towards a better world. Technical tools are sometimes insufficient to know with greater certainty the trends of the environmental and energy performance of buildings, the urban context, their adaptation to thermal, light and acoustic standards and to the climatic realities, all of which greatly influences quality and confort of the living spaces. In this paper, qualitative and quantitative tools developed at the Faculty of Constructions of the Central University Marta Abreu de Las Villas are applied to existent urban contexts, as well as bioclimatic and sustainable housing solutions, providing the necessary information to evaluate their physical-environmental and energy issues. The proposal is explained and the results of its application are graphed.

Keywords: Housing, regulations, Qualitative-cuantitative tools, energy efficiency

Introducción

La temática del hábitat en Cuba ha cobrado auge en las últimas décadas, mediante numerosos estudios encaminados a resolver sus problemáticas dentro del contexto del país.

En el epicentro de estos estudios se encuentra el urbanismo y la vivienda como entorno inmediato en el que se desarrollan las actividades humanas. La crisis de la vivienda se ha generalizado a nivel mundial en los últimos años, siendo más grave en los países en vía de desarrollo. Existe una tendencia que relaciona el déficit de viviendas con el incremento poblacional; su construcción masiva provoca en ocasiones errores finales en cuanto a su calidad y confort [Acosta, 2011]. Uno de los principales problemas que afectan el confort ambiental en las nuevas urbanizaciones es el uso indiscriminado de soluciones típicas en cuanto al diseño y los modelos constructivos, sin tener en cuenta las condiciones ambientales del lugar en el que serán emplazadas; esto es el resultado de que los diseños no obedecen a un análisis ambiental ni energético, sino que responden más a políticas y programas estatales de construcción de viviendas, dadas las realidades, carencias y problemas sociales existentes.

A fin de localizar las principales deficiencias, y con el objetivo de darles solución, se han desarrollado numerosos métodos de evaluación. En el caso de la vivienda a evaluar en este trabajo, se aplica el Instructivo o Herramienta Cualicuantitativa de Evaluación para el Urbanismo y la Vivienda, desarrollado por la Facultad de Construcciones de la Universidad

Central Marta Abreu de Las Villas [Álvarez, 2009], además de un análisis que tiene como punto de partida las Normas Cubanas referentes a este tema.

Como objetivos del trabajo se tienen:

- Identificar en el estudio de la vivienda y el urbanismo, como partes componentes del hábitat, los elementos esenciales con que se interrelaciona el medioambiente inmediato, y este incide en el confort de los espacios.
- Aplicar herramientas cualicuantitativas para la evaluación ambiental y energética de la vivienda y el urbanismo, aportando sus principales resultados con relación al comportamiento de diversos indicadores y variables.
- Demostrar la importancia del diseño de las soluciones de viviendas, partiendo del análisis ambiental de su lugar de emplazamiento.

Materiales y métodos

Se aplican herramientas cualicuantitativas de evaluación a partir del instructivo creado para evaluar las características de urbanismo desde el punto de vista ambiental, la vivienda en su comportamiento ambiental y su certificación energética.

Análisis de la situación actual

Estudio del desarrollo urbanístico de la zona, mediante el análisis de las variantes tipológicas de las viviendas y su comportamiento con respecto a las condicionantes ambientales de los diferentes emplazamientos.

Levantamiento de la zona de estudio

Análisis de las características morfológicas urbano-arquitectónicas del reparto Escambray, Santa Clara, como principal zona de análisis.

Aplicación de las herramientas cualicuantitativas de evaluación

Se aplican tanto al análisis urbano como a la solución arquitectónica. Los métodos empleados para el análisis de la vivienda son:

1. Multimedia Bioarquitectura, Energía y Hábitat.
2. Herramienta Cualicuantitativa de Evaluación para la Vivienda y el Urbanismo.
3. Normativa cubana vinculada al diseño urbano y arquitectónico.

Principales normativas relacionadas con el diseño arquitectónico ambiental

Resulta trabajoso filtrar del amplio conjunto de normas cubanas, aquellas que tributan a algún aspecto específico como puede ser el diseño ambiental. Es por ello que para este trabajo se tomó en cuenta la selección y el juicio expuesto en trabajos anteriores [Acosta, 2011]. Es muy probable que se puedan derivar otras normas que tributen al diseño ambiental de algún tipo, pero dado el objetivo específico de diseñar el mecanismo de evaluación basado en indicadores obtenidos a partir del estudio de las normas, la inclusión de las nuevas será recomendada para futuros trabajos. De cualquier forma, es útil referenciar las normas a las que se refiere Acosta [2011].

NC 166. Edificaciones. Principios generales para el diseño ambiental de los espacios interiores de los edificios. Esta Norma cubana establece los principios generales para el diseño de los espacios interiores de los edificios, con el fin de lograr un ambiente interior adecuado para la salud, el confort de los ocupantes y el uso racional de la energía. Es aplicable a todas las edificaciones sociales, de viviendas e industriales, tanto de obras nuevas como de remodelaciones y reconstrucciones.

NC219. Urbanismo. Código de buenas prácticas para el diseño ambiental de los espacios urbanos: Esta Norma cubana establece las prácticas para el diseño ambiental de los espacios abiertos urbanos para el logro del confort microclimático, minimizar el efecto de la isla de calor urbano y el consumo energético en los edificios cercanos.

NC 220. Requisitos de diseño para la eficiencia energética: Esta Norma cubana establece requisitos de diseño para la eficiencia energética de la envolvente del edificio, con el fin de minimizar la ganancia de calor solar y disminuir los gastos de energía necesarios para acondicionar los espacios interiores, sin afectar las condiciones del bienestar interior. Los requisitos de esta parte se aplican a todos los edificios o a parte de ellos que proporcionan abrigo o facilidades para la ocupación humana.

NC 641. Edificaciones, viviendas sociales urbanas, requisitos funcionales y de habitabilidad: Esta Norma cubana establece los requisitos funcionales y de habitabilidad para la vivienda social gestionada y financiada por el Estado en Cuba. Es aplicable a las viviendas de nueva construcción, para las cuales se ofrecen áreas de espacios interiores recomendables, y en el caso de remodelación y ampliación en edificaciones existentes donde no puedan cumplirse las áreas recomendables, se ofrecen dimensiones y las áreas mínimas para los espacios interiores.

Existen otros documentos que de igual forma influyen en los procesos de diseño de la vivienda, pero que en muchas ocasiones son de carácter

regional y su contenido varía según las condiciones del lugar en sí. Dentro de estos documentos se pueden encontrar: el Plan General de Ordenamiento Urbano, las Regulaciones Urbanas, los Planes de Desarrollo, etc.

Proceso Analítico Jerárquico o AHP

El Proceso Analítico Jerárquico o AHP (Siglas que se utilizarán en lo adelante, del inglés *Analytic Hierarchy/Network Processes*) es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas. En vez de prescribir la decisión *correcta*, el AHP ayuda a los decisores a encontrar la solución que mejor se ajusta a las necesidades y a la comprensión del problema.

Esta herramienta basada en matemática y psicología, fue desarrollada por Thomas L. Saaty [2008] en los años setenta, y desde entonces ha sido extensivamente estudiada y refinada. El AHP provee un marco racional de referencia para estructurar un problema de posible decisión, para representar y cuantificar sus elementos, para relacionar esos elementos a los objetivos generales y para evaluar alternativas de solución. El AHP es usado en el mundo en una amplia variedad de situaciones de decisión, en campos tales como el gobierno, negocios, industria, salud y educación. En la Universidad Central Marta Abreu de las Villas se ha aplicado en investigaciones como Crespo [2010], por solo citar un ejemplo.

El AHP convierte las evaluaciones en valores numéricos o prioridades. Un peso numérico o una prioridad están derivados de cada elemento en una jerarquía, permitiendo que elementos diversos y frecuentemente inconmensurables sean comparados unos con otros de forma racional y consistente. Esta capacidad distingue el AHP de otras técnicas para tomar decisiones. En el paso final del proceso, las prioridades numéricas son calculadas para cada una de las alternativas de decisión. Estos números representan la habilidad relativa de las alternativas para lograr el objetivo de la decisión, de modo que permita una consideración directa de los diferentes cursos de acción [Saaty, 2008].

Aun cuando puede ser usado por quienes que trabajan en decisiones simples, el Proceso Analítico Jerárquico es más útil cuando las personas trabajan con equipos en problemas complejos, especialmente en aquellos con asuntos o inversiones de altos intereses, que involucran percepciones y juicios humanos, cuyas resoluciones tienen repercusiones a largo plazo. Tiene ventajas únicas, cuando los elementos importantes de la decisión son difíciles de cuantificar o comparar, o cuando la comunicación entre los miembros del equipo es impedida por sus diferentes especializaciones, terminologías o perspectivas.

Usar el AHP involucra la síntesis matemática de numerosos juicios sobre el problema de decisión que se esté tratando. No es raro que en un mismo modelo se realicen docenas o incluso cientos de juicios. Mientras la matemática se puede hacer a mano usando calculadoras, es común encontrar muchos métodos computarizados que permiten ingresar y sintetizar los juicios. El más simple software involucra hojas de cálculo estándar, i.e. el Microsoft Excel; el más complejo usa software a la medida, que con frecuencia involucra dispositivos adicionales especializados para registrar los juicios de decisores congregados en una sala de reunión.

Los procedimientos para usar el AHP según [Saaty, 1999], pueden ser resumidos en:

1. Modelar el problema como una jerarquía que contenga el objetivo de la decisión, las alternativas para alcanzarlo y los criterios para evaluar esas alternativas.
2. Establecer prioridades de los elementos de la jerarquía estableciendo una serie de juicios basados en comparaciones por pares de elementos. Por ejemplo, cuando se comparan posibles compras de bienes raíces, los inversionistas pueden decir si ellos prefieren la ubicación sobre el precio, y el precio más que al estilo.
3. Sintetizar los juicios para establecer un conjunto de prioridades globales de la jerarquía. Así se comparan los juicios de los inversionistas sobre la ubicación, el precio y el estilo de las propiedades A, B, C, y D en las prioridades generales de cada propiedad.
4. Revisar la consistencia de los juicios.
5. Llegar a una decisión final basada en los resultados de este proceso.

La aplicación de estos pasos en este trabajo se describe con más detalle a continuación, pero antes se deben mencionar al menos los indicadores para la evaluación, que son en definitiva el objeto de cada decisión. Porque el enfoque anterior de la metodología es muy general y en la práctica se toma en consideración la terminología propia del problema para aplicar AHP, que en este caso es la evaluación del hábitat y la vivienda, según normas cubanas.

Indicadores y atributos para el diseño del modelo de evaluación

En Acosta [2011], se obtuvieron los indicadores y atributos para la evaluación obtenidos a partir del juicio del autor sobre las normas cubanas NC166, NC219, NC220 y NC641. Dichos indicadores fueron utilizados en

fichas de evaluación de urbanismo y viviendas, y fue precisamente de estas fichas de donde se tomaron los mismos para este trabajo

[NC 53-142, 1985; NC 166, 2002; NC 219, 2002; NC 220-1, 2002; NC 2002-2, 2005 y NC 198, 2004].

Los indicadores a emplear en cualquier metodología de evaluación deben estar bien definidos, ser exhaustivos y no redundantes. A criterio de este autor, los indicadores definidos por Acosta [2011] abordan en toda su extensión los aspectos relacionados con el hábitat urbano y de la vivienda, según las normas cubanas. Un problema es que presentan cierto grado de reiteración de ideas y ambigüedad, lo que dificulta el proceso de evaluación y redundante en una no muy clara definición de cada uno de ellos. No obstante, estos van a ser los indicadores y atributos a emplear en el desarrollo de esta investigación.

En el marco urbano se presentaron los indicadores y atributos. Por otro lado, en las tablas se presentan los indicadores y atributos obtenidos en [Acosta, 2011] para aplicar a la vivienda, según las normas cubanas.

En el marco del indicador U1 sobre la trama urbana, se tiene en cuenta si la red vial está orientada en las direcciones noreste-suroeste y noroeste-sureste, con la finalidad de proporcionar mayor sombra al peatón, a la superficie de la vía y a las fachadas de sus edificios paralelos.

Precisamente a la orientación se refiere el atributo U12. Los atributos U13, U14, U15 y U16 pueden interpretarse según su nombre, sin demasiada ambigüedad. El problema está en el atributo U11, denominado Condiciones de la Trama Urbana; pero como no están definidas a qué condiciones se refiere, esto trae consigo un serio problema para evaluarlo.

En el instructivo de Acosta [2011] se menciona, con respecto al indicador U2 de urbanismo, que la altura mínima media que deben tener los edificios y otros elementos para influir en el sombreado de una vía, o sobre cualquier otro elemento urbano, será la estipulada por las regulaciones urbanas y por la norma NC219. Los edificios en zonas con áreas descubiertas deberán tener balcones. La proyección horizontal de los balcones o cualquier otro elemento que actúe como protección solar de las fachadas de los edificios, y de los espacios exteriores adyacentes, deberá tener como mínimo las dimensiones que aparecen estipuladas por dicha norma, de acuerdo con la orientación de la fachada.

Con respecto a los indicadores U3, U4 y U5, se encontró que los patios deben permanecer descubiertos para que cumplan su función térmica. En zonas con tipología compacta, con 15% de superficie descubierta, los patios no deben estar vinculados físicamente a la calle ni a otros espacios más calientes o contaminados. En las restantes zonas se recomienda lo

mismo cuando estos no tienen una buena permeabilidad al aire. En patios grandes el área de piso será como máximo 20% de la superficie total descubierta del patio. Puede llegar a 40% siempre y cuando los materiales utilizados sean semejantes a los recomendados para las plazas y parques. Los patios rectangulares deberán orientarse, siempre que la ubicación del lote en la manzana y sus proporciones lo permitan, con su eje longitudinal en la dirección Norte-Sur. En los casos con orientaciones diferentes deben existir aleros, galerías u otros elementos que protejan las paredes y pisos del sol, y se dimensionarán según la norma.

También relacionado con los indicadores U3, U4 y U5, se encontró en el instructivo de [Acosta, 2011] que al ubicar el arbolado se deben priorizar las fachadas oeste, suroeste, sureste, este y sur. Las avenidas y calles entre 25 y 50 m, y entre 14 y 25 m, llevarán arbolado en parterres o paseos, cuyo follaje ocupe entre 40 y 60% del área de la vía.

En calles de entre 10 y 14 m, en dependencia de su ancho y de la existencia de parterres, se debe tener un follaje cuyo arbolado ocupe 30% del área de la vía.

La superficie de los parques debe ser mayor de 1 ha, de forma tal que se pueda lograr un microclima apropiado para las funciones a que se destinan estos espacios, y a la vez mejorar el ambiente urbano. Los parques deberán tener, como mínimo, 60% de su superficie sombreada por árboles maduros, porcentaje que puede verse incrementado con pérgolas u otros elementos de sombreado. En el caso de un parque menor de 1 ha, deberá tenerse en cuenta su ubicación en la manzana y la protección que le ofrecen los edificios que lo rodean con respecto al sol y al viento, en el sentido de si favorecen o no el diseño.

Sobre el indicador U6 de urbanismo, se obtuvo que los parqueos construidos fuera de los edificios deben estar arborizados, de forma que el follaje de los árboles adultos cubra como mínimo 60% de su superficie.

Para el diseño y la evaluación del hábitat bioclimático de la vivienda, el instructivo de Acosta [2011] se refiere según la NC641. Del indicador U1 sobre la vivienda, la norma presenta una serie de factores, los cuales son tomados como los atributos desde el U11-U16. Estos factores son la resistencia mecánica, seguridad en caso de incendio, higiene, salud y medioambiente, protección contra el ruido, uso racional de la energía, acondicionamiento térmico, suficiencia de la iluminación natural, ventilación y durabilidad.

El coeficiente de ocupación del suelo, COS, estará en dependencia de las regulaciones urbanas del contexto específico donde la vivienda o el edificio de viviendas se ubiquen.

Es recomendable que la ocupación del suelo no sea inferior a 40%, ni superior a 70%.

La relación directa entre los espacios con función principal y el exterior, puede ser también a través de balcones, terrazas o portales que garanticen la protección de los cierres contra el sol y la lluvia, pero nunca a través de espacios de uso común con otras viviendas, como son los pasillos de circulación. En conjunto con lo anterior, para favorecer su durabilidad, todos los cierres exteriores deberán estar protegidos del sol y de la lluvia, todo lo cual es abordado por el indicador U2 del marco de la vivienda.

Sobre el U2 también se tiene que la lluvia no debe escurrirse por largos tramos de superficies verticales, sin elementos horizontales que lo interrumpan. Los ángulos mínimos ideales para la protección solar en paredes exteriores, en las cuatro orientaciones principales, deben ser: 80° al norte, 50° al sur y 45° al este y oeste. No obstante, un alero perimetral de 0,60 m de proyección horizontal puede resultar efectivo en cualquier orientación para puntales de hasta 2,70 m.

Para el indicador U3 del marco de evaluación de la vivienda, la NC641 establece que los espacios no constituyen necesariamente locales con cierres considerables, excepto en los baños que siempre serán espacios cerrados. Los balcones y patios de servicio deberán ser espacios lo más abiertos posibles.

En viviendas estudio o en etapas iniciales de algunos tipos de vivienda progresiva, puede darse que la sala de estar esté vinculada al comedor y que la cocina sea independiente.

En otros tipos de viviendas se pueden encontrar integrados el estar-comedor-cocina o el comedor-cocina.

Se debe evitar la orientación de dormitorios al oeste. No obstante, si no existe otra alternativa, esa pared exterior hacia el oeste deberá estar protegida. Los dormitorios orientados al sur deberán estar siempre protegidos. Las cocinas deben ubicarse, siempre que sea posible, hacia aquellas orientaciones que requieren de una menor protección solar, preferiblemente en los entornos norte o sur. Ubicar hacia las orientaciones más desfavorables, como al oeste, espacios como el baño en el cual se permanece por poco tiempo, o espacios abiertos como los de lavar y tender, que pueden servir de protección para otros espacios interiores, es a lo que se refiere el indicador U3.

El indicador U4 se refiere a la norma NC166. Sus atributos U41-U44 fueron mencionados en el instructivo [Acosta, 2011], pero la argumentación es insuficiente en el sentido de no poder especificar lo correcto o lo incorrecto.

En tal caso el resultado dependerá de los conocimientos y la preparación sobre el tema, por parte del especialista que evalúe el indicador.

El indicador U5 es sobre la ventilación, algo que aparece en varias de las normas. No obstante, en la norma NC220 se esclarece gran parte de lo que este autor planteó para este indicador.

En la NC220 se establece que el área libre total mínima para ventilación natural en cada espacio, debe de estar entre 15 y 20% del área de piso. Como mínimo deben haber 2 aberturas operables al exterior en paredes adyacentes u opuestas, y se acepta que una de ellas sea con abertura fija. En una sola pared para la ventilación, no debe colocarse más de 70% del área libre total. Los espacios con una sola pared al exterior deben disponer de dos ventanas a cada lado de una pantalla vertical perpendicular a la ventana, pero no debe situarse más de 70% del área libre total a un solo lado de la pantalla. Cuando no sea posible lograr en la fachada el área libre total mínima para ventilación, es recomendable que las puertas interiores tengan aberturas o un elemento que permita mantenerlas abiertas. Esto no se aplica para las puertas de entrada en habitaciones de huéspedes de hoteles y moteles.

Los espacios provistos de instalación para ventiladores de techo, deben tener una salida por cada 36 m² de área de piso. Cuando haya más de una salida en un espacio, las salidas deben estar distribuidas uniformemente a través del local. Están exentos las cocinas y aquellos espacios que empleen diseños específicos de ventilación natural, siempre que se demuestre que cuentan con condiciones adecuadas de movimiento de aire, temperatura y humedad para el confort humano.

Los cierres de vanos en espacios que funcionan con aire acondicionado, deberán ser herméticos para garantizar infiltración o fuga de aire mínimas. Los cierres de vanos que puedan cerrarse, pero no herméticamente, tales como ventanas de persianas, no pueden ocupar más de 2% del área de la pared que conforma el espacio. Las entradas a los edificios de uso público con aire acondicionado deben tener cierre automático para minimizar la infiltración o fugas de aire. Las juntas exteriores, grietas y huecos en los componentes de la envolvente del edificio con aire acondicionado, deben ser sellados para evitar la infiltración o fugas de aire.

Todo lo anterior con respecto a la ventilación y la norma NC220, debe tomarse en cuenta para evaluar el indicador U5 de la evaluación de la vivienda.

Puesta en práctica del método AHP

Para determinar las puntuaciones P_j de los indicadores o atributos para la evaluación, se debe establecer una escala que permita identificar el estado de los mismos. Para efectuar dicha evaluación se proponen cuatro estados, cuyas puntuaciones asociadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Puntuaciones para evaluar el comportamiento de los indicadores de evaluación

Estado	Puntuación, P_j
Excelente	9
Bien	7
Regular	5
Mal	3

Resulta necesario destacar que la razón por la cual se establecen cuatro estados de evaluación, radica inicialmente en que si los criterios están bien es porque han alcanzado un nivel de desempeño óptimo. Si están bien se harán todos los esfuerzos posibles para lograr la excelencia, lo que implica alcanzar niveles superiores en su comportamiento. Por otro lado, se corre el riesgo de que los criterios presenten algún grado de deterioro, por lo que se hace necesario establecer una categoría de regular, que representa la antesala de la peor de las categorías a asignar, que es de mal, e implica el deterioro total del indicador.

Es evidente que entre los indicadores y sus respectivos atributos existen diferencias en cuanto a su incidencia en la evaluación final. Dicho de otra manera, la forma en que tributa el peso de la evaluación de un indicador en la evaluación final, casi siempre es diferente a la del resto. Con el objetivo de tener en cuenta estas diferencias, se deben establecer prioridades o grados de importancia de cada uno de ellos con respecto a los restantes.

Para determinar la importancia relativa de los indicadores, o de los atributos IR_j , se utilizarán las comparaciones pareadas establecidas por Saaty, [2008]. El método AHP es seleccionado por su demostrada factibilidad de aplicación, y los números que sugiere este autor para expresar los grados de importancia entre dos indicadores aparecen en la tabla 2.

Los números pares 2, 4, 6 y 8, son usados para representar acuerdos equitativos entre las preferencias de la tabla 2.

Tabla 2. Valores sugeridos para realizar las comparaciones pareadas en el método AHP

Si el atributo x es... que el atributo y	el número de importancia por asignar es
Igualmente importante	1
Apenas más importante	3
Bastante más importante	5
Mucho más importante	7
Absolutamente más importante	9

Fuente: [Saaty, 2008].

Antes de comenzar es necesario determinar el número de expertos que intervienen en las comparaciones pareadas de los indicadores de evaluación, para lo cual es utilizada la fórmula siguiente, como se muestra en Acosta, [2011]:

$$M = \frac{p(1-p)k}{i^2} \quad (1)$$

Donde:

M : Cantidad necesaria de expertos

p : Error estimado

k : Constante cuyo valor está asociado al nivel de confianza

i : Precisión deseada en la estimación

Posterior a ello se aplican los pasos habituales para el desarrollo del método AHP, los cuales son:

1. Construir la matriz de comparaciones pareadas a partir del criterio y consenso de los expertos: vector A.
2. Normalizar el vector A, dividiendo cada elemento por la suma de su columna.
3. Calcular el vector de pesos B), sumando las filas normalizadas y calculando el promedio de cada elemento.
4. Multiplicar el vector A por el vector B, obteniéndose el nuevo vector C.

5. Dividir cada elemento del vector C por su elemento correspondiente en el vector B, dando al traste con el nuevo vector D.
6. Calcular el valor propio máximo $\lambda_{m\acute{a}x}$.
7. Calcular el índice de inconsistencia II .
8. Calcular la Razón de Inconsistencia RI .

Teniendo en cuenta los estudios empíricos realizados por Saaty [2008], se acepta un valor de RI igual o menor a 0,10. En caso de inconsistencia se debe revisar la matriz en busca de no transitoriedad.

Es oportuno aclarar que los pesos aquí determinados no tienen un carácter estático, dado que responden a los intereses de los especialistas y a los objetivos de trabajo de la entidad. Es por ello que deben ser revisados cada vez que se acomete un nuevo proceso evaluativo.

La evaluación final es calculada a partir de las puntuaciones y pesos de importancia obtenidos para los indicadores en pasos anteriores. Su expresión de cálculo se muestra en [Álvarez, 2009] y es la siguiente:

$$e_{URB} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n P_i IR_i}{9} \right] 100 \quad e_{VIV} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n P_i IR_i}{9} \right] 100 \quad (2)$$

Donde:

e_{URB} : Evaluación del hábitat urbano, %

e_{VIV} : Evaluación del hábitat de la vivienda, %

IR_i : Peso de importancia obtenido para el indicador j

n : Cantidad de indicadores específicos

A partir de los resultados obtenidos con la expresión anterior es posible caracterizar el hábitat, otorgándole una calificación en función de los posibles estados en los que puede encontrarse según la evaluación. Los rangos que marcan los posibles estados se pueden obtener evaluando las ecuaciones anteriores con los valores medios de las puntuaciones de la tabla 2, es decir, las puntuaciones pares 4, 6, 8 y los pesos determinados anteriormente. Los rangos obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 . Rangos para la evaluación según el valor obtenido para $eURB$ y $eVIV$

Estado	Rangos, %
Excelente	$eURB > 89$
Bien	$67 < eURB \leq 89$
Regular	$44 < eURB \leq 67$
Mal	$eURB \leq 44$

Al igual que los indicadores generales $eURB$ y $eVIV$, para conocer el comportamiento detallado de los indicadores específicos que se proponen, resulta necesario definir un conjunto de rangos o intervalos para cada uno de ellos. De esta forma se identifica el estado en que se encuentran los mismos con respecto a su comportamiento ideal, y las deficiencias fundamentales. Los rangos que se definen en este paso constituyen la base para la mejora continua de los diseños futuros, por lo que irán alcanzando, cada vez, niveles superiores que tributen al incremento paulatino del desempeño de los indicadores de evaluación. Esto es así, porque los rangos se establecen teniendo en cuenta el buen ejercicio de la evaluación y deben involucrar también valores obtenidos a través su análisis histórico, tanto en períodos de éxito como de decadencia. Deben considerarse, también, las recomendaciones que en este sentido aparecen en cuanto a la práctica mundial, específicamente las correspondientes a países de América Latina y el Caribe, por ser los más afines a Cuba.

Para comenzar se puede usar el mismo juicio de la tabla 3, ponderando la evaluación del indicador específico según la siguiente ecuación [Saaty, 2008]:

$$eU_i = \left[\frac{\sum_{j=1}^m P_j IR_j}{9} \right] 100 \quad (3)$$

Donde:

eU_i : Evaluación del indicador específico, %

IR_j : Peso de importancia obtenido para el indicador j

m : Cantidad de atributos

Aplicación y discusión de los resultados

Como material de estudio se emplea una solución de vivienda aislada, con criterios bioclimáticos en su diseño, de dos niveles, localizada en el reparto Escambray, al sureste de la ciudad de Santa Clara, la cual se desarrolla fundamentalmente en el primer nivel, localizándose en el segundo solamente una habitación, baño y terraza. En su ejecución se empleó una combinación entre el Sistema Constructivo SANDINO y el de Muros de Bloques de Hormigón de 15 cm. En la cubierta se emplea como estructura un sistema de viguetas de hormigón con reforzamiento de acero y tabletas de hormigón armado, combinado con tejas criollas como cubierta exterior; su inclinación posee diferentes pendientes, dadas por su orientación (Figs. 1 y 2).

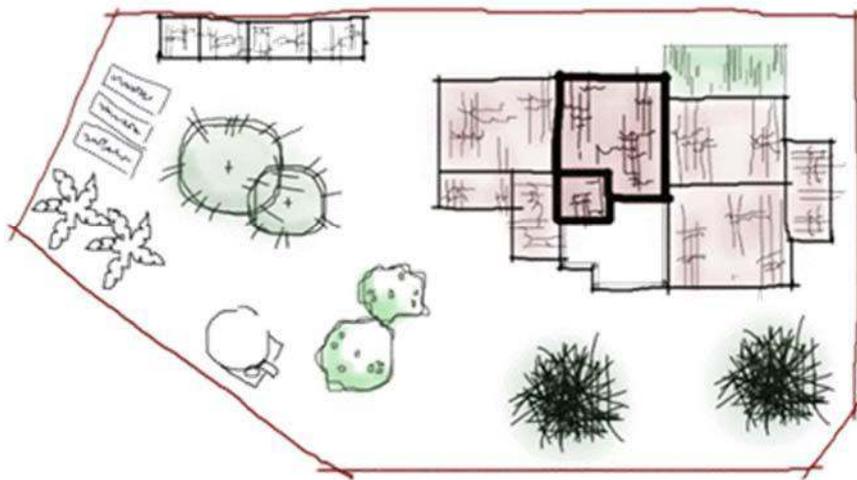


Fig. 1. Esquema de la planta de la vivienda.



Fig. 2. Esquemas generales de la vivienda.

Evaluación cualicuantitativa del entorno urbano

Se muestran en el cuadro o tabla las variables a evaluar, los atributos a medir y los resultados. Dichas variables vienen dadas por la trama urbana, alturas de los edificios, áreas verdes y su diseño, uso de la vegetación como diseño y ambiente, parques, plazas y parqueos (Tablas 4 y 5, y Fig. 3).

Tabla 4. Variables tomadas en cuenta para la evaluación del entorno urbano

	VARIABLES		ATRIBUTOS	PESO INDICADOR
U1	Trama urbana	U11	Condiciones de la trama urbana	0,0976
		U12	Orientación de la red vial	
		U13	Pavimentación de las vías o adoquinación	
		U14	Las calles tienen las dimensiones normadas	
		U15	Presencia de aceras	
		U16	La retícula facilita la circulación del viento	
U2	Altura de los edificios y otros elementos urbanos	U21	Cumple con las regulaciones urbanas para la zona	0,0550
		U22	Permite proyectar sombras sobre vías y aceras	
		U23	Existen balcones, aleros y otros elementos que proyectan sombras	
U3	Áreas verdes	U31	Existen áreas verdes públicas	0,3236
		U32	Existen áreas verdes privadas	

		U33	Las edificaciones se encuentran separadas de la vía por una franja verde	
		U34	Los patios se encuentran delimitados físicamente de la calle u otros lugares más calientes	
U4	Uso de vegetación	U41	Existe vegetación y el porcentaje existente es el normado	0,1682
		U42	Se protegen a través del uso de vegetación las fachadas	
		U43	La vegetación protege las circulaciones	
		U44	Se utiliza vegetación en las áreas verdes privadas	
U5	Plazas y parques	U51	Existen parques o plazas	0,3236
		U52	Su superficie es mayor de 1 ha	
		U53	Su área de sombra es mayor de 60%	
		U54	Recibe protección de edificios y vegetación	
U6	Parqueos	U61	Existen parqueos tanto privados como públicos	0,0320
		U62	Se encuentran protegidos (condiciones ambientales)	

Tabla 5. Proceso de la evaluación del entorno urbano

Peso atributo	Evaluación				Evaluación				Evaluación indicadores específicos	
	E	B	R	M	E	B	R	M		
	9	7	5	3						
0,2504		1			0	1,75285	0	0	67,48653167	0,592921737
0,4348			1		0	0	2,174	0		
0,0858		1			0	0,6007	0	0		
0,1501		1			0	1,05044	0	0		
0,0283			1		0	0	0,1415	0		
0,0506		1			0	0,35426	0	0		
0,6333		1			0	4,43342	0	0	69,6299049	0,344978913
0,2605			1		0	0	1,3025	0		
0,1062			1		0	0	0,5308	0		
0,5920			1		0	0	2,9598	0	64,62300097	1,881903434
0,2620		1			0	1,83419	0	0		
0,1007		1			0	0,70473	0	0		
0,0453		1			0	0,31732	0	0		
0,5920			1		0	0	2,9598	0	56,56292588	0,855997206
0,2620			1		0	0	1,3101	0		
0,1007			1		0	0	0,5034	0		
0,0453		1			0	0,31732	0	0		

0,5920	1				5,3277	0	0	0	82,87247949	2,413351305
0,2620			1		0	0	1,3101	0		
0,1007			1		0	0	0,5034	0		
0,0453		1			0	0,31732	0	0		
0,7500		1			0	5,25	0	0	72,22222222	0,208266594
0,2500			1		0	0	1,25	0		
										69,97

Evaluación indicadores específicos

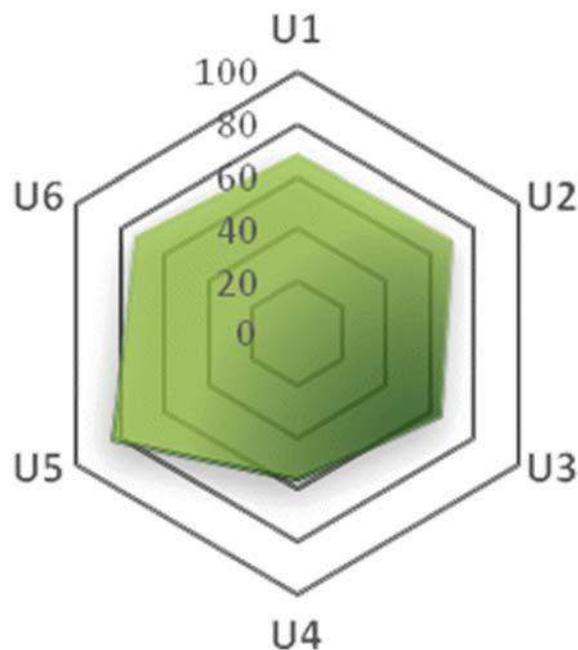


Fig. 3. Resultado de la evaluación del entorno urbano.

Evaluación cualicuantitativa de la vivienda

Los criterios de diseño de la vivienda parten del análisis ambiental realizado al lugar de emplazamiento: el régimen de las brisas, la trayectoria solar y la ubicación física para la zonificación de los espacios interiores; además, se toma en cuenta que la principal afectación climática en Cuba son las fuertes precipitaciones, por lo cual es necesario garantizar la adecuada esorrentía

de las aguas. Como resultado de estos criterios sencillos se logra una solución cuya permeabilidad al viento se potencia con el uso de grandes paños de ventanas en la dirección noreste, que junto a una zonificación concebida para aprovechar la carga térmica hacia los locales húmedos (cocina, baño y patio de servicio), garantizan una buena ventilación de los espacios interiores. La carga térmica se reduce con el uso de vegetación en los espacios exteriores y con las pendientes dadas a las cubiertas.

Estos criterios contribuyen no solo a garantizar un confort ambiental, sino que a su vez repercuten en un considerable ahorro en lo energético, ya que se disminuyen el uso de equipos de climatización artificiales (Tablas 6 y 7, Fig. 4).

Tabla 6. Variables tomadas en cuenta para la evaluación de la vivienda

	Variables		Atributos	Peso indicador
U1	Condiciones de habitabilidad	U11	Resistencia mecánica	0,0914
		U12	Seguridad en caso de incendio	
		U13	Higiene, salud y medioambiente	
		U14	Protección contra ruido urbano	
		U15	Uso racional de la energía y acondicionamiento térmico	
		U16	Durabilidad	
U2	Solución volumétrica	U21	COS (entre 40% y 70%)	0,0462
		U22	Relación con el exterior que garantice iluminación natural, ventilación, visuales y privacidad	
		U23	Dimensiones volumétricas mínimas y proporciones	
U3	Solución espacial	U31	Dimensiones espaciales mínimas y proporciones	0,3494
		U32	Estar	

		U33	Comedor	
		U34	Cocina	
		U35	Dormitorios	
		U36	Servicio sanitario	
		U37	Patio de servicio	
		U38	Espacios para circulación, almacenamiento, balcón, portal o terraza	
U4	Ambiente interior	U41	Caudal y calidad del aire	0,1635
		U42	Ambiente término adecuado	
		U43	Visuales	
		U44	Ambiente acústico	
U5	Ventilación	U51	Cantidad de vanos	0,3494
		U52	Disponibilidad de los vanos hacia el caudal de aire	
		U53	Área libre total mínima para ventilación natural (entre 15% y 20%)	
		U54	Las ventanas permiten captar el flujo de aire	
		U55	Ventilación artificial	

Tabla 7. Resultados del proceso de la evaluación de la vivienda

Peso atributos	Evaluación				Evaluación				Evaluación indicadores específicos	
	E	B	R	M	E	B	R	M		
0,0976	1				0,879	0	0	0	84,62418979	0,695898183
0,0550	1				0,495	0	0	0		
0,3236	1				2,912	0	0	0		
0,1682			1		0	0	0,8408	0		
0,3236		1			0	2,265	0	0		
0,0320		1			0	0,2243	0	0		
0,6232	1				5,609	0	0	0	91,62721619	0,381326017
0,2395		1			0	1,6764	0	0		
0,1373		1			0	0,961	0	0		
0,1250		1			0	0,875	0	0	97,22222222	3,057602533
0,1250	1				1,125	0	0	0		
0,1250	1				1,125					
0,1250	1				1,125	0	0	0		
0,1250	1				1,125					
0,1250	1				1,125					
0,1250	1				1,125					
0,1250	1				1,125	0	0	0		
0,2500	1				2,25	0	0	0	83,33333333	1,226303426

0,2500		1			0	1,75	0	0		
0,2500		1			0	1,75	0	0		
0,2500		1			0	1,75	0	0		
0,2000	1				1,8	0	0	0	95,55555556	3,0051866489
0,2000	1				1,8	0	0	0		
0,2000	1				1,8	0	0	0		
0,2000	1				1,8		0			
0,2000		1			0	1,4	0	0		
										92,96

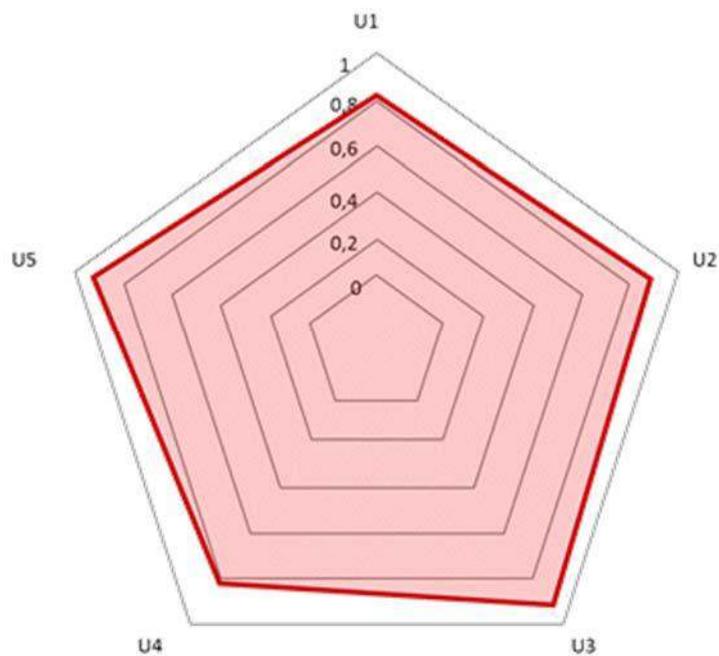


Fig. 4. Resultado de la evaluación de la vivienda.

Certificación energética de la vivienda

Se ilustran en cuadro o tabla resumen todos los análisis realizados (Fig. 5), así como el resumen del proceso de certificación energética ambiental de

una vivienda. Este resultado ejemplifica que el empleo de los enfoques bioclimáticos en el diseño potencia los mejores resultados en cuanto a la calidad y el confort en la solución de la vivienda.

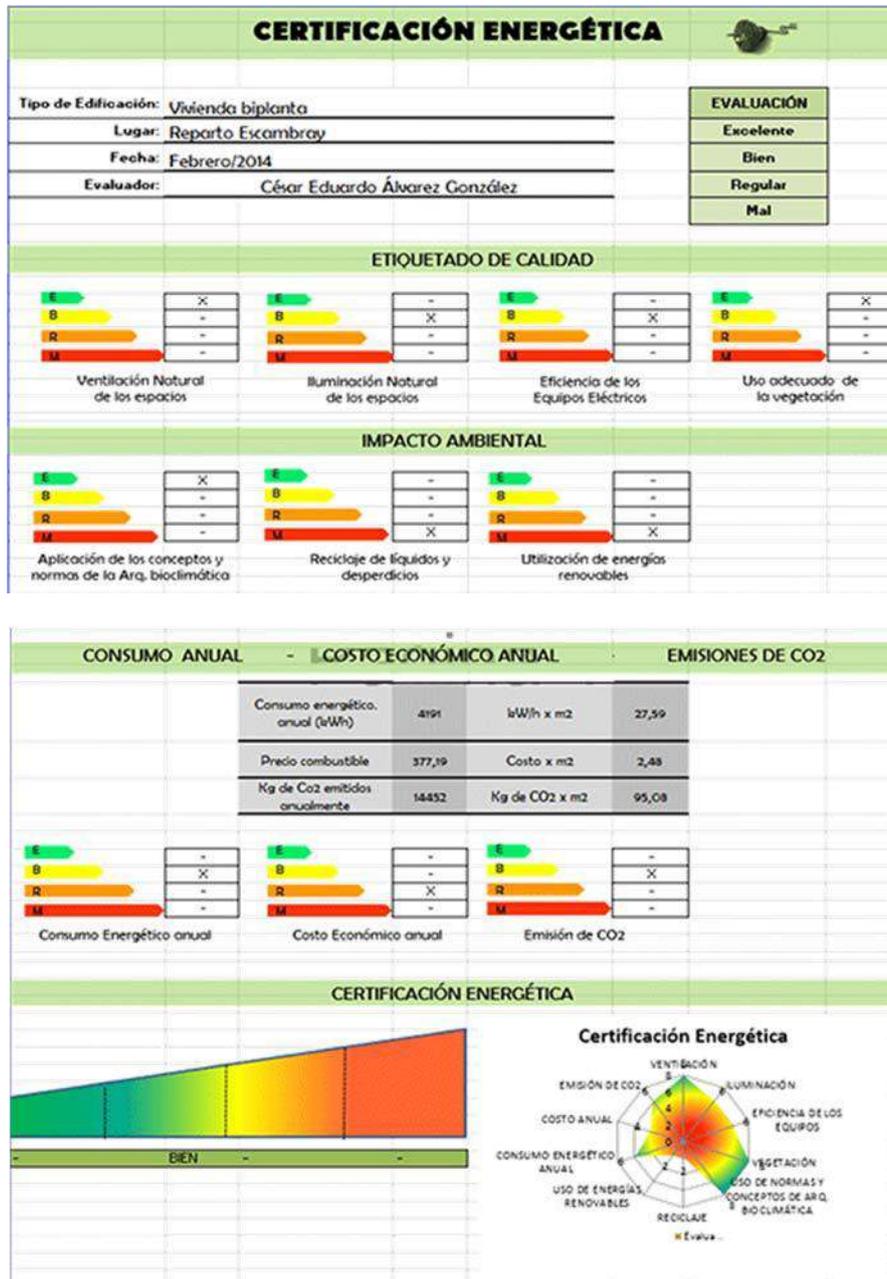


Fig. 5. Cuadro resumen de la certificación energética ambiental de la vivienda

Conclusiones

La herramienta diseñada permitirá no solo evaluar de forma cualicuantitativa el comportamiento real del urbanismo y las viviendas en sus aspectos ambientales, energéticos y cumplimientos de las normas, sino que servirá como punto de partida para la futura realización de una herramienta más integral que pudiera abarcar el hábitat en las dimensiones ambiental y energética que maneja el proyecto Hábitat 2, y brindarle así a los gobiernos, empresas de proyecto y planeamiento una base real para las futuras tomas de decisiones en políticas y técnicas a adoptar. Su aplicabilidad queda demostrada en la solución urbana y de vivienda tomada como estudio de caso; su automatización, sencillez y profesionalidad están en correspondencia con métodos similares que se aplican en la actualidad. La aplicación del método, modelo o herramienta apunta a las variables, indicadores y atributos de mayor deficiencia en cada solución urbana y de arquitectura de vivienda, en correspondencia con la aplicación de las normas y los conceptos validados, y permite dirigir acciones para sus soluciones.

Referencias

- ACOSTA, YUSEL (2011). «Diagnóstico de la envolvente opaca, confort térmico y eficiencia energética en las tipologías I, II y III en Santa Clara», Trabajo de Diploma, 2011.
- ÁLVAREZ, ARNOLDO (2009). «Vivienda bioclimática en Santa Clara», en *Vanguardia*, 21 de junio, 2009.
- CRESPO, E. O. (2010). «Procedimiento para el diseño de rutas en el servicio de recolección general de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Manicaragua». Tesis de Maestría, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2010.
- NC 53-142: 1985 (1985). *Variables climáticas para la física de la arquitectura*.
- NC 166: 2002 (2002a). *Edificaciones. Principios generales para el diseño ambiental de los espacios interiores de los edificios*.
- NC 220-1: 2002 (2002b). *Edificaciones. Requisitos de diseño para la eficiencia energética. Parte 1: Envolvente del edificio*.
- NC 219: 2002 (2002c). *Urbanismo. Código de buenas prácticas para el diseño ambiental de los espacios urbanos*.
- NC 198: 2004 (2004). *Edificaciones. Código de buena práctica para el diseño del clima interior térmico y visual*.
- NC 2002-2: 2005 (2005). *Edificaciones. Requisitos para la eficiencia energética. Parte 2. Potencia eléctrica e iluminación artificial*.

SAATY, T. L. (2008). «Relative Measurement and its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors the Analytic Hierarchy/Network Process», en RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas, 102: 2008.

Evaluación técnico económica y ambiental del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro para la obtención de lupias de arrabio

Economic, environmental and technical evaluation of the metallurgical treatment of Nicaro plant industrial solid residues to obtain cast iron

*Por Dr.C. Yosvany Ferreiro Guerrero**,

*M.Sc. Emilio Leyva Ramírez**,

*M. Sc. Alexeis Sánchez Cruz**,

*Lic. Maylín Arderí Aldana***

*y Lic. Ramona Molina González***

**Centro de Investigaciones Siderúrgicas,*

Mayarí, Holguín, Cuba.

***Centro Universitario Mayarí, Holguín, Cuba.*

e-mail: yosvany@dsit.cu

Resumen

Los residuales sólidos industriales (colas) de la empresa niquelífera Comandante René Ramos Latour, localizada en Nicaro, constituyen una gran fuente contaminante del aire, el agua y los suelos en el nordeste holguinero. En este trabajo se exponen los resultados de su tratamiento metalúrgico con vistas a disminuir el déficit de chatarras de aceros existente en el país. Se demuestra por primera vez en Cuba que es posible la obtención de lupias de arrabio a partir de dichos residuales, siendo los procesos que emplean Hornos de Hogares Rotatorios los más factibles desde los puntos de vista técnico-económico y ambiental, a partir de los cuales, empleando la tecnología ITMK3, sería posible la obtención de 500 000 t de lupias de arrabio anuales, que representaría 166 % de la producción actual de acero en Cuba. Con su empleo se reduciría el consumo energético en 3 GJ/t de metal caliente de 10 GJ/t empleados por la vía de alto y minialto hornos, además de reducir la emisión de 1 t de CO₂ por cada tonelada de metal caliente. Los resultados de las caracterizaciones de las lupias obtenidas, arrojaron la presencia de valiosos elementos aleantes como el cromo, silicio, níquel, manganeso, cobalto y vanadio, entre otros, a partir de las cuales se pueden obtener aceros de baja aleación al cromo y níquel, e inoxidable. Se revela la presencia de la fase cordierita en las escorias generadas en el proceso de reducción, las cuales son una potencial fuente de materia prima para la industria cerámica. El estudio de factibilidad realizado demuestra que es factible producir lupias de arrabio en Cuba a partir del residuo industrial estudiado. **Palabras clave:** Lupias de arrabio, reducción carbotérmica, residuos sólidos industriales, pelets autorreducibles

Abstract

The industrial solid waste of the Nickel Company Comandante René Ramos Latour, located in Nicaro, is a major pollutant source of air, water and soil in Northeast of Holguin. In this paper, the results of its metallurgical treatment are presented in order to reduce the deficit of steel scrap existing in the country. It is demonstrated for the first time in Cuba that it is possible to obtain cast iron from the aforementioned residues, being the Rotary Household Furnaces the most viable processes from the technical-economic and environmental points of view. Using the ITMK3 technology, it would be possible to obtain 500 000 t of annual cast iron, which would represent 166% of the current steel production in Cuba. With its use, the energy consumption would be reduced by 3 GJ/t of hot metal of 10 GJ/t used by high and mini-kilns, in addition to reducing the emission of 1 t of CO₂ per ton of hot metal. The results of the characterizations of the cast iron obtained, showed the presence of valuable alloying elements such as chromium, silicon, nickel, manganese, cobalt and vanadium, among others, from which low chromium and nickel alloy stainless steels can be obtained. The presence of the cordierite phase is revealed in the slag generated in the reduction process, which is a potential source of raw material for the ceramic industry. The feasibility study carried out shows that it is feasible to produce cast iron in Cuba from the industrial waste studied.

Keywords: cast iron, reduced carbothermal, industrial solid residues, self-reducible pellets

Introducción

En la actualidad existen dos rutas principales para la reducción de minerales de hierro y posteriormente la fabricación de acero. Estas rutas conocidas como Horno Alto – Convertidor y Reducción Directa (RD) – Horno de Arco Eléctrico (HAE), son los procesos que producen la mayoría del acero que se consume en el mundo. La primera vía es eficiente, pero existe la tendencia a ser sustituida por el proceso de reducción directa en forma de miniplantas integradas que utilizan la vía RD - HAE [Aguilar, Fuentes y Viramontes, 2003].

En el período entre 2010 y 2012 se produjeron como promedio 1504,92 x 10⁶ t de hierro en el mundo, siendo el principal productor China, con 45,57 % del total (685,75 x 10⁶ t), seguido por Japón (108,14 x 10⁶ t), Estados Unidos (85,196 x 10⁶ t), India (73,34 x 10⁶ t) y Rusia (68,74x 10⁶ t). Estos cinco países agruparon 67,86 % de la producción mundial de hierro, la que ha sido dominada por el horno alto; en los últimos tres años fueron producidas un promedio de 1084,08 x 10⁶ t de arrabio, además de

70,62 x 10⁶ t de hierro esponja o DRI, sigla en inglés del término *Direct Reduced Iron* [Steel Statistical, 2013].

El principal inconveniente del empleo del horno alto es el tipo de combustible que usa (carbón de coque). El consumo mundial de carbón de coque al cierre del 2012 fue de 290 x 10⁶ t, de un total de 1 208 x 10⁶ t de carbón [World Coal, 2012].

Conjuntamente al problema del coque, se une lo relacionado con la alta escala de producción de un horno alto (entre 1,0 y 4,5 x 10⁶ t de arrabio anuales), la cual le confiere poca flexibilidad. Para reducir la elevada dependencia del coque se ha producido una intensa revolución tecnológica del proceso de horno alto en los aspectos complementarios entre sí, de elevación de la temperatura del viento y de inyección de hidrocarburos a principios de los años 60, o de finos de carbón a principios de los 80 [Conejo, 2000].

El proceso que se emplee como alternativa al horno alto, tomando como referencia su volumen de producción, deberá reunir las características especiales siguientes: posibilidad de eliminar o depender al mínimo del coque, con el empleo de materia prima más barata; eliminar la etapa previa de aglomeración de los finos de mineral de hierro; obtener un producto libre de escoria; aumentar el índice de productividad; lograr un menor consumo de energía; disminuir los costos de inversión y operación; realizar un mantenimiento fácil y de bajo costo; conseguir una operación fácil, flexible y libre de riesgos; así como desarrollar un proceso no contaminante del ambiente [Conejo, 2000].

En Cuba, la producción de aceros se realiza en dos acerías, en Acinox Tunas y la empresa José Martí, con el empleo de 100 % de chatarras de acero mediante la vía del horno de arco eléctrico. La empresa de materias primas le suministra la chatarra de acero a las acerías a un precio inferior al del mercado internacional (la quinta parte aproximadamente); sin embargo, la paulatina disminución de la chatarra de acero ha provocado un desabastecimiento en el sector siderúrgico, y su alto costo en el mercado internacional influye negativamente en los costos de producción del acero en este sector [Ferreiro y Sánchez, 2013].

Desde el 2000 hasta el 2004 la principal afectación en la producción de acero lo constituyó el déficit de energía eléctrica; a partir de ese año comenzaron a disminuir las afectaciones por esta causa y a mediados del 2005 el déficit de chatarras de acero comenzó a ser la principal afectación en la producción de acero en Cuba [Trotman, 2010].

La mayor reserva de hierro en Cuba, se encuentra en los residuos sólidos industriales del proceso de obtención de níquel (colas), tanto por la vía

carbonato amoniacal o proceso Caron (empresa Comandante René Ramos Latour, en Nicaro, y Comandante Ernesto Guevara, en Moa), como por la lixiviación ácida a presión (empresa Comandante Pedro Sotto Alba, en Moa), los que se almacenan en las represas de colas [Ferreiro y Sánchez, 2013].

En Cuba, a pesar de contarse con decenas de millones de toneladas de estos residuales, no es factible el empleo de hornos altos para su procesamiento, debido a que no se cuenta con yacimientos de carbón coquificable que justifiquen la instalación de uno de estos agregados metalúrgicos; de ahí la necesidad de emplear un proceso alternativo al horno alto para procesar esos residuos industriales [Ferreiro y Sánchez, 2013], e ir supliendo aquella con un material metalizado que pueda ser obtenido a partir de minerales nacionales, y de residuales sólidos industriales con apreciables contenidos de hierro.

Los aspectos señalados llevaron a enunciar el siguiente problema científico de la investigación: ¿Cómo obtener un producto metalizado capaz de sustituir las chatarras de acero en la acería cubana, a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro?

Para dar solución a dicho problema se propone como objetivo de la investigación: Realizar tratamiento metalúrgico a los residuos sólidos de la Empresa Comandante René Ramos Latour de Nicaro, para obtener un producto metalizado capaz de sustituir parcialmente las chatarras en la elaboración de acero en Cuba.

Desarrollo

Marco teórico

Los depósitos de lateritas en Cuba constituyen una de las mayores reservas de níquel en el mundo [Cartman, 2012]. En 1905, la *Bethlehem Cuban Iron Co*, en su planta de Pensylvania obtuvo el primer acero del mineral del yacimiento actual en Pinares de Mayarí; ese mineral era nodulizado en hornos rotatorios de calcinación con quemadores a base de carbón pulverizado y exportado hacia Estados Unidos (2 162 000 t entre el 1910 y el 1915); era fundido en altos hornos, produciendo una aleación que se le llamó arrabio Mayarí con la composición química siguiente: C: entre 3,8 y 4,5 %; Si: entre 0,25 y 2,25; P: máximo 0,10 %; S: máximo 0,05 %; Mn: entre 0,6 y 1,0 %; Cr: entre 1,6 y 2,5 %; Ni: entre 0,8 y 1,25 %; Ti: entre 0,10 y 0,20 %; V: entre 0,05 y 0,08 % [Awad, 1966].

En Cuba se han identificado yacimientos de minerales lateríticos en Pinares de Mayarí, Levisa y Moa, aunque actualmente se encuentran en explotación solamente los yacimientos de Moa. En ellos el mineral aparece

como un manto sobre pendientes de suave inclinación, cuyo espesor no excede generalmente los 25 m. Las capas superiores de las lateritas son pobres en níquel (menos de 0,9 %), por lo que son descartadas como no útiles para la industria niquelífera [Ferreiro, 2006].

En Cuba la recuperación del níquel a partir del mineral laterítico se lleva a cabo por las tecnologías siguientes: lixiviación ácida a presión (empresa Comandante Pedro Soto Alba) y la carbonato amoniacal (empresa Comandante Ernesto Guevara); la empresa Comandante René Ramos Latour empleaba esta tecnología, pero cerró en el 2013. Las características de los residuales sólidos están en dependencia de las características del mineral alimentado a las plantas de extracción de níquel y de su eficiencia, las cuales inciden en la composición química de las colas que se generan [Ferreiro, 2006].

Los residuales sólidos de la industria niquelífera en Cuba más estudiados desde la escala de laboratorio a la industrial, han sido las colas de Nicaro (Empresa Comandante René Ramos Latour), estudiadas en Cuba y en distintos países desde la década del 60 del siglo pasado.

En los últimos años (2008-2014), en el DSIT se han realizado una serie de investigaciones encaminadas al empleo de los minerales de hierro y residuales industriales por la vía de la reducción directa y la formación de lupias, e inclusive con mezclas de ellos, tales como:

- Reducción de pelets de concentrado de hierro con cal y bentonita como agentes aglutinantes, empleando carbón antracita como agente reductor.
- Reducción de pelets empleando mezclas del concentrado de Nicaro con las colas de la empresa Pedro Soto Alba.
- Reducción de pelets empleando mezclas de las colas de la empresa Pedro Soto Alba con las de la empresa Che Guevara.
- Reducción de pelets empleando mezclas del concentrado de Nicaro con las colas de la empresa Pedro Soto Alba, usando el carbón dentro del pelet.

En todas estas investigaciones no se superó 60 % de contenido de hierro metálico, y ello corrobora que la vía de Reducción Directa no es factible para los minerales cubanos estudiados.

El hecho de que Cuba no cuenta con reservas de coque metalúrgico, dificulta el empleo de este material por la vía convencional de alto o mini alto horno; de ahí que se busque una alternativa en la presente investigación al someter el residual en estudio a un proceso de reducción que no dependa del coque metalúrgico (simulando las condiciones del

proceso ITMk3). A partir de la necesidad de lograr la separación de las fases escoria-metal en el residuo industrial estudiado, este proceso sustenta la base para el desarrollo de la presente investigación; y la alternativa que se propone se muestra en el esquema siguiente:

Colas de Nicaro → Concentración magnética → Peletización → Reducción → Formación de lupias.

Materiales y métodos

Toma y preparación de la muestra de colas de Nicaro

Las muestras tomadas se corresponden con el área y con el perfil del depósito ubicado en el Dique Viejo; se extrajeron 3740 kg mediante 10 pozos de perforación (18,30 m) con barrenas de espiral o sinfín de 115 mm de diámetro, a 3,0 m de intervalo de sondeo por muestreo y más de 95 % de recuperación. La muestra empleada para la realización de la concentración magnética (1 t) se tomó de los pozos del uno hasta el 10, y de cada intervalo de muestreo se extrajo el material correspondiente según la distribución proporcional por intervalos de un metro. La pila se homogeneizó y se muestreó con el objetivo de caracterizarla; las muestras tomadas fueron envasadas en envases plásticos (33 en total) de 0,02 m³ de capacidad [Castillo y Argüelles, 2006].

Método de concentración magnética de las colas de Nicaro

Para la obtención del concentrado de hierro a partir de las colas de Nicaro fue empleado un separador magnético de tambor de campo permanente, a escala de banco, modelo KWD 15 - 18 del fabricante Boxmag - Rapid (1985), con intensidad de campo de 79,64 kA/m y sistema de alimentación a corriente eléctrica.

Para la preparación de la pulpa se tuvieron en cuenta los pasos seguidos en la patente número 23 316 [Carthy, Figueredo, Leyva, Díaz y Ortiz, 2008]; de acuerdo a la misma, las colas de Nicaro son mezcladas con agua en un tanque cilíndrico, y agitadas con un impelente para facilitar la liberación de las partículas sólidas y la formación de una emulsión homogénea que debe poseer entre 10 y 30 % en peso de sólido. Fue empleada una pulpa de 20 % en peso de sólido, se realizó el proceso de separación magnética básica, así como tres operaciones de limpieza al concentrado de hierro y una operación de control al rechazo; finalmente se realizó un control de productos intermedios, esquema optimizado en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas [Carthy, Figueredo, Leyva, Díaz y Ortiz, 2008], [Leyva, 2007].

La emulsión o pulpa obtenida desciende por gravedad a la caja de alimentación de un separador magnético de tambor, con intensidad del campo magnético 77 kA/m, donde es separada la parte magnética (con un rendimiento en peso entre 49 y 52 %) de la no magnética, obteniéndose un concentrado con un contenido en peso de hierro entre 52 y 56 %, el que es sedimentado, filtrado y secado hasta una humedad entre 15 y 19 % [Carthy, Figueredo, Leyva, Díaz y Ortiz, 2008].

Método de peletización del concentrado de hierro

Para la obtención de los pelets autorreducibles se empleó un disco peletizador, con diámetro del disco de 0,8 m, altura del borde de descarga de 0,12 m, velocidad de rotación variable entre 8 y 32 rev /min y ángulo de inclinación entre 40 y 60 grados.

Como agente reductor para la elaboración de los pelets autorreducibles se utilizó el carbón antracita, residuo de la producción de níquel (procedente de Viet Nam); este es procesado en la planta de preparación mecánica de minerales del Centro de Investigaciones Siderúrgicas, y es suministrado a las acerías nacionales como insuflado para la obtención de la escoria espumosa en el horno de arco eléctrico; el carbón empleado fue triturado en un molino de bolas bicónico del fabricante Stein Et Roubaix Española, S.A, con dimensiones 1500 x 1300 mm y productividad de 300 kg/h, hasta obtener una granulometría de 80 % inferior a 74 μm , que según Srb y Ruzickova [1988] y UBA [2013] es el tamaño de partículas de los minerales requeridos para que se puedan formar los pelets en verde, pues de lo contrario se obtienen pelets defectuosos. Como agente aglutinante fue empleada una muestra de bentonita perteneciente al yacimiento de la localidad de San Andrés, en la provincia de Holguín (80 % inferior a 74 μm).

Tabla 1. Composición química de la bentonita (en %)

Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
9,59	2,32	4,35	6,36	16,75	45,3

En la tabla 1, al reflejar los diferentes elementos se aprecia que los óxidos principales en la bentonita empleada son la sílice (SiO₂) y la alúmina (Al₂O₃), los cuales le dan su carácter ácido (índice de basicidad < 1); se puede apreciar además una mayor presencia del sodio que del calcio.

Los pelets a obtener deben cumplir la condición de ser autorreducibles [Kobe Steel, 2011]. Ello conlleva a que el carbón antracita a utilizar como agente reductor sea mezclado con el concentrado de hierro, pero según

criterios de [Fuente de la, 2012], el carbón antracita es un material difícil de peletizar, por lo que se decidió emplear 2 % de bentonita, 0,5 % superior al recomendado por Srb (1988) y empleado en la peletización de las colas de Nicaro en Corea [CIS, 1970].

Resultados y discusiones

En la figura 1 se muestran los índices tecnológicos del tratamiento de las colas de Nicaro por las vías de reducción directa y formación de lupias de arrabio, simulando los procesos de hornos de hogares rotatorios (RHF).

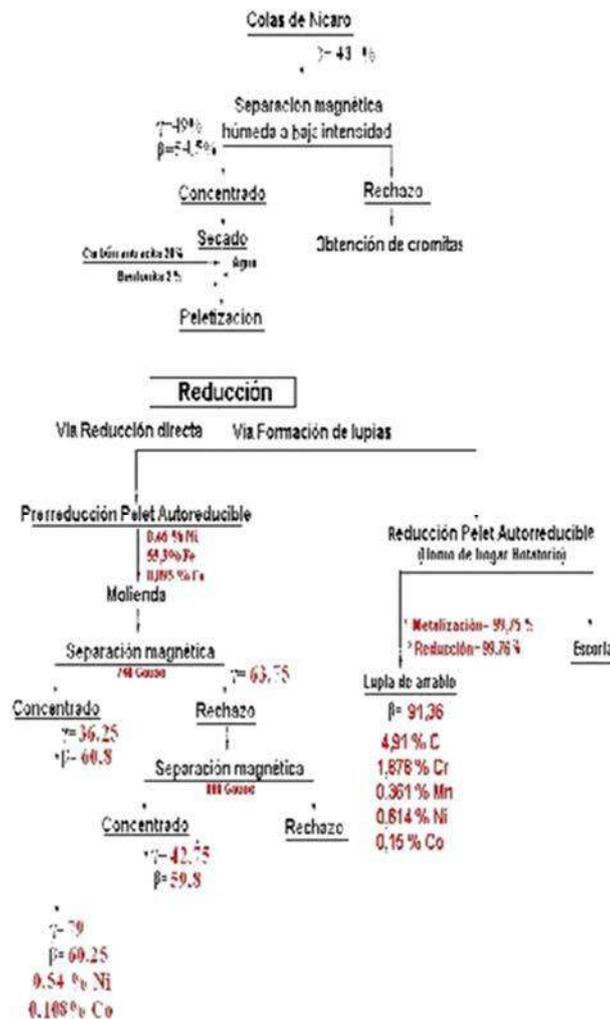


Fig. 1. Índices tecnológicos del tratamiento de las colas de Nicaro mediante los procesos de separación magnética, peletización y reducción por las variantes (Reducción directa y formación de lupias).

Como puede apreciarse, por la vía reducción directa solo es posible obtener 60 % del contenido de hierro, mientras que por la formación de lupias se

obtiene más de 90 % de hierro, debido a que cuando se forman las lupias existe una separación entre las fases lupias-escorias; es por ello que los prerreducidos no son factibles económicamente de emplearlos como sustituto de chatarras, debido a que por cada tonelada de prerreducido se cargarían más de 350 Kg de escoria al horno de arco eléctrico, haciendo irrentable su empleo, no así el caso de las lupias debido a que este es un material libre de escorias. En la figura 2 se muestran los prerreducidos y las lupias obtenidas en esta investigación, así como la similitud de las lupias obtenidas en DSIT y las que se obtienen en el Proceso ITMK3.



Fig. 2. Imágenes de los prerreducidos, las lupias y las probetas obtenidas.

Para poder determinar la composición química de las lupias obtenidas, estas fueron fundidas y vaciadas en un molde metálico, obteniéndose de esta forma las probetas que se muestran en la parte inferior de la figura 2.

Tabla 2. Composición química de los principales elementos en las lupias de arrabio (en %)

Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	S
91,36	4,91	0,44	0,361	0,614	1,878	0,182

De acuerdo a la norma europea Euronorm 1-81 [s/a], las lupias obtenidas pueden clasificarse como lupias de arrabio, por cuanto los contenidos de los elementos de aleación no exceden los límites máximos presentes en la norma.

Como puede apreciarse en la tabla anterior, entre los elementos de aleación más importantes se tiene el carbón (4,91 %), cuyo elevado valor se explica debido principalmente a la presencia del cromo en las lupias (1,878 %), el cual permite que el hierro asimile elevados contenidos de carbono debido a la formación de un doble carburo de cromo y hierro, lo que trae consigo que el arrabio obtenido tenga una elevada capacidad de absorción de carbono, contrarrestando el efecto grafitizador del níquel cuyo contenido en las lupias es de 0,614 %.

En el arrabio, el silicio es el elemento más importante en lo que respecta al control de la estructura, el cual se disuelve en el hierro en proporciones que pueden variar de 0,5 a 4,0 % [Vanikov, Zaitsev y Ya, 1981]; en las lupias obtenidas su contenido es de 0,44 %, por lo que con este bajo contenido de silicio la estructura de las lupias debe ser la de un arrabio blanco.

El contenido de manganeso en las lupias es bajo y oscila en 0,361 %. Además de los elementos C, Si y Mn, que son fundamentales para determinar las propiedades de los hierros fundidos, siempre están presentes otros elementos que son considerados impurezas, siendo los más importantes el azufre y el fósforo [Vanikov, Zaitsev y Ya, 1981].

El contenido de azufre es de 0,182 %, contenido característico de los arrabios blancos (para los hierros fundidos grises oscila entre 0,02 y 0,08 %). El contenido de fósforo en las lupias es de 0,025 %, por lo que de acuerdo a este bajo contenido (menor que 0,1 %) las lupias de arrabio podrían clasificarse como arrabios hematites, empleados en grandes cantidades como materia prima para fabricar acero ácido, pero también en la fundería, especialmente para la fabricación de lingoteras [Vanikov, Zaitsev y Ya, 1981]. No obstante que los contenidos presentes de níquel y cromo (> 0,3 %) impiden que las lupias se clasifiquen como hematites, sino como lupias de arrabio aleadas dentro de la designación «otros arrabios aleados» (Pig-SPA), de la norma europea EURONORM 1-81 [s/a].

Definición y clasificación de arrabios

De acuerdo a la evaluación de la composición química de las lupias obtenidas en esta investigación, el único elemento presente que limita la utilización de las lupias para la elaboración de aceros al carbono lo constituye la presencia del níquel, debido a la carencia de tecnología para eliminar su exceso, por lo que sería posible sustituir hasta 8 % de chatarras de acero por este material, concluyéndose que el mayor uso que se le podría dar a este material sería para la obtención del acero Mayarí, así como para la elaboración de aceros inoxidables, para el que se podría emplear más del 80 % como material de carga [Ferreiro, 2015].

El contenido de carbono superior a 4,3 %, el bajo contenido de silicio en las lupias, unido al contenido de azufre de 0,25 % característico de los arrabios blancos, según reportó Howard y Aguilar [1962], son los aspectos fundamentales que llevan a considerar que en la microestructura se encuentren las fases cementita, así como la fase eutéctica ledeburita y que coincide con lo planteado por Ferreiro [2012, c]; en la figura 3 se muestran las fotos de la microestructura, tomadas con el objetivo de corroborar esta hipótesis.

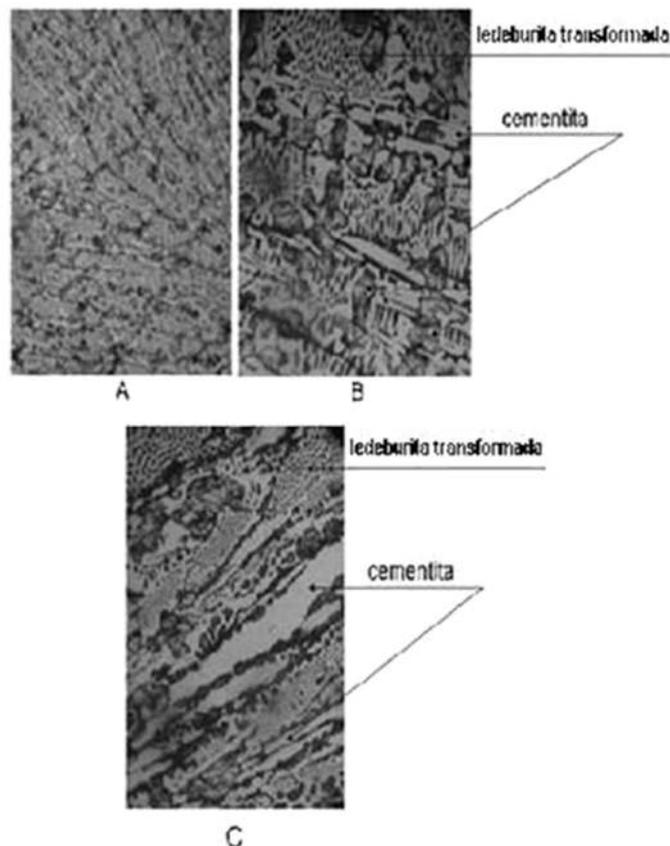


Fig. 3. Microestructura de las lupias (A: 100 X; B y C: 400 X).

Como se observa en la figura 3, al emplear un aumento de 100 X en el microscopio no se distinguen las diferentes fases; al aumentar a 400 X se puede apreciar la matriz cementita – ledeburita en las dos lupias analizadas (B y C), cuyas estructuras son similares.

La cementita o carburo de hierro (Fe_3C), es un compuesto apto para formar soluciones sólidas por sustitución, y con la presencia de Cr, Si, Ni, Mn y Co en las lupias, los átomos de hierro son sustituidos por estos elementos; esta solución sólida a base de la red de la cementita, se denomina cementita aleada (M_3C), lo que coincide con [Guliaev, 1978].

El otro componente de la matriz (ledeburita) presenta un alto contenido de carbono, así como una baja temperatura de fusión, de ahí el hecho de que se utilice como material de fundición, según reporta [Guliaev, 1978]. Esta propiedad es de vital importancia para el futuro empleo industrial de las lupias, al tener en cuenta que su fusibilidad traería consigo un sustancial ahorro energético durante la fusión en las acerías, reportado anteriormente por Ferreiro [2012, c].

Características mineralógicas de las escorias

En la figura 4 se muestra el difractograma de rayos X de las escorias obtenidas en el proceso de obtención de lupias de arrabio.

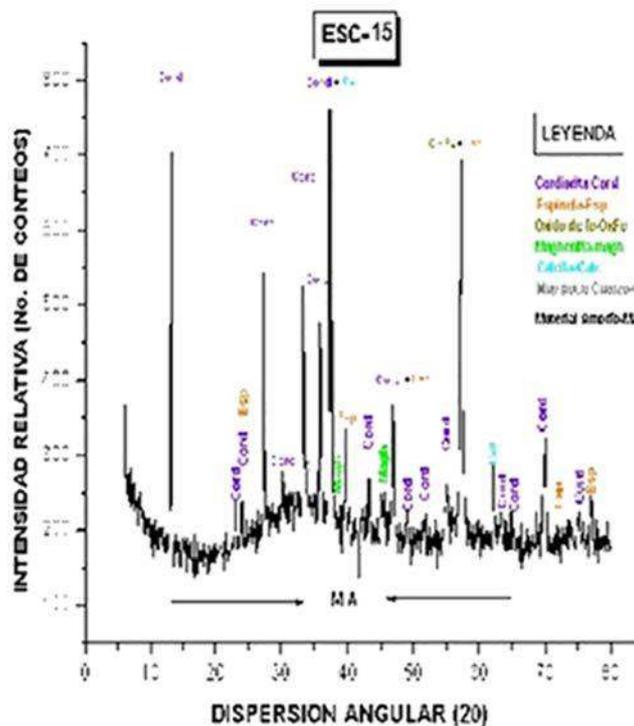


Fig. 4. Difractograma de RX de la muestra de escorias.

Como se aprecia en la figura 4, la cordierita ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) es la fase mineralógica principal, acompañada del óxido de hierro maghemita ($\gamma - Fe_2O_3$), una espinela de magnesio y aluminio ($MgAl_2O_4$) y una mezcla de silicatos amorfos; se aprecian además bajos contenidos de cromita, cuarzo, minerales de arcilla y calcita.

La cordierita presenta un color azulado grisáceo con tonalidades amarillo verdoso parduzco, de brillo vítreo; se presenta en forma de masas con un aspecto cuarzoso, por lo que se confunde fácilmente con cuarzo [DSIT, 2013]. Según reportan Tamborenea, Mazzoni y Aglietti [2003], esta fase del sistema $MgO-SiO_2-Al_2O_3$ como material tiene un gran campo de aplicación tecnológica por sus propiedades, especialmente su bajo coeficiente de expansión térmica que lo hace apto para soportar cambios bruscos de temperatura.

En la figura 5 se muestra la composición mineralógica de dichas escorias.

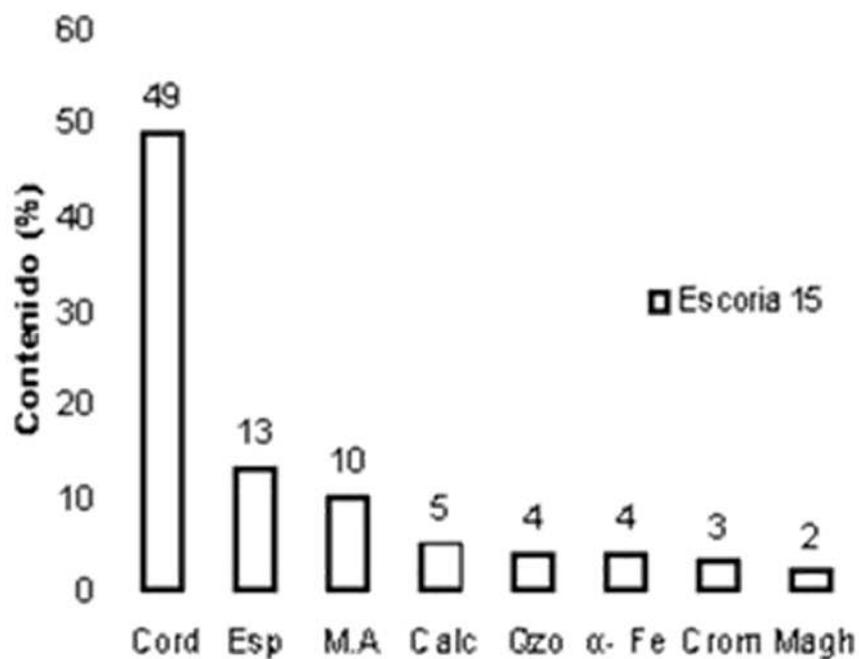


Fig. 5. Composición mineralógica.

Como se muestra en la figura 5, el contenido de la cordierita es de 49 %, la espinela de magnesio y aluminio constituye el 13 %, así como un contenido del 10 % de una mezcla de silicatos amorfos; las otras fases mineralógicas no exceden 5 % en peso. En la figura 6 se ilustran las distribuciones de las fases minerales presentes en las diferentes clases granulométricas.

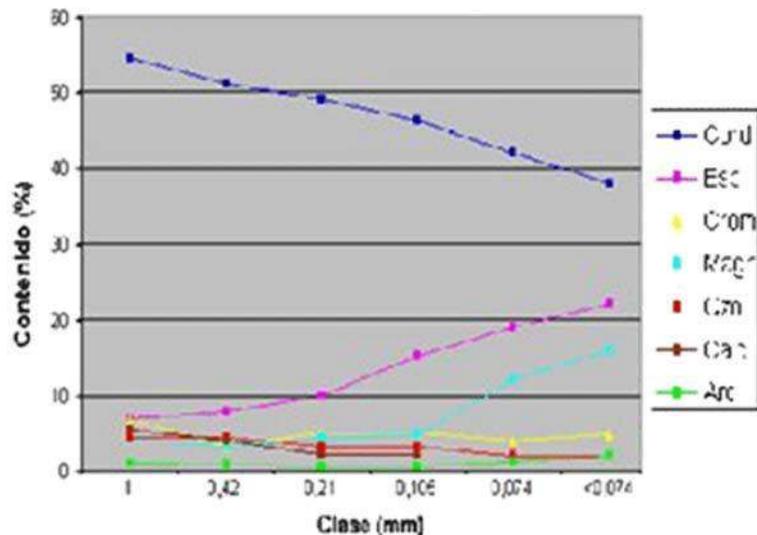


Fig. 6. Composición mineralógica (Porcentaje en peso de la muestra).

Como puede apreciarse en la figura 6, la cordierita es la fase mineral principal, se distribuye en todas las fracciones granulométricas, los contenidos en peso oscilan entre 54,6 y 38,0 % y sus mayores valores se aprecian en los granos de mayor tamaño. Como fases mineralógicas secundarias aparecen la espinela de magnesio y aluminio (entre 7 y 22 %) y la maghemita (entre 4,4 y 16 %), las cuales aumentan sus contenidos hacia los granos de menor diámetro. Las fases minerales cromita, cuarzo, calcita y minerales de arcilla se distribuyen de forma similar en las diferentes clases granulométricas.

La cordierita posee excelentes propiedades de resistencia al choque térmico, conductividad térmica y expansión térmica bajas, buena resistencia mecánica y puede ser utilizada aproximadamente hasta los 1200 °C, características que la hacen atractiva para un ulterior aprovechamiento de la cordierita presente en las escorias obtenidas en la presente investigación.

Análisis de los modelos estadísticos matemáticos obtenidos a partir de los resultados experimentales

Para seleccionar el mejor modelo de regresión que explique la relación existente entre el grado de reducción (α) y las variables independientes estudiadas, se empleó el paquete estadístico *Statgraphic Plus V.5.1*, con el que se determinaron los efectos estandarizados de las variables mostrados en la figura 7, donde A corresponde a la variable temperatura, B a la variable basicidad, C a la variable relación CF/FeT , y D a la variable diámetro del pelet.

Gráfico de Pareto estandarizado para alfa

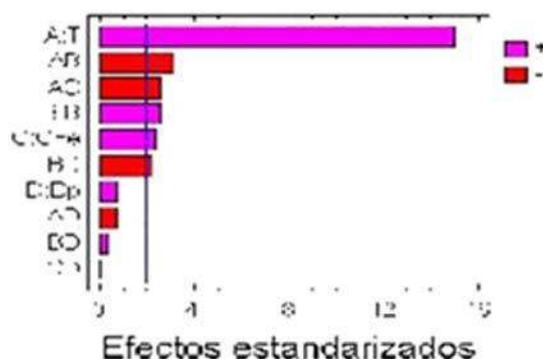


Fig. 7. Efectos estandarizados de las variables independientes.

Como se aprecia en la figura 7, el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar el efecto de las variables experimentales en el grado de reducción del hierro, arrojó como resultado que todos los efectos estandarizados de las variables analizadas son significativos, exceptuando el de la variable diámetro del pelet que no es estadísticamente significativa. Para el caso de los efectos primarios de las variables temperatura, basicidad y relación C/Fe_T , los mismos son positivos, o sea, directamente proporcionales al grado de reducción.

Se aprecia además que todos los efectos de interacción entre las variables significativas ejercen un efecto significativo y negativo en la variable respuesta; para el caso de la interacción entre la temperatura y la basicidad, y entre la temperatura y la relación C/Fe_T , los efectos son superiores a los efectos primarios de las variables basicidad y la relación C/Fe_T , lo que fue reportado por [Ferreiro, 2015].

Para determinar la ecuación de regresión que mejor se ajusta a los datos, se realizó el análisis de regresión múltiple a partir de las tres variables independientes estadísticamente significativas en función del grado de reducción, así como del cruzamiento de la variable temperatura con las variables basicidad y relación C/Fe_T , obteniéndose la ecuación del modelo ajustado siguiente:

$$\alpha = -2,91919 + 0,0023569 \times T + 2,24769 \times B + 4,83379 \times C/Fe - 0,00126 \times T \times B - 0,00278 \times T \times C/Fe - 0,733073 \times B \times C/Fe$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza de 99 %. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica 99,054 % de la variabilidad en alfa. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más

conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 98,226 %.

El estadístico Durbin Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero, dado que el p-valor es superior a 0,05 y no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

Valoración económica

En abril de 2009 se realizó una conferencia en Kiev, Ucrania [Gordon, Els y Freislich, 2009], en la cual se presentaron la metodología y los resultados de la selección de distintas tecnologías existentes actualmente para obtener hierro. Desde el punto de vista financiero fueron seleccionadas las tecnologías ITMK3 y la tecnología combinación Horno de Hogar Rotatorio–Fusión. Los resultados del análisis financiero realizado arrojaron que los valores de la tasa interna de retorno (TIR), y del valor actual neto (VAN) para el proceso ITMK3, son aceptables a nivel industrial y son 5 % superior que la tecnología combinación Horno de Hogar Rotatorio–Fusión.

Comparación de la producción de arrabio mediante el proceso de Horno de Hogar Rotatorio con el Alto Horno

Para la valoración económica se partió de los estudios realizados por Razaz [2009], el cual consideró los indicadores del mercado del 2007 para evitar la turbulencia del mercado causada por la crisis actual, y evitar la distorsión que ello pudiese traer. Según este estudio la producción de una tonelada de arrabio por la tecnología convencional (alto horno) cuesta entre 300 y 325 USD, su precio de venta oscila entre 340-360 USD, y la inversión de capital es de 300 USD por tonelada.

Para obtener los pelets aptos para el alto horno es necesario invertir entre 50-60 USD por tonelada. Los costos de producción del arrabio a partir del proceso ITMK3 son de 150 USD por tonelada, los precios de ventas son de 340 USD, y la inversión de capital es de 300 USD por tonelada de producción instalada. Por tanto, los costos de producción de nódulos de arrabio por el proceso ITMK3 son menos de 50 % de los costos en el alto horno, y el capital a invertir por tonelada de arrabio es inferior en 20 % de la inversión necesaria para el caso del alto horno, de acuerdo al análisis realizado por Younes [2009].

Aporte en la dimensión ambiental

El impacto ambiental es un término definido como el efecto positivo, negativo o no existente, que produce una determinada acción humana

sobre el medio, efectos que pueden ser sociales, económicos, tecnológicos - culturales y ecológicos [Ferreiro, 2015].

Las colas de la empresa Comandante René Ramos Latour de Nicaro constituyen una gran fuente de contaminación del medio ambiente. Decenas de millones de toneladas de este residuo sólido industrial se han almacenado en embalses de colas, durante las seis décadas de explotación que laboró la misma, lo que trajo consigo un fuerte impacto negativo en el medio ambiente, como la obstrucción de cauces de ríos, la contaminación atmosférica y de la bahía de Levisa, lo que fue reportado por [González y Ramírez, 1995] y coincide con lo planteado por [Ferreiro, 2009].

Desde el punto de vista ambiental, el esquema propuesto en esta investigación tiene una gran ventaja, teniendo en cuenta que con su implementación se disminuiría la carga contaminante al medio ambiente, debido a la obtención de las lupias de arrabio a partir de las colas de Nicaro, para ser empleadas como sustitutas de la chatarra de hierro que se utiliza en las acerías, conllevando a un uso racional a este material contaminante del medio según lo reportado por [Ferreiro, 2012a].

En comparación con el arrabio producido mediante la tecnología convencional del horno alto, en la producción de lupias de arrabio empleando los hornos de hogares rotatorios se emite 20 % menos de dióxido de carbono debido a la buena eficiencia energética del proceso; además de la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero y de la inversión de capital, el empleo de la tecnología de hornos de hogares rotatorios es muy conveniente para su desarrollo actual y futuro, considerándose su uso en industrias siderúrgicas con un menor impacto en el medio ambiente en los países en vías de desarrollo, según han reportado diversos autores [CIS, 1970; Fujita, Harada y Michishita, 2010; y Das, 2012], lo que coincide con lo reportado por Ferreiro y Sánchez [2013].

La tecnología ITMK3 reduce el consumo energético en 3 GJ/t de metal caliente de 10 GJ/t de metal caliente empleado por la vía de alto y minialto hornos, además de reducir la emisión de 1 t de CO₂ por cada tonelada de metal caliente [IETD, 2012].

Conclusiones

Desde el punto de vista técnico-económico-ambiental, los procesos más factibles para tratar los residuos sólidos industriales estudiados son los que emplean hornos de hogares rotatorios.

Se demuestra por primera vez que es posible obtener lupias de arrabio a partir de pelets autorreducibles del concentrado de hierro de las colas de Nicaro, con una composición química similar a la del arrabio Mayarí, con los

elementos aleantes: Cr 1,88 %, Si 0,65 %, Ni 0,62 %, Mn 0,36 %, Co 0,15 %, V 0,04 % y Nb 0,003 %. Los elementos presentes en las lupias que limitan su utilización para la elaboración de aceros al carbono en Cuba, lo constituyen la presencia de los elementos níquel y cromo, por lo que sería posible sustituir hasta 8 % de chatarras de acero. El mayor uso que se le podría dar a este material es para la elaboración del acero Mayarí, aleado, de baja aleación e inoxidable.

Las microestructuras obtenidas en las lupias de arrabio presentan como fases principales la cementita y la ledeburita transformada, debido principalmente a la presencia del cromo en las lupias, el cual permite que el hierro asimile elevados contenidos de carbono, lo que trae consigo que el arrabio obtenido tenga una elevada capacidad de absorción de carbono y por tanto un bajo punto de fusión, favorable para ser empleado como materia prima siderúrgica.

La influencia primaria de las variables independientes temperatura de reducción, basicidad y relación C_F/Fe_T , en el grado de reducción del hierro es directamente proporcional.

El aumento de la relación C_F/Fe_T provoca que las lupias se obtengan con menor tamaño. La influencia conjunta entre las variables significativas en el grado de reducción del hierro, es inversamente proporcional.

Bibliografía

- AGUILAR J., R. FUENTES Y R. VIRAMONTES (2003). «Simulation of iron ore reduction in a fixed bed». Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- AWAD O. (1966). «Informaciones sobre características y aplicaciones del acero Mayarí». Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro, pp.1-5.
- CARTHY G.; O. FIGUEREDO; E. LEYVA; A. DIAZ Y J. ORTIZ (2008). «Procedimiento para La obtención de concentrado de cromita a partir de las colas de la tecnología carbonato amoniacal». OCPI. 23316. Cuba.
- CARTMAN R. (2012). «Nickel pig iron—¿A long term solution? ». 3RD Euronickel Conference, Helsinki.
- CASTILLO L. Y J. ARGÜELLES (2006). «Pasaporte de la muestra tecnológica No 1: Colas de Hierro Nicaro». Archivo UEB Minas.
- CIS. 1970. «Informe sobre las investigaciones de obtención de semiacero con colas de Nicaro en Corea». Centro de Investigaciones Siderúrgicas (Informe Interno).
- CONEJO A. (2000). «Revisión y evaluación de procesos alternativos al horno alto». Revista de Metalurgia. Madrid. 36, pp. 420-434.
- DAS A. (2012). «ltmk3 technology: An overview in the Indian perspective». <http://www.wordwendang.com/en/>

DSIT. 2013. "Informe técnico: Características mineralógicas en muestras de escorias obtenidas de lupias de arrabio". Ejecutor: Empresa Geominera Oriente

FERREIRO Y. (2006). «Tratamiento previo de los escombros lateríticos del yacimiento Atlantic de Moa como paso inicial de una nueva tecnología en perspectivas» [Seriada en línea], Tecnología Química, Vol 26, No 1. <https://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/view/14>.

FERREIRO Y. (2009). «Impacto socio cultural del surgimiento de la industria del níquel en Nicaro, efectos negativos en el medio ambiente». CD IV Encuentro Provincial de Jóvenes Investigadores. BTJ Sociales.

FERREIRO, Y. (2012a). «Estudio de factibilidad del proyecto de inversión para la producción de lupias de arrabio a partir de residuales sólidos de la industria del níquel». Universidad OSCAR LUCERO MOYA. Trabajo de Diploma. 66 h.

FERREIRO, Y. (2012b). «Obtención de metalizados de hierro a partir de los residuos sólidos de la industria del níquel en Nicaro, Cuba». Minería & Geología. Vol 28, No 1, enero-marzo, pp. 60-73.

FERREIRO, Y. (2012c). «Reduction by coal of the concentrate of iron obtained from the solid residuals of nickel's factory of Nicaro for the obtaining of pig iron's nuggets». 6Th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. ICSTI. Brasil.

FERREIRO Y. (2015). «Obtención de lupias de arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro». Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Tesis doctoral. 100 h.

FERREIRO Y. Y C. SÁNCHEZ (2013). «Evaluación Técnico Económica del empleo de los residuos sólidos de la empresa del níquel René Ramos Latour en la obtención de Lupias de Arrabio, destinadas a suplir el déficit de chatarras de acero en el sector siderúrgico cubano». Editorial Universitaria Félix Varela. CD memorias del VII Congreso de la ANEC.

FUENTE DE LA, M. (2012). «Estudio para la aglomeración de finos de carbón con fines siderúrgicos». Informe técnico. CIS.

FUJITA K.; T. HARADA Y H. MICHISHITA (2010). «CO2 Emission Comparison between Coal-based Direct Reduction Process and Conventional Blast Furnace Process». International Symposium on Ironmaking for Sustainable Development, 28 -29 January, Osaka, Japan.

GONZÁLEZ H. Y M. RAMÍREZ (1995). «The effect of nickel mining and metallurgical activities on the distribution of heavy metals in Levisa Bay, Cuba». ELSEVIER. Journal of Geochemical Exploration. 52, pp. 183-192.

GORDON Y.; M. ELS Y M. FREISLICH (2009). «Methodology and results of ironmaking technology selection for specific site conditions». Conference of ITMK3 family. Kiev, Ukraine, April 3rd.

GULIAEV A. (1978). «Metalografía 1». Segunda edición. Editorial MIR. Moscú.

HOWARD E. D. (1962). «Tratado práctico de fundición». Aguilar, S.A de Ediciones, España, 482 p.

IETD. Industrial Efficiency Technology Database (2012). «ITMK3 Process». <http://ietd.iipnetwork.org/content/itm3%C2%AE-process>

KOBE STEEL LTD. (2011). «World's first commercial ITMK3 plant successfully begins production». http://www.kobelco.co.jp/english/releases/2010/01/1182907_12313.html

LEYVA E. (2007). «Informe sobre Monografía de colas de Nicaro». Inf. Centro de Investigaciones Siderúrgicas.

NORMA EURONORM 1-81 (s/a). *Definición y clasificación de arrabios*. <http://es.youscribe.com/catalogue/rapports-et-theses/euronorm-1162713>

RAZAZ Y. (2009). «New Business Horizon with ITmk3®. Producing the Pig Iron from the Oxidized Iron Ore Concentrate in one Technological Process». Working Paper for the ITmk3® Family Conference. Hares Engineering GmbH. Kyiv, April 3, 2009.

SRB J. Y Z. RUZICKOVA (1988). *Developments in Mineral Processing. Pelletization of Fines. V-7*. ELSEVIER. Amsterdam Oxford New York, Tokio, 311p.

STEEL STATISTICAL YEARBOOK (2013). Worldsteel Committee on Economic Studies. Brussels.

TAMBORENEA S.; A. MAZZONI Y AGLIETTI (2003). «Seguimiento de la formación de cordierita por técnicas térmicas». Jornadas SAM/CONAMET/Simposio materia.

TROTMAN J. (2010). «Solución parcial al déficit de chatarra ferrosa en Cuba». Congreso metalúrgico cubano. CD Metánica 2010.

UBA (2013). «Materias. Aumento de tamaño». Facultad de Ingeniería. UBA. Argentina.

VANIKOV A.; V. ZAITSEV Y V. YA (1981). «Teoría de los procesos pirometalúrgicos». Vneshtorgizdat. Moscú, 498 p.

WORLD COAL ASSOCIATION (2012). «Coal Statistics». . <http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/>

YOUNES R. (2009). «New Business Horizon with ITmk3®. Producing the Pig Iron from the Oxidized Iron Ore Concentrate in one Technological Process». Working Paper for the ITmk3® Family Conference. Kyev, April 3, 2009.

Estudio comparativo de estaciones de prospección eólica, con respecto a la torre de referencia meteorológica de El Ramón, en Holguín

Comparative study of wind prospecting stations, with respect to the weather reference tower at El Ramón, Holguín

*Por Lic. Alfredo Roque Rodríguez**

** Investigador Auxiliar. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba.*

e-mail: alfredo.roque@insmet.cu

Resumen

Comparar y correlacionar los registros de las estaciones de prospección eólica, con los de algunas torres pertenecientes a la red de torres de referencia meteorológica para el programa eólico cubano, fue siempre el principal objetivo de estas últimas. Por disímiles motivos ambas redes, ahora interrumpidas, nunca habían sido sometidas a un estudio comparativo que permitiera inferir algunas estimaciones en áreas de interés para el programa eólico cubano, principalmente la magnitud del viento por encima de los 50 m de altura sobre el terreno. Sin embargo, con el apoyo de estaciones de referencia se pueden disminuir considerablemente las incertidumbres asociadas a esas estimaciones. Los resultados encontrados denotan una gran correlación en la mayoría de las estaciones seleccionadas con la torre de El Ramón, destacándose las estaciones de Río Seco y Los Jagüeyes, aunque otras estaciones como Los Cocos y La Amelia también presentaron una buena correlación. De igual manera se fundamenta, teniendo en cuenta los resultados encontrados para El Ramón, el valor medio estimado de la rapidez del viento para Los Cocos y La Amelia, en los niveles de 70, 80 y 100 m de altura, por ser de mucho interés para el Programa Eólico, especialmente la primera, cuyos datos presentan una excelente correlación con los datos de la estación de La Herradura [Novo, et al., 2013].

Palabras clave: Prospección eólica, magnitud del viento, programa eólico cubano

Abstract

Compare and correlate records of wind prospecting stations, with the ones obtained by towers of the network of meteorological reference towers for the Cuban Wind Power Program, was always the main objective of the program. For different reasons, both networks, now interrupted, had never been subjected to a comparative study that would allow inferring some estimates in areas of interest for the Cuban Wind Power Program, mainly the

magnitude of the wind above 50 m above ground. However, with the support of reference stations, the uncertainties associated with these estimates can be considerably reduced. The results show a great correlation in most of the selected stations with the tower of El Ramón, highlighting the stations of Río Seco and Los Jagüeyes, although other stations such as Los Cocos and La Amelia also presented a good correlation. Likewise, it is established, taking into account the results found for El Ramón, the estimated average value of the wind speed for Los Cocos and La Amelia, at a height of 70, 80 and 100 m, of great interest for the Wind Program, especially the first one, whose data present an excellent correlation with the data from the La Herradura station [Novo, et al., 2013].

Keywords: Wind prospecting, wind magnitude, Cuban Wind Power Program

Introducción

Como parte de las acciones para impulsar la aplicación de la energía eólica en Cuba, a gran escala se implementaron las redes de torres de referencia meteorológica (TRM) y de prospección eólica (PE), con el objetivo de obtener una climatología del viento en la capa superficial atmosférica que sirviera de complemento a los estudios de prospección realizados y por realizar, así como realizar un estudio detallado del comportamiento del viento en zonas de futuros emplazamientos de parques eólicos que contribuyeran a disminuir las incertidumbres en los estudios de factibilidad. Las figuras 1 y 2 muestran las características de ambas redes, así como el instrumental utilizado. Las torres de referencia meteorológica han permitido despejar algunas dudas al poder conocer el comportamiento del viento en la CSA, y principalmente el perfil vertical del viento en toda la capa, lo que no es posible con las estaciones de prospección, pues solo miden hasta 50 m de altura.

En los estudios de factibilidad se manifiestan diversas insatisfacciones, principalmente por la poca extensión vertical de las estaciones de prospección y la corta extensión de la longitud de la serie, lo que hace que necesariamente haya que recurrir a las estaciones de referencia, que permitan hacer determinadas correlaciones con la finalidad de obtener series de mediciones más completas, o fundamentar, de alguna manera, estimaciones del comportamiento del viento donde no hay mediciones.

Este trabajo pretende mostrar la importancia de las mediciones en las investigaciones meteorológicas en apoyo al Programa Eólico Cubano, sin lo cual los estudios de factibilidad pueden presentar grandes limitaciones.

Por tal motivo, el objetivo del trabajo es determinar el grado de correlación de algunas estaciones de prospección con la torre de referencia

meteorológica de El Ramón, las que desde el punto de vista climático están sometidas al mismo flujo sinóptico que afecta el noreste de las provincias de oriente y en nuestro caso a Holguín, una de las principales regiones de desarrollo eólico de Cuba.

Otro objetivo es fundamentar, comparando con la torre de El Ramón, la estimación de la rapidez del viento a alturas de 70 y 80 m, en las que las estaciones de prospección no miden, pero que resulta de interés para el programa eólico con la finalidad de disminuir las incertidumbres en los estudios de factibilidad.

Materiales y métodos

Para la realización de este trabajo fueron utilizadas algunas de las estaciones de prospección del viento ubicadas en la zona norte de la provincia de Holguín, específicamente las ubicadas entre Gibara y Banes. En la tabla 1 se muestran las estaciones utilizadas, incluyendo características de su ubicación. Para la comparación y correlación del Programa Eólico Cubano, fue utilizada la Torre de El Ramón, ubicada en la zona de Antilla en el norte de la provincia de Holguín. Esta torre pertenece a la Red de Referencia Meteorológica y mide la rapidez del viento en diferentes alturas hasta los 100 m de altura. El periodo utilizado para la correlación fue entre enero y agosto de 2008, pues antes de esa fecha El Ramón no se encontraba midiendo, y después de agosto el huracán Ike prácticamente derribó todos los mástiles de prospección e interrumpió las comunicaciones en El Ramón, por lo que no se pudo contar con más mediciones simultáneas de esas estaciones con dicha torre. Es indudable que la falta de mediciones durante los últimos 4 meses del 2008 limita el alcance de los resultados, pero resulta orientativo sobre el grado de incertidumbre de las estimaciones realizadas o por realizar.

La figura 1 muestra la ubicación de los mástiles de prospección y la torre de El Ramón. No obstante, el porcentaje de datos disponibles para todas las estaciones en ese periodo fue de 100 %, o muy cercanos a esa cifra.

Tabla 1. Características de las estaciones seleccionadas

Estaciones	Zona de ubicación	Distancia a la costa (km)	Altura sobre nivel mar (m)	% de datos disponibles
Los Cocos	Gibara	0,3	3	100,0
Los Jagüeyes	Gibara	1,6	17	100,0

Rio Seco	Banes	2,7	40	100,0
Faro	Banes	0,2	9	99,99
La Amelia	Banes	7,4	107	100,0
Punta Mulas	Banes	0,3	1	99,8
El Ramón	Antilla	2	50	99,4



Fig. 1. Ubicación de las estaciones de prospección y la torre de El Ramón (estrella).

La variable que se correlacionó fue el valor medio horario de la rapidez del viento a 50 m de altura. Se determinó el coeficiente de correlación lineal R entre las estaciones de prospección y la torre de referencia meteorológica, y la ecuación correspondiente.

Se estimó el valor para 100 m en las estaciones de Los Cocos y La Amelia, utilizando el exponente alfa del perfil vertical del viento, y se comparó el valor obtenido con el de la torre de El Ramón, arribando a conclusiones consistentes que se pueden extrapolar a otras estaciones de prospección, como La Herradura.

Análisis de los resultados

La figura 2 muestra la oscilación diurna del viento para las estaciones seleccionadas, denotándose en todos los casos el mismo patrón, es decir, disminución de los valores de rapidez del viento durante la noche, madrugada y primeras horas de la mañana, lo cual es una característica de la capa superficial atmosférica sobre Cuba dado su carácter insular, lo que origina la circulación de brisas en ambas costas, que en su interacción con la circulación general de la atmósfera determina el patrón diario de la rapidez del viento en nuestro país [Roque, et al., 2010; Carrasco, et al., 2011].

De la figura se observa que la mayor oscilación se produce en las estaciones de Los Jagüeyes y Los Cocos, mientras que las menores se encuentran en las estaciones de El Faro y Punta de Mulas. Los valores más bajos durante la noche, madrugada y primeras horas de la mañana se produjeron en la estación Los Jagüeyes, mientras los más altos se alcanzaron en Los Cocos durante las horas del mediodía y la tarde.

Los valores máximos de rapidez del viento se concentran entre las 12:00 y las 18:00 hora local, para todas las estaciones con valores entre 6,5 y muy próximos a 9,0 m/s, estos últimos alcanzados en la estación de Los Cocos.

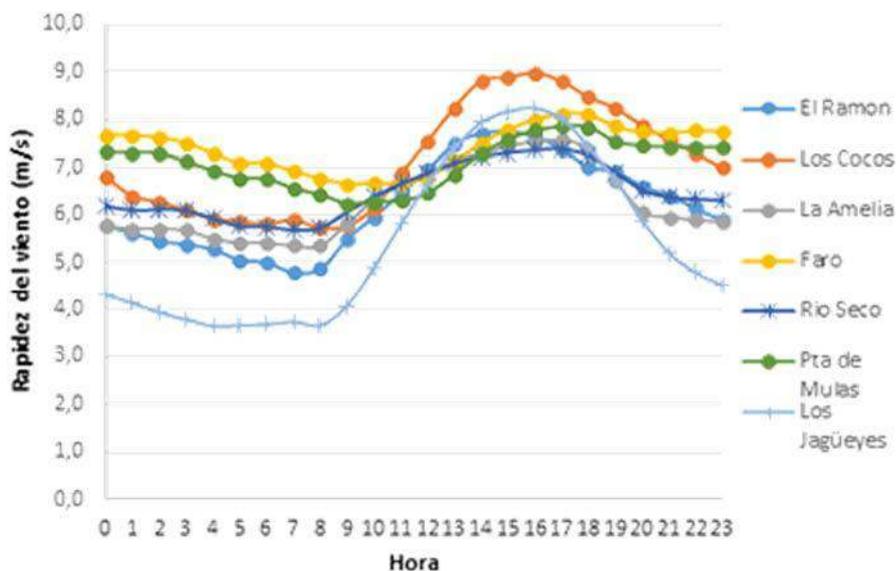


Fig. 2. Oscilación diurna del viento para las estaciones seleccionadas. Periodo enero-agosto, 2008.

La tabla 2 muestra la ecuación de correlación lineal con su coeficiente R, para cada una de las estaciones.

Tabla 2. Ecuación y coeficiente de correlación entre las estaciones de prospección y la torre de referencia meteorológica de El Ramón. Periodo enero-agosto, 2008

Estaciones	Ecuación determinada	Coefficiente de correlación R
Los Cocos	$Y = 1,1515x - 0,0115$	0,96
Los Jagüeyes	$Y = 1,7127x - 5,2035$	0,98
Rio Seco	$Y = 0,5735x + 2,9135$	0,98
Faro	$Y = 0,2285x + 5,9923$	0,46
La Amelia	$Y = 0,7664x + 1,5079$	0,95
Punta de Mulas	$Y = 0,2737x + 5,394$	0,52

En la tabla puede apreciarse que las mayores correlaciones se alcanzaron para las estaciones de Los Cocos, Los Jagüeyes, Rio Seco y La Amelia, no siendo así para El Faro y Punta de Mulas, en las que otros tipos de correlación como el exponencial, logarítmico, polinómico, etc., también dieron valores bajos del coeficiente de correlación. Las curvas de ajustes se muestran en la figura 3.

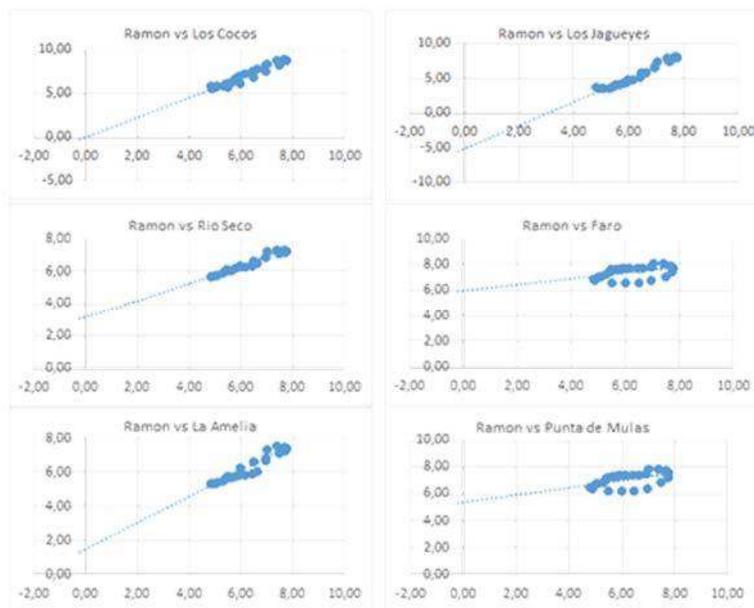


Fig. 3. Curva de ajuste entre las estaciones de prospección y la torre de El Ramón. Periodo enero-agosto, 2008.

Las correlaciones determinadas permiten utilizar las estaciones seleccionadas para el rellenado de las series, usando los datos de la torre de referencia meteorológica de El Ramón, e igualmente poder rellenar la serie de datos de El Ramón, utilizando cualesquiera de las estaciones de prospección con altos valores del coeficiente de correlación, específicamente la correspondiente a Río Seco.

Es de destacar que los resultados, dada la muestra, son limitados, y que meses importantes para el aprovechamiento eólico, como noviembre y diciembre, no fueron tenidos en cuenta al no contar con datos, por lo que urge mantener la continuidad de las redes de medición, en especial la de referencia meteorológica para así dar cumplimiento al objetivo para la cual fue concebida.

Perfil vertical del viento

Uno de los objetivos de la correlación es poder utilizar las estaciones de referencia para estimar valores de la rapidez del viento en las zonas de emplazamiento de estaciones de prospección por encima de los 50 m de altura, la máxima a la cual ellas miden.

Tomemos de ejemplo a las estaciones de Los Cocos y La Amelia, cuyos perfiles verticales del viento, se muestran en la figura 4 para el periodo seleccionado de enero-agosto de 2008, así como el correspondiente a la torre de El Ramón en igual periodo.

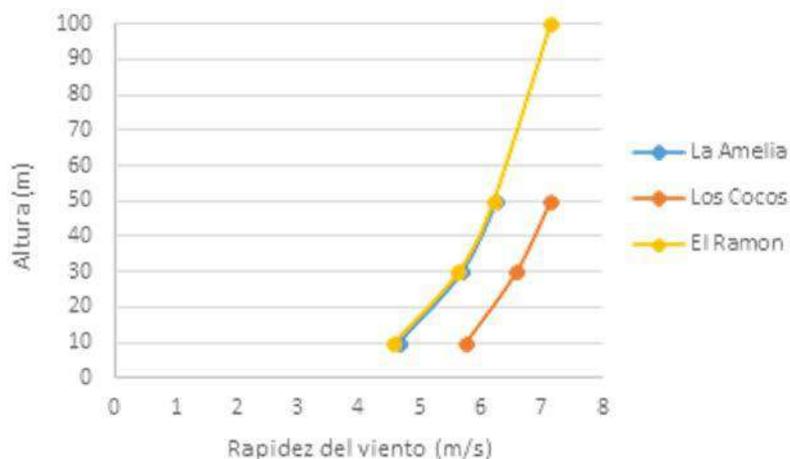


Fig. 4. Perfiles verticales del viento en las estaciones de La Amelia, Los Cocos y El Ramón.

Como puede apreciarse, existe una buena correspondencia entre la estación de La Amelia y El Ramón, que se extiende a los niveles de 10 y 30 m, de lo cual se puede inferir que el valor a 100 m de altura para La

Amelia es muy similar al de la torre de El Ramón. Conclusiones similares pueden hacerse para la estación de Los Cocos.

Si procediéramos como indica la literatura [Emeis, 2013] para estimar el valor de rapidez del viento para los 100 m, utilizando el valor de alfa, calculado para Los Cocos (0,13), obtendríamos un valor de 7,84 m/s, mientras que para La Amelia (0,18) sería de 7,12 m/s, con lo que obtendríamos los perfiles verticales que se muestran en la figura 5, lo cual confirma lo planteado en el párrafo anterior sobre la estación de La Amelia.

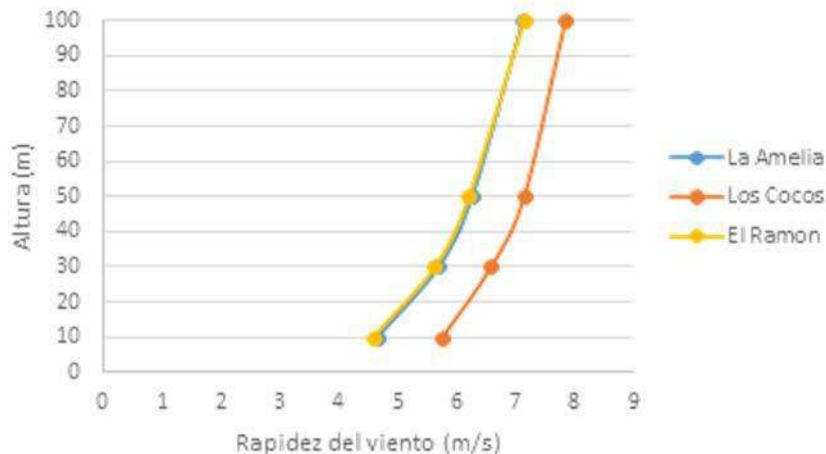


Fig. 5. Perfiles verticales del viento, teniendo en cuenta el valor estimado para los 100 m de altura, en las estaciones de La Amelia y Los Cocos.

Los valores de rapidez del viento estimados representan un incremento, de 50 a 100 m, de 0,86 y 0,70 m/s para las estaciones de La Amelia y Los Cocos, respectivamente. Roque *et al.* [2015] encontraron para la Red de Torres de Referencia Meteorológica, basado en las mediciones realizadas, que este incremento estaba en más de 70 % de los casos por debajo de 1,5 m/s, y en más de 50 % por debajo de 1 m/s. Para el caso específico de El Ramón [Roque, et al., 2010], se encontró que este incremento fue en más de 65 % de los casos por debajo de 1,5 m/s, y en más de 85 % por debajo de 2 m/s. Por tanto, podemos decir que los estimados en 100 m para La Amelia y Los Cocos para el periodo analizado son bastante confiables. Estimaciones para alturas menores a 100 m son aún más confiables.

Para fundamentar esta afirmación tomemos los datos de la torre de El Ramón. Si calculamos el exponente alfa sin tener en cuenta el nivel de 100 m (como es el caso de las estaciones de prospección), el valor sería de 0,19 (muy similar al de La Amelia). Utilizando este valor para estimar la rapidez del viento en el nivel de 100 m daría como resultado

7,08 m/s, muy cercano al 7,14 m/s medido, lo que representa un error menor de 1 m/s.

Es decir, el hecho de no tener mediciones por encima del nivel de 50 m, no imposibilita que podamos hacer una buena estimación del viento por encima de este nivel; esto está dado porque la cizalladura vertical del viento se produce en la capa superficial atmosférica por debajo de los 50 m de altura (de hecho en los primeros 30 m), y por tanto determina el comportamiento del perfil vertical a las alturas superiores.

Por otra parte, el valor medio registrado a 50 m de altura en las estaciones de prospección seleccionadas en el periodo enero-agosto de 2008, es superior al valor medio registrado teniendo en cuenta todas las mediciones efectuadas durante la etapa de prospección [Soltura, et al., 2011], lo cual estuvo dado por las condiciones de la circulación general de la atmosfera establecidas para ese periodo, y que se muestra en el mapa de anomalías (Fig. 6) para el periodo enero-agosto de 2008 [NCEP/NCAR, 2008]. Es decir, no deben esperarse valores medios de la rapidez del viento superiores a los estimados en este trabajo para esas estaciones en el nivel de 100 m.

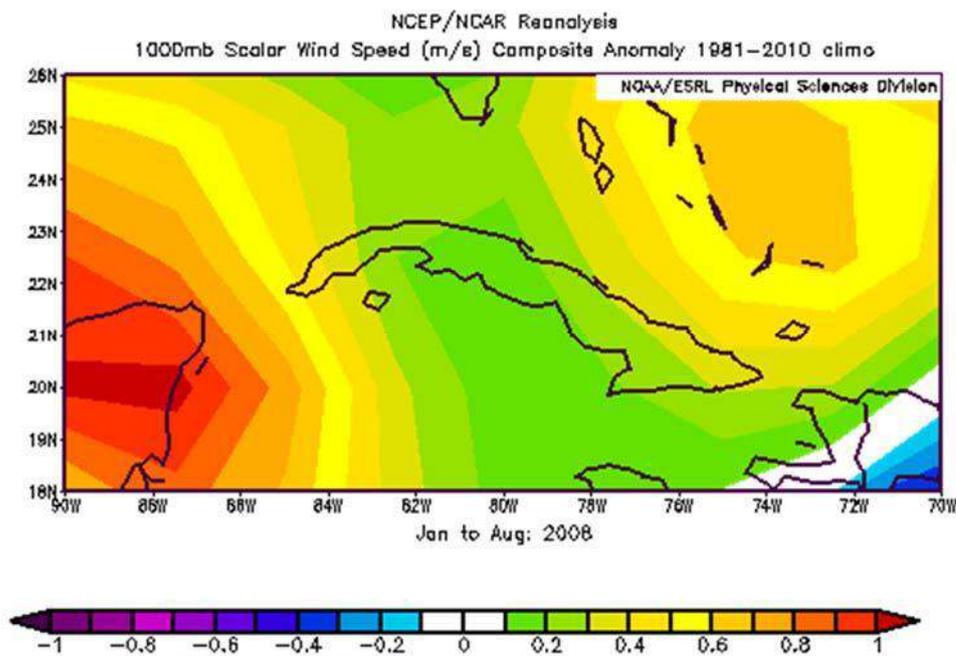


Fig. 6. Anomalías de la magnitud del viento en el nivel de 1000 hPa para el periodo enero-agosto, 2008.

Por todo lo planteado, se puede concluir que estimaciones para alturas más bajas, como pueden ser 70 y 80 m, sean más confiables. Para el caso de La Amelia y Los Cocos, estos valores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Rapidez media del viento estimado para las estaciones de Los Cocos y La Amelia. Periodo enero-agosto, 2008

Estaciones	Valor estimado a 70 m	Valor estimado a 80 m
Los Cocos	7,47	7,61
La Amelia	6,66	6,83

Dado la excelente correlación entre las estaciones de Los Cocos y La Herradura, mostrados por Novo et al. [2013], los resultados aquí encontrados son extrapolables para esta última estación, donde actualmente se construye un parque eólico de 51 MW.

Conclusiones

Los resultados alcanzados permiten arribar a las conclusiones siguientes:

1. Existe una buena correlación entre los datos medios horarios de las estaciones de prospección de Los Cocos, La Amelia, Río Seco y Los Jagüeyes, con los de la Torre de Referencia Meteorológica de El Ramón, que podrá ser usada para el relleno de las series de datos de las estaciones de prospección y la torre de referencia.
2. El uso del exponente alfa de variación vertical del viento para estimar la magnitud del viento para los niveles de 70, 80 y 100 m, arroja resultados confiables y pueden tenerse en cuenta para estudios de factibilidad.
3. El uso de las Torres de Referencia Meteorológica demostró que estas contribuyen a disminuir las incertidumbres en las estimaciones del comportamiento del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba, y por ende resulta imprescindible garantizar su funcionamiento para complementar los estudios de prospección y fortalecer los estudios de factibilidad de emplazamientos de parques eólicos, así como contribuir a la planificación de las operaciones y al mantenimiento de aquellos.

Bibliografía

CARRASCO, M.; A. ROQUE, O. SÁNCHEZ-MONTANTE Y D. RIVAS (2011). «Local Breeze Effects on the Wind Energy Generation in the Northern Coast of Cuba», en *Wind Engineering* v. 35, no. 6, 2011.

EMEIS, S. (2013). *Wind Energy Meteorology. Atmospheric Physics for Wind Power Generation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
ISBN 978-3-642-30523-8 (eBook) DOI 10.1007/978-3-642-30523-8.
NCEP/NCAR (2008): <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/>
NOVO, R.; R. SOLTURA, O. VERA Y LISAT BARNET (2013). «Representatividad climática de los datos de viento y predicción a largo plazo del rendimiento del proyecto del parque eólico de 51 MW de La Herradura 1, Las Tunas», en *Eco Solar* 43, ene.-mar., ISSN: 1028 6004.
ROQUE, A.; R. SOLTURA, L. ÁLVAREZ, M. LIMIA Y M. CARRASCO (2010). *Caracterización físico-meteorológica de las capas bajas de la atmosfera a partir de la implementación de una red de torres altas de gradiente y su aplicación al estudio del viento como fuente de energía*. Informe Científico-Técnico, Instituto de Meteorología, 2010.
ROQUE, A.; M. CARRASCO, Y. NIEBLA Y P. REYES (2015). «Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía», en *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 1, No. 1., 2015.
SOLTURA, R.; A. GONZÁLEZ R. NOVO, G. LEIVA, O. VERA Y E. OCHOA (2011). «Resultados del Programa de Prospección Eólica 2005-2010. Certificación de los datos de viento y optimización de la red», en *Convención Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética CIER 2011*.

Evaluación y reparación del foto sensor de luminaria del alumbrado público en la Ciudad de Camagüey

Evaluation and repair of street lighting photo sensor in the City of Camagüey

*Por Carlos Alberto Milián Valdés**
**Universidad de Camagüey*
e-mail: carlos.milian@reduc.edu.cu

Resumen

En este trabajo se estudió el principio de funcionamiento de la fotocelda de las luminarias de alumbrado público, determinando las dificultades que le impiden su correcto funcionamiento y que atentan contra la confiabilidad del alumbrado. Posteriormente se confeccionaron las características de voltaje vs corriente de sus componentes (varistor, resistencia dependiente de luz -LDR) y finalmente se procedió a la reparación de estos dispositivos, lo que dio lugar a su recuperación, logrando un ahorro considerable en moneda libremente convertible.

Palabras clave: Fotoceldas, varistor relé, resistencia dependiente de luz

Abstract

The principle of operation of a street lighting photocell was studied and is presented in this paper, determining the difficulties that hinder its correct operation and threaten the reliability of the lighting. Subsequently the characteristics of voltage vs current of its components (varistor, light-dependent resistance-LDR) were made and finally the devices were repaired, which led to their restoration, achieving considerable money savings.

Keywords: Photocells, varistor relay, light-dependent resistor

Introducción

Los sistemas de alumbrado público significan para todas las ciudades un aspecto clave en la calidad de vida de la población, brindando seguridad tanto peatonal como vial. Para el país, el mejoramiento y mantenimiento de este servicio es un proceso estratégico, dado que implica imagen y credibilidad, siendo de gran importancia para la iluminación perimetral de objetivos sensibles, como pueden ser grandes depósitos, almacenes, fábricas, hospitales, escuelas y otros, jugando un rol determinante en la seguridad de esos emplazamientos.

El sistema de iluminación pública en avenidas principales y sectores residenciales, así como de objetivos importantes, en los últimos años ha estado integrado mayormente por luminarias de tecnologías de vapor de mercurio o de sodio, considerando que estas ofrecían un mejor rendimiento que los sistemas tradicionales mixtos e incandescentes, pero que dependen para su funcionamiento de energía eléctrica generada con combustibles fósiles, y a pesar de las mejoras tecnológicas experimentadas en estos sistemas, aún presentan altos consumo de energía.

La necesidad de estudiar los sistemas fotoeléctricos que controlan el alumbrado público en la ciudad de Camagüey, se debe a que al igual que otras ciudades del país, estos dispositivos están causando un serio problema. Entre dichos problemas está el que las luminarias se encienden de día y se apagan de noche, sin ningún horario, problemas que afectan tanto a la Empresa Eléctrica como a la población, lo que ocasiona un gasto innecesario de energía eléctrica.

Desarrollo

El funcionamiento del control fotoeléctrico (Fig. 1) se activa cuando empieza a incidir luz solar sobre el foto resistor, el cual tiene como característica que en la oscuridad tiene una resistencia casi eléctrica infinita, y a medida que comienza a incidir luz sobre este, la resistencia eléctrica empieza a variar los $M\Omega$ hasta el orden de los Ω . Este valor de resistencia baja permite que comience a circular una corriente por el devanado del relé, el cual al energizarse desconecta la carga (lámpara). De noche ocurre el proceso contrario: la resistencia eléctrica del foto resistor comienza a variar de los Ω hasta los $M\Omega$; este valor de resistencia eléctrica casi infinita impide que circule corriente por la bobina del relé y, por lo tanto, este vuelve a su posición inicial y la carga (lámpara) se desconecta de la línea, apagándose.

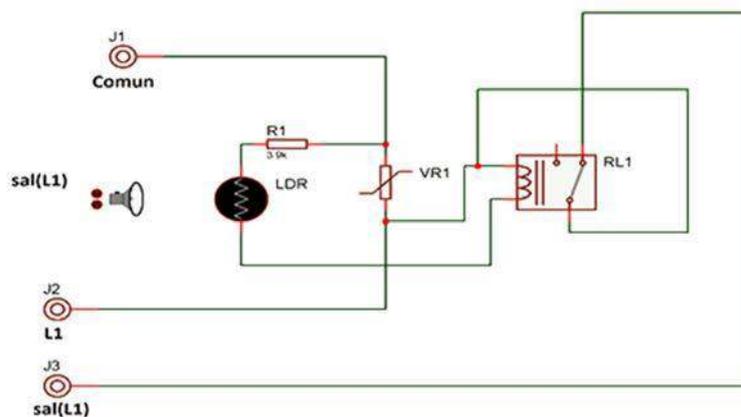


Fig. 1. Esquema eléctrico de un control fotoeléctrico utilizado en las luminarias de calles, modelo Lc-10j.

Características del foto resistor

Un foto resistor (Fig. 2) está compuesto de semiconductores de alta resistencia, como el sulfuro de cadmio (CdS). Si la luz que incide sobre el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por las elasticidades del semiconductor, dándole a los electrones la energía suficiente para saltar la banda de conducción. El electrón libre que resulta, y su hueco asociado, conducen la electricidad de tal modo que disminuye la resistencia.



Fig. 2. Foto resistor.

Los valores típicos de resistencias, Tabla 1, varían entre 1 M Ω en la oscuridad, mientras que con luz brillante alcanzan valores entre los 100 Ω , y en nuestro modelo llegan a alcanzar valores mínimos de 57 Ω , aproximadamente.

Tabla 1. Valores de resistencias, corriente y tensión de este dispositivo (ensayo realizado con luz artificial)

U (v)	R (K Ω)	Rserie(k Ω)	I (mA)
220	5,60	9,5	12,63
120	5,60	9,5	23,15

Características generales del varistor

Un varistor (Fig. 3) es un componente electrónico cuya resistencia disminuye cuando la tensión eléctrica que se le aplica aumenta; tienen un tiempo de respuesta rápido y son utilizados como limitadores de picos de voltaje. Fabricados básicamente con óxido de zinc, algunos fabricantes les

añaden otros materiales para agregarles características no lineales deseables. El material se comprime para formar discos de diferente tamaño y se le agrega un contacto metálico a cada lado para su conexión eléctrica. Se utiliza para proteger los componentes más sensibles de los circuitos contra variaciones bruscas de voltaje, o picos de corriente que pueden ser originados, entre otros, por relámpagos, conmutaciones y ruido eléctrico.

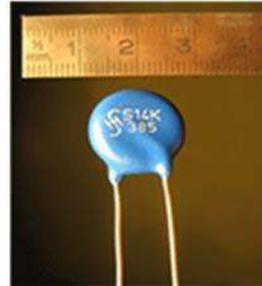
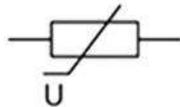


Fig. 3. Varistor.

Datos de trabajo de este dispositivo:

1. El tiempo de respuesta está en el orden de los 5 a 25 ns.
2. La tensión de actuación es de 14 v a 550 v.
3. Buena disipación de energía indeseable.
4. La confiabilidad es limitada, ya que se degrada con el uso.
5. El costo del dispositivo es bajo comparado con otros (como los diodos supresores de avalancha de silicio).

Funcionamiento

El varistor protege el circuito de variaciones y picos bruscos de tensión. Se coloca en paralelo al circuito a proteger y absorbe todos los picos mayores a su tensión nominal. El varistor solo suprime picos transitorios; si lo sometemos a una tensión elevada constante, se deteriora.

El varistor está construido a base de materiales semiconductores, al igual que el tiristor. Por lo tanto, al aplicar un potencial de pequeñas magnitudes en sus extremos ofrece resistencia muy elevada, en tanto que si su potencial aplicado es muy elevado, su resistencia disminuye permitiendo el paso de la corriente. Es así como se convierte en un fusible.

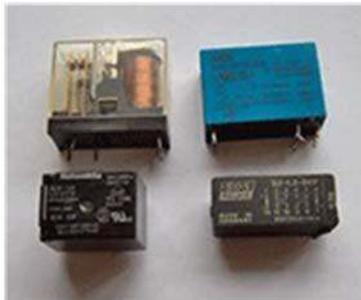
Relés

El relé (Fig. 4) es un dispositivo electromecánico. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una

bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835.

Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico.

Tipos de Relés:



Símbolo

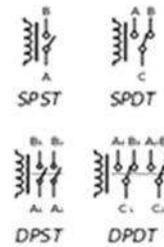


Fig. 4. Tipos de relés y simbología.

Relé de corriente alterna

Cuando se excita la bobina de un relé con corriente alterna, el flujo magnético en el circuito magnético también es alterno, produciendo una fuerza pulsante, con frecuencia doble sobre los contactos. Es decir, los contactos de un relé conectado a la red, en algunos lugares, como varios países de Europa y Latinoamérica, oscilarán a 50 Hz, y en otros como en Estados Unidos lo harán a 60 Hz. Este hecho se aprovecha en algunos timbres y zumbadores, como un activador a distancia. En un relé de corriente alterna se modifica la resonancia de los contactos para que no oscilen.

Intensidad de luz natural en las diferentes regiones de nuestro país

Partiendo de que existen antecedentes de estudios para alumbrado público realizados por necesidades de iluminación, considerándose los diversos factores que influyen en los niveles de iluminación, las características físicas del lugar de instalación y el costo comparativo entre luminarias convencionales y las de este tipo con control, el nivel de iluminación promedio es 30 lux, lo que depende del modelo y la altura de montaje, entre otros factores.

Esto induce a pensar en que las condiciones reales están dadas para diversificar el sistema de alumbrado público de las ciudades y las zonas perimetrales de los objetivos importantes.

Los datos como base de partida han sido tomados de la cartografía existente de Cuba a escala 1:250000, donde se muestra el potencial solar de cada territorio.

Para este estudio se utilizó el mapa de radiación solar publicado por SWERA (2001), a una resolución de 10 km, elaborado mediante el modelo SUNY, y el mapa del recurso solar a una resolución de 40 km, mediante el uso del modelo CSR (Climatological Solar Radiation) del NREL. En la figura 5 se muestra el mapa de radiación solar en el plano inclinado que incide en el territorio nacional, y la ubicación de las principales ciudades donde se concentra la mayor demanda de energía para el alumbrado público, y la iluminación perimetral de los objetivos importantes.

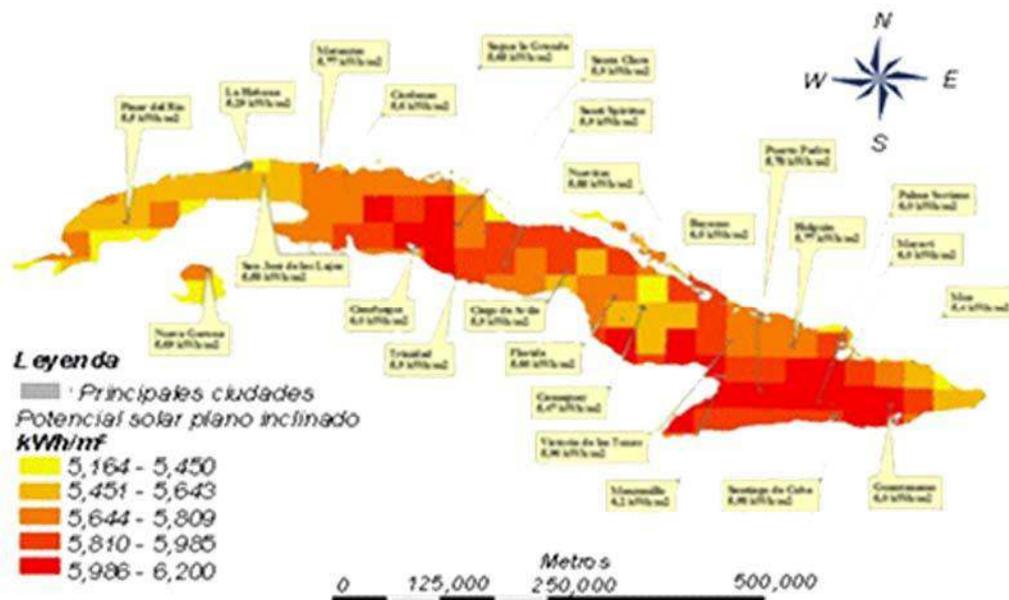


Fig. 5. Intensidad de luz natural en distintas regiones del país.

Valoración de los resultados

En el país, la demanda anual de electricidad para el alumbrado público (Fig. 6) representa aproximadamente 2% del total, y 3,7% de la demanda del sector estatal. Considerando que en los momentos actuales 99,9% de la generación de electricidad se obtiene por la combustión del petróleo, como promedio diario esta actividad consume aproximadamente 51,5 MWh, con un consumo de 19,64 toneladas de combustible. Este consumo significa que anualmente se emiten a la atmósfera 31 821,11 toneladas de gases contaminantes. Estos datos pueden presentar valores superiores, si fuera posible calcular el consumo de energía del alumbrado perimetral de los objetivos importantes.

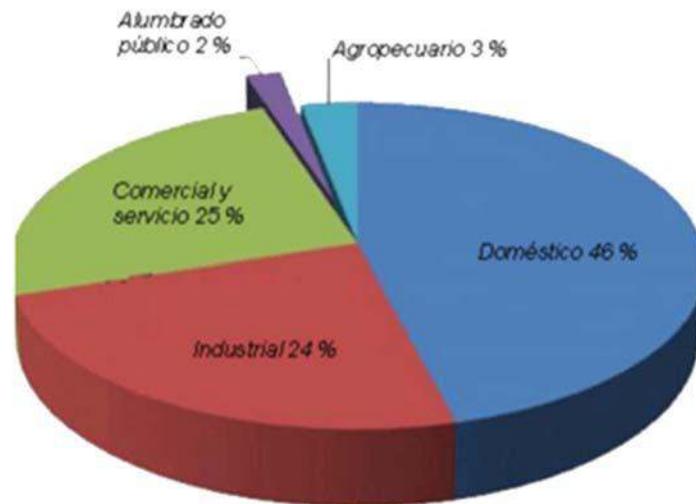


Fig. 6. Destino de la generación de energía en el país.

En este estudio se determinaron las causas y condiciones de averías en foto celdas de las lámparas de alumbrado público, como son:

- En varias ocasiones se detectaron dispositivos sin el varistor que fueron retirados como una solución, lo que no se debe realizar pues la función de este elemento es proteger los contactos del relé.
- El material que protege a estos dispositivos del efecto de las condiciones atmosféricas no tiene la calidad necesaria, lo que provoca infiltraciones de agua y humedad, y el consiguiente deterioro de los componentes electrónicos
- El modelo LC-10j no trae incorporada protección contra las sobrecorrientes.
- Se detectaron diodos en corte en muchos dispositivos de otros modelos.

Al solucionar todas estas dificultades detectadas, es decir, reparando y reponiendo los componentes dañados, se lograron reparar 7500 fotoceldas, que representan al país un ahorro de 97 820 CUC anuales, contribuyendo al restablecimiento del alumbrado público y su correcto funcionamiento en la ciudad de Camagüey.

Conclusiones

- El varistor es un elemento de gran importancia que protege a los contactos del relé, por lo que nunca se le debe retirar al dispositivo.
- El plástico de la carcasa que recubre el interior de este dispositivo y lo protege de las condiciones ambientales, es de mala calidad y se deteriora con el sol.

- El control fotoeléctrico modelo LC 10-j no tiene protección contra sobre corrientes tanto externas como internas.
- En otros modelos de control se detectaron como defectos diodos en corte (en este caso se sustituyeron estos componentes por diodos de bombillos ahorradores), fusibles abiertos y otros defectos.
- Se repararon 7500 fotoceldas, representando un ahorro en moneda libremente convertible de 97 820 CUC.

Bibliografía

BOYLESTAD, ROBERT L. Y LOUIS NASHESKY (2003). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. s.l. Pearson educación, 2003.

MALVINO, ALBERT PAUL Y ROBERTO MACIAS PÉREZ (1991). *Principios de electrónica*. s.l. McGraw-Hill, 1991.

RASHID, MUHAMMAD H., et al. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. s.l. Pearson Educación, 2004.

ROSETO BOLAÑOS Y GUILLERMO MARCELO (1996). *Evaluación técnico-económica del ahorro de energía en un sistema de alumbrado público*. Quito: EPN, 1996.

Uso del sifón autocebante en una central hidroeléctrica cubana (Najasa I)

Use of the self-priming siphon in a Cuban hydroelectric power station (Najasa I)

** Empresa de Hidroenergía,
Unión Eléctrica,
Ministerio de Energía
y Minas, La Habana, Cuba
e-mail: psoto@infomed.sld.cu*

Resumen

En este artículo se presenta una solución de tubería forzada para el aprovechamiento hidroenergético, utilizada en otros países aplicando la propiedad de los sifones para elevar el agua por encima de una presa y entregar su caudal a las turbinas; tales sifones se han situado sobre los aliviaderos, una posición con ventajas constructivas, pero donde la carga hidráulica es la mínima disponible en el embalse. En Cuba no existe esa experiencia, hasta el momento solo se ha utilizado la solución de instalar una tubería en el interior de las galerías, por lo que esta propuesta sería una novedad en el país, pero, a diferencia de la experiencia internacional, presenta además la condición de aprovechar la máxima carga que se obtiene en la línea del cauce (sobre la obra de toma), mediante una nueva tecnología de sifones con la capacidad de autocebarse y mantener el flujo autocontrolado, lo que hace que sea, además, una novedad mundial. Entre otras ventajas adicionales sobre la solución del entubamiento, también permite disminuir notablemente los costos exigidos por aquella.

Palabras clave: Sifón autocebante, hidroeléctrica, embalse, obras de toma

Abstract

This article presents a forced pipeline solution for hydroenergy exploitation used in other countries applying the characteristic of siphons of raising water above a dam and delivers its flow to the turbines. These siphons have been placed on the spillways, a position with constructive advantages, but where the water head is the minimum available in the reservoir. There is no such experience in Cuba, the only solution so far has been used to install a pipe inside the galleries, so this proposal would be an innovation in the country, but, unlike international experience, it also presents the condition of taking advantage of the maximum load that is obtained in the line of the channel (on the intake work), through a new technology of siphons with the ability to self-priming and maintain self-controlled flow, which also makes it a

novelty world. Among other additional advantages over the tubing solution, it also allows to significantly reduce the costs demanded by that.

Keywords: Self-priming siphon, hydroelectric, reservoir, intake works

Antecedentes

En los años iniciales del desarrollo de la «voluntad hidráulica» (1964-1989), uno de los objetivos de la construcción de embalses fue proteger a la población de inundaciones y sequías como respuesta al desastre acontecido en 1963: ciclón Flora con más de 3000 fallecidos; además, esa política también permitió combatir las sequías y desarrollar la agricultura, la industria y el abasto. Sin embargo, la pequeña hidroenergía no fue considerada en los planes ni en los proyectos de entonces; por lo que la mayoría de las presas se construyeron con obras de toma y galerías sin las características necesarias para la operación de centrales hidroeléctricas (CHE).

En esta nueva etapa de «crisis energética» la pequeña hidroenergía se transforma en una necesidad, pero muy pocos de los 253 mayores embalses existentes en el país pueden ser utilizados conectando directamente a sus obras de toma las turbinas de una CHE. En Cuba este problema se ha enfrentado mediante la costosa y peligrosa solución de entubar sus galerías, para poder disponer de la potencia del salto hidráulico que proporciona el embalse.

Revisando la cartera de obras a construir por la Empresa de Hidroenergía, se observa que los proyectos entregados por las Empresas de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (EIPH) del país, se caracterizan por presentar el entubamiento como «única alternativa» para resolver la situación descrita, lo que evidencia que la dirección de esta Empresa ha asumido el «principio» siguiente:

«Si el embalse carece de una Obra de Toma adecuada para suministrar a una hidroeléctrica, es necesario el entubamiento de la galería existente».

En estos momentos, cuando resulta ineludible identificar todo sitio o recurso hidráulico aprovechable con la concepción de que todo kg de combustible fósil ahorrado es importante, y cada kW generado con una fuente renovable de energía (FRE) es necesario, también se requiere de una nueva visión. Aquí se describe una alternativa de solución para ese problema, respaldado por la experiencia en China y otros países, a la que se aporta una novedosa solución cubana.

Definiciones

Un sifón se define como: «el tipo especial de conducción destinada a trasvasar líquido de un depósito superior a otro de nivel inferior, pasando por un punto más alto que la superficie libre del depósito superior, con la particularidad de que todo el tramo ascendente y parte del descendente se encuentra a una presión inferior a la atmosférica. Para que un sifón pueda funcionar es preciso cebarlo, operación que se efectúa generalmente aspirando aire desde el punto más alto del conducto» (ver Fig. 1).

Un conducto con esas características operará como sifón si, primero, se crea un vacío en su interior, y segundo: que se establezca el flujo en todo el trayecto; el agua se mantendrá fluyendo bajo estas condiciones mientras exista continuidad en la vena líquida; sin embargo, los gases disueltos en el agua son retenidos en la zona de baja presión, se acumulan y, finalmente, interrumpen la vena líquida si estos no se extraen oportunamente mediante un dispositivo que realice esta acción.

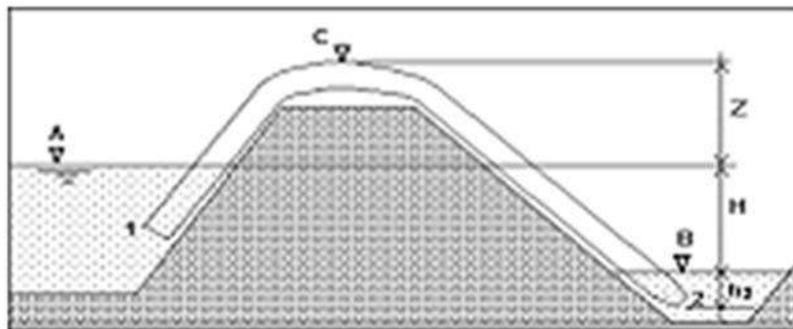


Fig. 1. Operación de ceba de un sifón desde el punto más alto del conducto.

Un sifón con descarga libre y determinado diámetro D , entrega al final de la Rama Descendente (RD), un caudal en función de la carga H disipando toda su energía potencial, lo que hace que Q sea la máxima posible en el punto de entrega.

$$V_{fs} = 4,43 \sqrt{\frac{H}{(1 + \Sigma K)}} \quad (1)$$

Los especialistas plantean, además, la necesidad de que la salida sea sumergida para evitar que el aire penetre por ese punto e interrumpa el flujo.

Los sifones vertedores [Schoklitsch, 1981] comienzan a funcionar solo cuando el nivel del agua en el embalse sobrepasa la cota de su garganta; en ese punto empieza el vertimiento y, por su diseño, el sifón vertedor

puede desarrollar una presión inferior a la atmosférica que termina por completar la sección del conducto para mantener la vena líquida fluyendo.

Para cualquier variante de sifones:

- Si el nivel del agua es superior al determinado por la cota de su ápice, este deja de ser un sifón y actúa como un conducto normal con la presión interna p/γ positiva en todo su trayecto.
- Si el nivel del agua es inferior al nivel del ápice, y la presión interna se hace menor que la atmosférica, el conducto se comporta como sifón hasta que el nivel del agua alcanza el nivel de entrada a la rama ascendente (RA), momento en que la presión en su interior se iguala a la atmosférica al penetrar el aire por la bocatoma interrumpiendo el flujo.
- Si el nivel del agua respecto al ápice excede la distancia de 8 metros sin sobrepasar la posición de la bocatoma, y la presión interior se hace inferior a $0,2 \text{ kg/cm}^2$, puede comenzar el fenómeno de la cavitación.
- Si los gases acumulados en la cumbre alcanzan un volumen tal que desplacen el líquido del ápice, el flujo se corta y el sifón deja de operar, requiriendo ser cebado nuevamente. Condición de la cual se excluye el sifón autocebante [Cortada, 1998a] PAT OCPI 22524/98, debido a que esta característica es aprovechada en su diseño para mantener el flujo autocontrolado.

1. Utilización de sifones para suministrar a centrales hidroeléctricas.

Con un diseño similar al sifón vertedor, este se ha utilizado para el suministro a centrales hidroeléctricas: centrales de Dieshui y Dishan construidas en China [Zhagjiang, 2014], entre otras [European SHP, 2004], ver figura 2.

En una hidroeléctrica la carga neta H_n a la entrada de la turbina: la carga hidrostática o bruta (H_b) menos las pérdidas, debe evaluarse cuidadosamente para obtener el mayor rendimiento energético posible. En la literatura china sobre las centrales, referidas y en el estudio realizado sobre estas soluciones [Fontanills, 2015] para su posible utilización en el embalse Najasa II, se exponen elementos sobre el comportamiento de plantas con sifones como conducción forzada, cuyas ventajas resultan muy valiosas para la Hidroenergía:

1.1. Ventajas observadas.

La conducción con sifones [Zhagjiang, 2014] presenta ventajas notables sobre la conducción forzada con la toma de fondo:

En una toma sifónica:

- a) La bocatoma de un sifón es perpendicular al eje de la rama ascendente, que puede ser vertical o con una fuerte pendiente por debajo de la superficie líquida del embalse, por lo que aún con una entrada libre impide que en el conducto penetren sólidos sedimentables que descienden mientras el agua se eleva, siempre que la relación de Q y D garantice una velocidad de entrada inferior a la velocidad de sedimentación de sólidos y azolves en la zona de succión.
- b) Detener el flujo en el sistema utilizando el sifón no requiere de compuertas ni válvulas equivalentes al diámetro de la bocatoma; una simple válvula de $\phi 50$ a $\phi 100$ mm situada en el ápice (punto C, fig. 1) es suficiente para interrumpir el flujo con una reducción gradual de la velocidad sin producir golpe de ariete, y sin importar el diámetro del sifón.

En una toma de fondo:

- a) El diseño de la tubería forzada en la Obra de Toma requiere necesariamente las entradas de compuerta con cámara de rejas, lo que constituye 20% y 30% del costo del sistema.
- b) La tubería forzada de fondo requiere la operación de compuertas y válvulas para detener el flujo en casos del cierre de emergencia por embalamiento, o para control y mantenimiento, operaciones que demandan de un tiempo relativamente prolongado de ejecución y pueden provocar el golpe de ariete. Esto hace evidente que el sifón resulta una opción más segura, y confiable, que la conducción forzada de fondo, además de ser menos costosa.

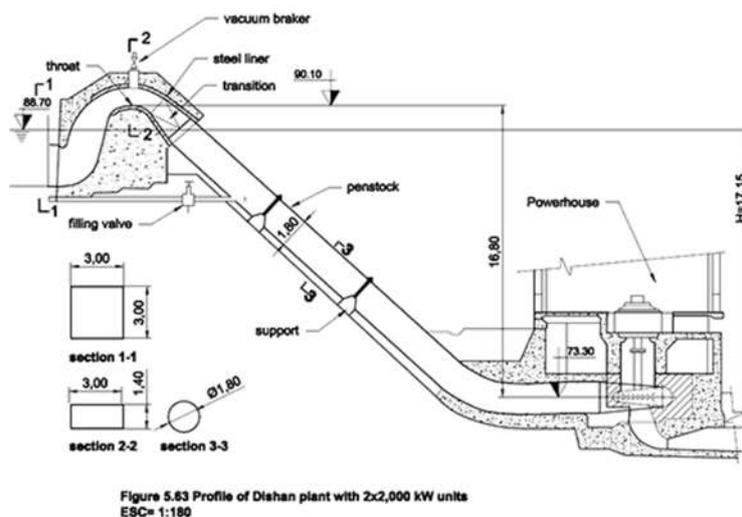


Fig. 2. Sección de la planta de Dieshui (China) con 3 unidades de 640 kW.

En este trabajo se pretenden introducir los conceptos y criterios presentados por el autor en 1998 [Cortada, 1998a], y la patente de invención registrada en ese año OCPI (Oficina Cubana de la Propiedad Industrial) No. 22524 [Cortada, 1998b], donde quedó demostrado y establecido que un sifón puede funcionar con la capacidad de autocebado y control automático sin ningún dispositivo consumidor de energía, aun cuando esta teoría y sus resultados prácticos, tal como fue presentada entonces, solo es válida bajo el concepto de descarga libre para su aplicación en el uso agrícola (entrega a estanques o canales), en las que solo interesa el gasto en circulación.

La metodología para el cálculo de un sifón autocebante publicada en 1999 [Cortada, 1999c] adquiere total validez para una central hidroeléctrica con una sencilla transformación en el cálculo de la velocidad de circulación (velocidad para el «flujo establecido» V_{fe}), modificación que se discute en este trabajo.

2. La aplicación de sifones autocebantes para el embalse Najasa I.

La aplicación del sifón autocebante en el embalse Najasa I parte de la evaluación de un sifón autocebante de garganta (SAG), cuyo trazado responde a los criterios dados en la metodología [Cortada, 1999c], para las mismas condiciones geodésicas e hidráulicas del propio SAG; donde, en lugar de realizar la descarga libre a la atmósfera, entrega el caudal a la entrada de la turbina previamente seleccionada para las características del salto hidráulico.

Para este caso particular se toma la turbina que ha sido seleccionada en el Estudio de Pre-Factibilidad Técnico Económico [EPFTE] [Peña, 2014], elaborado por la Empresa de Hidroenergía para el Plan de Inversiones 2015-2030.

Tabla 1. Datos de la turbina seleccionada en el EPFTE para Najasa I

Elemento	UM	Cant.	Elemento	UM	Cant.
Turbinas	U	2	h turbina	%	94,8
Tipo	Francis		Hbd	m	17,51
P instalada	kW	125,0	Qmax	m ³ /s	0,83
P unidad		62,5	Qd		0,78
h generador	%	90,0	Qmin		0,32

En la figura 3 se muestra la foto de un «sifón autocebante de garganta» (SAG), definido para su aplicación a descarga libre según [Cortada, 1998a; Cortada 1998b] y [Metodología..., 1999]; en este se utilizó la solución más simple: colocar la tubería directamente sobre el talud mojado.

Para lograr el efecto de autocebado, esto es, que el sifón rellene por sí mismo la RA, el conducto debe tener en la cumbre una longitud mayor que la longitud vacía en la RA para producir un volumen en expansión capaz de crear el vacío necesario que provoque el ascenso del agua hasta la garganta, y complete el volumen desplazado en la cumbre. Como la longitud vacía es mayor debido a la pendiente del talud ($L_{vacía}=Z/sen\alpha$), ello hace que sea preferible colocar la rama ascendente en posición vertical, lo que requiere menor longitud sobre la cumbre L_{cum} considerando la expresión (2), deducida según la referencia de Cortada [1998a] para. ($L_{vacía}=Z$).

$$L_{cum} = 1,16 * \left(\frac{p_{atm}}{p_{fz}} \right) * L_{vac} \quad (2)$$



Fig. 3. Sifón autocebante en el embalse Las Casas 2.

3. Diseño de un sifón autocebante para entrega controlada a una hidroeléctrica.

Una CHE es una inversión de mayor importancia y su recuperación depende del número de horas en disponibilidad técnica; es decir; la energía producible depende del mayor volumen de la lámina activa resultante del comportamiento hidrológico, y esta, a su vez, depende del valor de Z (a menor distancia entre el ápice y la superficie líquida, Z, mayor disponibilidad, fig. 1).

Para lograr el menor volumen vacío se propone una obra de fábrica sobre el talud mojado; desde luego, esa propuesta debe ser evaluada desde el

punto de vista de la estabilidad de taludes, o realizar una combinación (vertical-inclinado) de modo que se satisfaga la longitud calculada (L_{cum}), según la expresión (2).

En la figura 4 se muestra la sección transversal del embalse Najasa I por el eje de la Obra de Toma y su galería, y en la figura 5 la sección por el eje de uno de los 2 posibles SA propuestos, antes o a continuación de la sección de la figura 4.

Este sifón toma el agua en el punto *A* y saltando sobre la cortina del embalse realiza la descarga luego de entregar la energía hidráulica en la turbina, para finalmente fluir en el punto *B* a través de la tubería de succión de la turbina.

En el EPFTE referido (ver tabla 1) se establece un Q total máximo de 0,83 m³/s, y una potencia instalada total de 125 kW con dos turbinas Francis, ambas abastecidas por una tubería de $\varnothing 1800$ mm que se monta dentro de la galería del embalse.

La solución de sifones autocebantes, al cruzar por encima de la cortina del embalse incrementa la longitud total de las tuberías, pero utilizando varios sifones es posible transportar solo el agua de una turbina y reducir el diámetro requerido por cada sifón; si el diámetro obtenido para $Q/2$ aún resultara grande para cruzar la cortina, el salto puede hacerse en $Q/3$, $Q/4$, o más, para reintegrarlos parcial o totalmente en una o varias RD, que una vez que salen al talud seco de la presa.

En la MCHÉ Najasa I se asume $Q/2$ para un solo sifón entregando a cada turbina; luego, $Q_{max} = 0,42$ m³/seg con la misma carga de diseño para ambos: $H_{bd} = 17,51$ m

El sifón autocebante se emplaza según el plano (ver Fig. 4), aledaño a la OT, donde se sitúa la MCHÉ para utilizar la mayor carga hidráulica del embalse. El cruce sobre el aliviadero puede proporcionar también la misma potencia (P), pero al disponer de menor carga (H) requiere, en consecuencia, de mayor caudal (Q).

Si se tiene en cuenta que el recurso hidráulico es necesario ahorrarlo en estos tiempos de cambio climático, cuando son más frecuentes las temporadas de bajos niveles que de vertimientos, el cruce sobre la cortina es la solución más adecuada. A continuación se procede según los pasos de la metodología referida en [Cortada, 1998b] y [Cortada, 1999c].

3.1. Establecer las longitudes y ángulos del conducto de acuerdo con los requerimientos topográficos.

Este proceso se realiza siguiendo el trazado más conveniente (Figs. 4 y 5). En este caso de estudio se situó para el NAM, pero es preferible situar la cota de invertida del sifón lo más próxima posible al NAN sin afectar la seguridad del embalse; dado que el valor de la altura Z define el resto de sus características y posibilidades, la cota que se establece a la distancia Z máxima bajo el ápice será el nivel inferior mínimo, a partir del cual pudiera comenzar la cavitación y el sifón dejar de ser operativo.

3.2. Prediseño de la posición del ápice.

Como ha sido definido, la altura sobre el nivel de diseño a la que puede ser situado el ápice del sifón (Z) determina las posibilidades operativas de este; por otra parte, es sabido que el agua dentro del conducto asciende no solo por la creación del vacío, sino porque la atmósfera ejerce una presión de $1,033 \text{ kg/cm}^2$, $10,033 \text{ mca}$, que empujará el líquido hacia cualquier punto donde la presión sea inferior.

En consideración de esta circunstancia pudiera suponerse que creando el vacío perfecto sería posible situar el ápice a $10,33 \text{ m}$ sobre la superficie líquida. Pero a los efectos prácticos más vale aplicar el criterio de A. Schäffer [Schäffer, 1971], quien propone $p/\gamma = 2,00 \text{ m}$ como valor mínimo para la presión en la cumbre; luego, el valor máximo para Z será:

$$Z_{\max} = 8,33 - (V_{2\text{ápice}}^2/2g) - hf$$

De donde se obtiene un valor inferior al posible teóricamente, pero capaz de garantizar la no ocurrencia del fenómeno de la cavitación y sus consecuencias.

Para los cálculos siguientes se tienen dos niveles de diseño:

1. La carga bruta de diseño o carga de diseño, H_{bd} , para la CHE, es la que representa el nivel que más permanece en el embalse; es la carga para la cual se diseñan y se seleccionan las turbinas. La carga por encima y por debajo de la cual, el promedio anual de generación de energía es aproximadamente igual. De ese modo, al hacer corresponder el punto de máxima eficiencia y de velocidad óptima de la turbina con la carga neta promedio, se propicia la utilización más eficiente del agua.

$H_{bd} = 17,51 \text{ m}$, Carga bruta de diseño, tomada del EPFTE para considerar la operación de las turbinas y la capacidad de la MCHÉ en potencia y energía nivel de diseño = $(NAA + H_{bd}) = (\nabla 64,60 \text{ msnmm} + 17,51 \text{ m}) = \nabla 80,69 \text{ msnmm}$.

2. Independientemente de cualquier altura que se tome para situar la invertida del sifón como altura de seguridad (h_s), el ápice estará ubicado a $2D$ sobre esta, justo en el punto de la garganta donde se une la RA con la RD; la invertida de la RA debe coincidir con la corona de la RD al iniciar el tramo de la cumbre para crear la condición autocebante (ver Fig. 5); esto es: que toda el agua del llenado quede retenida en la RD sin que pase a la RA: tal condición hace que el mecanismo hidroneumático que se crea al abrir la válvula de salida realice el trabajo de cebado y control.

El nivel de diseño del sifón nunca va a ser el que se toma para la operación de la turbina, sino el más próximo al nivel del agua que pueda ser excavado en la cortina; luego, para estimar la posición del ápice del sifón teniendo como base el NAN (o el que se determine según el caso, siempre por encima de este), se considera una altura de dos veces el diámetro del conducto, más una altura de seguridad h_s que se ha considerado $h_s=1D$ como posición de la invertida del sifón sobre el NAN; este es un criterio que debe ser evaluado por los diseñadores en función de la seguridad de la cortina.

El ápice Nap (considerando el NAN como referencia) quedaría situado en el nivel $NAN + 2D + h_s = (783,00 + 2*0,60 + 0,60) = 784,80$ msnmm. Para el caso de estudio se ha tomado el NAM (785,40 msnmm).

Luego: $Nap = NAM + 2D = 785,40 + 2*0,60 = 786,00$ msnmm

El nivel de diseño en el NAN en comparación con el NAM, significa mayor profundidad de excavación, pero permite la mayor explotación de la lámina hidráulica disponible; además, también opera como conducto forzado en toda su longitud cuando el nivel del agua se encuentra entre el nivel $NAN + 2D + h_s$ y el NAM. Decidir sobre este aspecto evidencia que un proyecto es una tarea de equipo, y de investigación de todas las características del sitio para establecer el nivel de diseño más adecuado para el sifón.

El sifón autocebante no necesita de una bomba de vacío, pero se requiere la válvula solenoide (ver *vacuum breaker* en la figura 2, y pos A3 en la figura 8) para detener el flujo en casos de emergencia en la CHE, por lo que esta válvula y su sistema de control deben estar protegidos cuando el NA alcanza o sobrepasa el NAM.

Se considera que el llenado inicial del sifón se realiza tomando el agua directamente del embalse, por lo que el NPT de la plataforma sobre el talud mojado se sitúa de modo que la RD se pueda rellenar con una pequeña bomba, o una tubería auxiliar que, con el mismo principio de diseño, pueda

rellenar la RD hasta una cota cercana a la cumbre y completar su volumen manualmente. Esta operación solo se realiza para la puesta en operación, salvo que por una posible parada de emergencia el tramo de la cumbre en la RD quede completamente vacío.

3.3. Estimación del diámetro del sifón.

En la bibliografía china se resume la experiencia que sus ingenieros han obtenido en las centrales hidroeléctricas por ellos construidas (ver tabla 2 y fig. 2), siempre sobre el vertedor y con el diseño convencional de sifones (requerimiento de la bomba de vacío, etcétera).

Luego, para estimar el diámetro, o los diámetros del sifón en su recorrido a la CHE, se toman como referencia las velocidades dadas en dicha tabla, que según la experiencia China se utilizan hasta 4 diámetros diferentes en el mismo conducto.

Teniendo en cuenta el pequeño caudal en circulación para el sifón autocebante de Najasa I, se emplea un solo diámetro en toda la conducción, excepto en el cono de entrada.

Tabla 2. Rango de velocidades en las secciones del sifón

Sección	Objeto	Velocidades admisibles	
		Baja carga	Alta carga
1	Entrada (V_1)	0,8 a 1,2 m/s	
2	Transición aguas arriba	$(V_1 + V_3) / 2$	
3	Garganta (V_2)	1,5 m/s	
4	Conducción forzada	3-4 m/s	4-5 m/s

Aplicando estos criterios de velocidad para cada sección y la ecuación de continuidad

$Q = A * V; A = Q/V; A = \pi D^2/4$ y despejando $D = \sqrt{\frac{4*Q}{\pi V}}$ de modo que para el caudal $Q=0,42$ m³/s, y una velocidad estimada en 1,4 m/s para todo el conducto, se propone un diámetro aproximado de Ø 600 mm, determinando su conformidad una vez obtenidos los resultados del cálculo.

La corona del ápice se acota en el nivel: 786,00 msnmm, (ver 3.2, punto 2).

3.4. Esquema del sifón.

Datos de figuras 5, 6 y 7.

Tabla 3. Datos de la conducción

Indicador	Valor
Longitud total	125,50 m
Longitud ascendente	12,10 m
Longitud en la cumbre	45,10 m
Longitud vacía máxima	7,85 m
Gasto de diseño Qmax	0,42 m ³ /seg
Carga hidráulica Hbd	19,82 m NAd=(√83,00 msnmm)
Viscosidad cinemática ν	0,975 x 10 ⁻⁶ m ² /seg a t=21o C
Coefficiente de W & H wh	120 (tubería acero soldado, 5 años)

3.5. Cálculo del Número de Reynolds.

$$NR = 1,273 \frac{Q}{\nu D} = 1,273 \frac{0,42}{0,975 * 10^{-6} * 0,60} = 913949$$

3.6. Cálculo del coeficiente de fricción.

$$f = \frac{1034}{C^{1,352}} NR^{-0,148} = \frac{1034}{120^{1,352}} 913949^{-0,148}$$

$$f = \frac{1034 * 0,131155}{7090,0} = 0,01913$$

3.7. Cálculo de las pérdidas.

Pérdidas por entrada

Boca de campana L/D = 2

Rejilla

Como ya se expresó en epígrafe 1.1, en una toma de sifón no se requieren rejillas (inciso a) ni compuertas (inciso b).

Cálculo contracción en el cono de entrada

$\frac{D_1}{D_2} = \frac{600}{800} = 0,75$; buscando L/D en la tabla 3 [Cortada, 1998b]= 8,56

Calculando $(K = \frac{L}{D} * f)$; $K = 8,6 * 0,0191 = 0,16$

3.8. Determinación de las relaciones L/D.

Ver tabla 4, Determinación de las relaciones L/D (ver plano fig. 6 y esquema fig. 7).

Tabla 4. Relaciones L/D para accidentes locales y conducción

Rama	Tramo	Accidente	LONG.	LOCAL	CONDUC.	Σ (L/D)
			m	L/D	L/D	
ascendente (RA)	1	Entrada		2,00		2,00
	1-2	Reducción 800x600	1,00	8,56	1,43	9,99
	2-3	Codo 17,9°	3,05	4,71	1,83	9,79
	3-4	Cond. Lineal	6,90		16,75	11,50
	4-5	Codo 180°	1,15	258,10		280,02
	5	Codo 90°	0,50	59,66		60,49
	4-5	Garganta	12,60		20,76	353,79
descendente (RD)	5-6	Cumbre	45,10		75,17	75,17
	6-7	Codo 26,1°	11,25	6,29	18,25	24,54
	7-8	Codo 4,8°	6,30	4,65	10,33	14,99

	8-9	Codo 19.2°	30,70	4,88	51,17	56,04
	9-10	Codo 6,3°	7,65	4,51	12,75	17,26
	10-11	Codo 44.3°	4,85	14,09	8,08	22,17
	11-12	Codo 5,5°	7,55	4,53	12,58	17,16
		Salida y válvula		10,00		10,00
		Total	125,60	382,03	209,10	591,13

3.9. Parámetros para el flujo establecido en el sifón.

3.9.1. Velocidad en el sifón para el gasto regulado.

A diferencia del sifón a descarga libre donde toda la carga disponible produce el gasto máximo según la expresión (1), se utiliza la ecuación de continuidad, calculando el área que corresponde al diámetro (en este caso Ø 600 mm; $A = \frac{\pi D^2}{4} = 0,28 \text{ m}^2$) y teniendo $Q=0,42 \text{ m}^3/\text{seg}$ para el caudal máximo de la turbina que es controlado por sus alabes directores, se obtiene la velocidad de circulación, aplicando la ecuación de continuidad:

$$V_{fe} = Q/A = 0,42/0,28 = 1,47 \text{ m/seg}$$

Luego de este ajuste para la aplicación que se discute, la metodología continúa en sus pasos siguientes.

3.9.2. Carga de velocidad

$$\frac{V_{fe}^2}{2g} = \frac{1,49^2}{19,62} = 0,112 \text{ mca}$$

3.9.3. Pérdidas hidráulicas para el flujo establecido.

Sumatoria de los coeficientes de pérdidas hasta la turbina.

$$\sum K = \sum L/D \times f = 591,113 \times 0,0191 = 11,309$$

Pérdidas en toda la conducción:

$$h_f = \sum K * \frac{V_{fe}^2}{2g}$$

$$hf_{fe} = 11,309 \times 0,112 = 1,272 \text{ m}$$

Utilizando el diámetro de \varnothing 600 mm, las pérdidas constituyen 7,7% de la carga disponible <10%, por lo que el diámetro estimado se acepta como diámetro de proyecto.

3.9.4. Carga neta sobre la turbina.

$$H_n = H_b - hf = 17,51\text{m} - 1,27 \text{ mca} = 16,24 \text{ m}$$

Aplicando la expresión de potencia para el salto hidráulico se tiene:

$$P = \eta * g * H * Q = 0,85 * 9,81 * 16,22 * 0,42 = 62 \text{ kW}$$

Los cálculos han sido realizados para la Hdis del EPFTE y la eficiencia se determina sobre una potencia instalada de 60 kW. Repitiendo el procedimiento para el mismo gasto Q y la HNAM, HNAN y HMIN se obtiene la tabla 5:

Tabla 5. Operación de la MCHE ($P_{inst}=60 \text{ kW}$)

Q=0,42 m ³ /s	COTA msnmm	Z m	Hb m	Hn m	Pabs mca	Ps kW	η^* %
HNAM	85,40	0,60	22,22	20,93	9,99	85	92,4
HNAN	83,00	1,80	19,82	18,53	7,59	76	92,4
Hdis	80,69	4,11	17,51	16,22	5,23	67	92,4
HMIN	77,80	7,00	14,62	13,33	7,39	55	9,6

* Se asume la η nominal cuando la P al salto (P_s) es mayor que la P instalada.

3.9.5. Presión en la cumbre para el flujo establecido.

Pérdidas en la rama ascendente (tomando las relaciones L/D , desde la bocatoma 1 hasta el ápice 5 (Tabla 4).

$$\Sigma K_1^5 = \Sigma \frac{L}{D} * f = 353,79 * 0,192 = 6,779$$

$$hf = \Sigma K_1^4 * \frac{V_{fe}^2}{2g} = 6,779 * 0,112 = 0,762 \text{ mca}$$

Valor de Z para el nivel de diseño de la turbina en $H_b=17,51$ m ($\nabla 80,69$)

$$Z = N_{apice} - N_{dis} = \nabla 84,80 - \nabla 82,11 = 2,69 \text{ m}$$

$$\frac{P_{fe}}{\gamma} = 10,33 - Z - \frac{V_{fe}^2}{2g} - h_{f_{acc}}$$

$$\frac{P_{fe}}{\gamma} = 10,33 - 2,69 - 0,112 - 0,762 = 6,77 \text{ mca}; p_{abs} = -3,56 \text{ mca}$$

Presión que mide un vacuómetro situado en el ápice del sifón cuando el NA se encuentra en el nivel de diseño.

3.9.6. Zmax que puede descender el nivel del agua.

$$Z_{max} = 8,33 - \frac{V_{fe}^2}{2g} - h_{f_{as}} = 8,33 - 0,112 - 0,829 = 7,39 \text{ m}$$

Significa que el nivel mínimo de succión, o la profundidad máxima de succión del sifón que garantiza la no ocurrencia de cavitación, se encuentra en la cota ($\nabla 86,00 - 7,39$ m) = $\nabla 78,61$ msnmm, pero antes de alcanzar esa cota comienzan a producirse los vórtices (movimiento intenso en remolinos), que pudieran producir efectos indeseables, por lo que es necesario adicionarle una longitud mayor a la RA para evitar la aparición y desarrollo de aquellos.

3.9.7. Formación de vórtices.

La sumersión es la altura del nivel del agua sobre la entrada de un sitio donde se produce una succión y provoca la formación de vórtices. En este caso es la entrada del sifón.

Cálculo de la sumergencia.

$$\frac{S}{D_o} \geq 1,5 F_{ro} + 0,1$$

El diámetro y la velocidad utilizados en las expresiones siguientes corresponden a los datos de la entrada:

Determinación del número de Froude y el valor de la sumergencia.

$$F_{ro} = \frac{V_o}{\sqrt{gD_o}} = \frac{V_o}{\sqrt{gD_o}} = \frac{0.84}{\sqrt{9.81 \cdot 0.80}} = \frac{0.84}{5.24} = 0,2983$$

$$S = 1.5 \cdot Fro + 0,10 = 1,5 \cdot 0,2983 + 0,10 = 0,54 \text{ m}$$

Luego, la cota de entrada del sifón sin formación de vórtices será:

$$\nabla 86,00 - 7,39 - 0,547 = \nabla 78,06 \text{ msnmm}$$

Constructivamente se sitúa en $\nabla 78,00$ msnmm, esto es, a 7,00 m sobre el NVM ($\nabla 71,00$ msnmm).

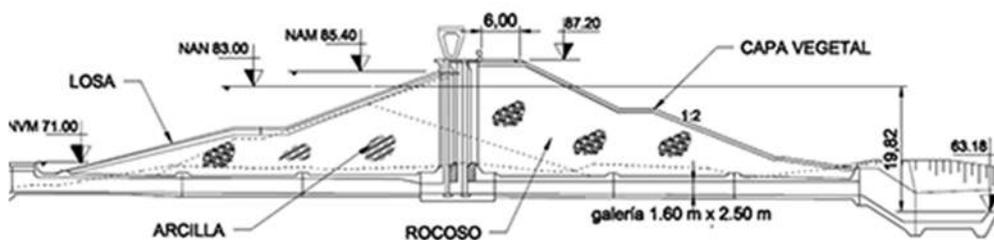


Fig. 4. Sección transversal por la Obra de Toma, embalse Najasa I

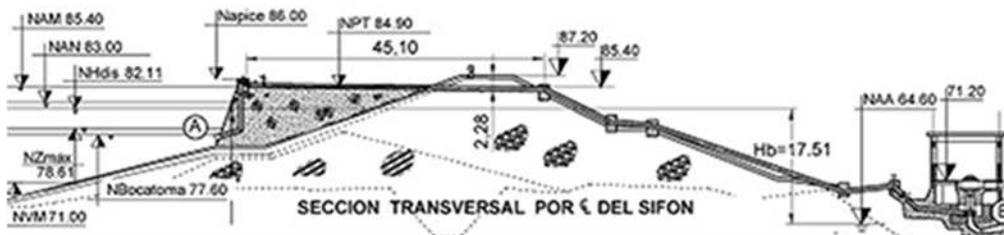


Fig. 5. El sifón se sitúa en la zona de la cortina de mayor elevación posible sobre el canal de salida de la CHE.

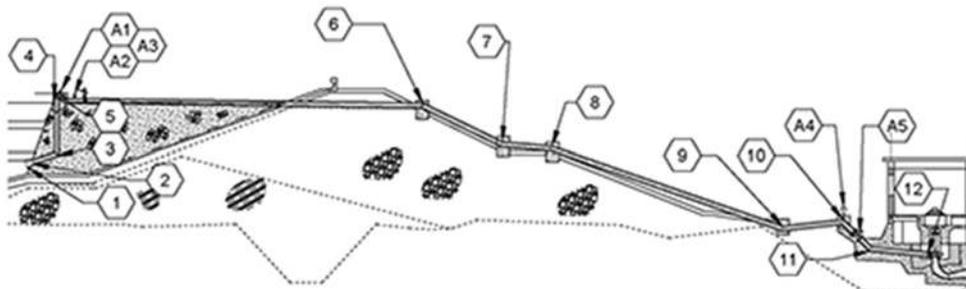


Fig. 6. Perfil para el SA propuesto señalizando accidentes, etcétera.

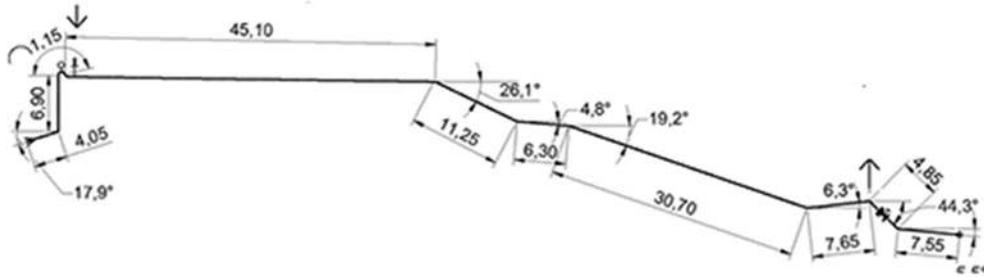


Fig. No 7. Esquema del trazado del sifón, longitudes de los tramos, cambios de dirección.

3.9.8. Comprobación de la condición autocebante.

Diseño: El diseño permite la retención del agua a sección llena en el tramo de la cumbre. (ver garganta en foto fig. 2., plano en fig. 6 y detalle en fig. 8; la garganta se propone fabricar mediante dovelas para este caso).

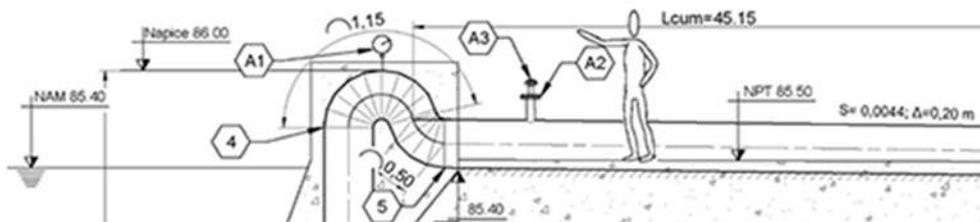


Fig. No 8. Detalle del ápice y garganta del sifón; la invertida de la RA (garganta) coincide con la corona de la RD (cumbre).

A1: Vacuómetro; A2: tubo con tapa hermética para llenado del sifón y soporte de la válvula solenoide; A3: válvula solenoide.

Longitud vacía (L_{vac}), tramo en la rama ascendente que el agua debe remontar para establecer el flujo en el sifón:

$L_{vac} = \frac{z}{\text{sen} \alpha}$, como $\alpha = 90^\circ$; $\text{sen} \alpha = 1$ y $L_{vac} = Z$, como ; luego, medida verticalmente desde el ápice: $Z_{max}=7,39$ m, ($\nabla 77,41$ msnmm).

Aplicando la expresión (2):

$$L_{cum} = k * \frac{p_{atm}}{p_{fe}} * L_{vac}$$

Donde:

L_{cum} : longitud requerida en la cumbre para establecer la condición autocebante

K; 1,16, constante determinada en el laboratorio (1)

p_{atm} : presión atmosférica, presión existente en el punto inicial

p_{fe} : presión para el flujo establecido (medida en el ápice)

L_{vac} : longitud vacía del punto ascendente

Para el nivel de diseño:

$$L_{cum} = 1,16 \left(\frac{10,33}{6,77} \right) * 2,69 = 4,76 \text{ m}$$

Para el nivel mínimo:

La presión mínima admitida en la cumbre, como ya se formuló, es 2,00 m y para este valor la Z máxima es 7,39 m, luego:

$$L_{cum} = 1,16 \left(\frac{10,33}{2,00} \right) * 7,39 = 44,28 \text{ m}$$

Comparación de longitudes

$$L_{cum} = 45,10 \text{ m}$$

Como se observa, para el nivel de diseño el sifón se autoceba y mantiene el flujo controlado (recordar que el autocontrol corresponde a autocebados sucesivos de menor volumen que el inicial), la longitud de diseño excede en casi 10 veces la necesaria para provocar el efecto requerido a ese nivel, pero es necesario mantenerlo también hasta el límite que ocurrirá para la máxima profundidad de operación en que justamente la L_{cum} es ligeramente superior a la longitud física del conducto sobre la cumbre. Luego el sifón propuesto se mantendrá en operación hasta el límite establecido por la atmósfera.

Comprobación de la capacidad del sifón para la H mínima

Los cálculos realizados para determinar las pérdidas no dependen de la carga hidráulica, solo del gasto en circulación que es regulado por la turbina. Pero el Q del Sifón en descarga libre depende de H, por lo que es necesario verificar si es capaz de entregar un Q superior al Qdiseño para la H mínima del sistema. Esta ocurre para el nivel en Z_{max} y es 778,61 msnmm, luego $H_{nmin} = 13,07$ m, conduciendo el $Q_d = 0,42$ m³/s, $\Sigma K = 16,98$ se obtiene la velocidad de circulación, aplicando la expresión (1).

$$V_{fe} = 4,43 * \sqrt{\frac{H_n}{(1+\Sigma K)}} = 4,43 * \sqrt{\frac{13,07}{(1+17,0)}} = 3,82 \text{ m/s}$$

Aplicando continuidad se obtiene $Q=1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ y se verifica que el sifón a carga mínima H_{min} continua suministrando el caudal necesario a la CHE para turbinar el Q_{max} .

4. Un nuevo elemento a considerar en la aplicación hidroenergética del SA.

En la etapa de investigaciones que dio lugar a la presentación del sifón autocebante de garganta como solución agrícola (1998), se observaron fenómenos hidráulicos adicionales no descritos en [Cortada, 1998b] al considerarse entonces que no ejercían ninguna influencia o que esta era despreciable para el resultado obtenido.

Para la aplicación hidroenergética se requiere, además, eliminar los gases que pueden pasar a la turbina causando efectos no previstos. Para resolver este problema se propone una solución muy simple según se muestra en la figura 6. Esta solución se plantea a partir de las observaciones y la experiencia obtenida durante las pruebas de campo realizadas en la primera etapa de investigaciones sobre un sifón autocebante [Cortada, 1998b], y las referencias dadas por otros autores [Kisielieva, 1974], [European SHP, 2004] y [Fontanills, 2015].

4.1. Destino de los gases retenidos en la zona del ápice.

En Cortada [1998b] el capítulo VIII, epígrafe 8.2 «De los resultados experimentales» en el punto 6.3, se expresa:

«La rama de salida no requiere de la entrega sumergida para mantenerse en servicio».

Es la confirmación sobre un fenómeno presente: el sifón autocebante no requiere de la descarga sumergida que se establece en la bibliografía precedente como condición inevitable, pero de cuyo descubrimiento no se hizo la relatoría de las observaciones en el trabajo de tesis original [Cortada, 1998b].

El sifón No. 1, (Fig. 3) de «Las Casas», se proyectó con una caja de salida en hormigón para garantizar la entrega sumergida siguiendo la experiencia registrada en libros, artículos y proyectos.

Dada la urgencia del cultivo, el agua debía de estar irrigando los surcos, por lo que este sifón se puso en funcionamiento con la modificación del ápice y eliminación de la válvula en la rama de entrada pero sin ejecutarse el referido objeto de obra.

4.2. Descarga libre sobre la superficie del canal distribuidor.

Observación: El flujo sale del tubo alcanzando en su parábola una distancia máxima, en la medida que el tiempo transcurre esa distancia se reduce paulatinamente como evidencia de la reducción del gasto según lo establece la bibliografía. Los gases acumulados van cerrando la sección hidráulica y disminuyendo la velocidad del flujo en la salida, hasta el momento en que se corta la vena líquida; al ocurrir esto se repite automáticamente el proceso de autocebado y el chorro alcanza nuevamente la distancia máxima iniciando un nuevo ciclo.

4.3. Descarga sumergida en el canal distribuidor.

Los agricultores necesitaron un mayor alcance del servicio y elevaron los hombros del canal; esta acción provocó que la descarga libre del flujo pasara a sumergida.

Observación: Continuamente se observa una columna de burbujas pequeñas ascendiendo del tubo a la superficie líquida, a intervalos regulares se produce la expulsión de una gran burbuja que remueve toda la superficie evidenciando que la acumulación de gases que provocan el corte del flujo en un sifón convencional, también producen el corte, pero a la vez los gases acumulados en el ápice son arrastrados al exterior creando el estado inicial para un nuevo ciclo de autocebado a menor volumen que el autocebado inicial, aparentemente solo se desarrolla la etapa de expansión-contracción dando así continuidad a un proceso automático de control.

De acuerdo con la explicación del proceso dada en Cortada [1998b], capítulo II, epígrafe 2.6, la expulsión de los gases al exterior es una propiedad inherente al diseño del conducto y al mecanismo hidráulico que se crea en su interior mediante la presencia de la garganta que permite establecer la relación deducida de la Ley Boyle-Mariotte

$$L_{cum} = k * \frac{p_{atm}}{p_{fz}} * L_{vac} \quad (3)$$

El autocebado se obtiene siempre que la L_{cum} existente sea mayor que la L_{cum} calculada lo que garantiza que el volumen en expansión en la cumbre llene la rama ascendente y complete, además, la sección del conducto siempre que $y/Y \Rightarrow 0,80$.

En las investigaciones realizadas en el CIH (1998), se comprobó que si la relación y/Y resulta menor que 0,80, no se alcanza el efecto de autocebado.

Una vez cebado el sifón, en cada nuevo ciclo: corte-expulsión-recarga, este se produce solo para el volumen ocupado por la burbuja de gases expulsada, mucho menor que el autocebado para la longitud vacía inicial.

5. ¿Entubamiento de la galería o cruce de la cortina mediante sifones?

En el EPFTE citado [Peña, 2014] para ejecutar la MCHE mediante el montaje por secciones de tubos de acero soldable de $\Phi 1800$ mm dentro de la galería. Una vez que todas las secciones han sido colocadas y soldadas, dándole continuidad hasta alcanzar el exterior de la galería se conectan perpendicularmente a la tubería forzada dos tubos de $\Phi 600$ mm que distribuyen a cada una de las dos máquinas de la MCHE.

El entubamiento es una tarea de inversión altamente costosa y difícil de realizar, complicándose en este caso por las dimensiones de la galería y por el diámetro del tubo a utilizar, además de las condiciones de inseguridad que siempre presenta trabajar dentro de una estructura a más de 10,0 m bajo el nivel del agua, así como los medios y mecanismos requeridos para ejecutar este trabajo, incluyendo la instalación de rieles para el desplazamiento de los carros transportadores de las secciones de la tubería (que constituyen estructuras perdidas), relleno de hormigón etc. Por supuesto, las compuertas y rejas requeridas para la Toma de Fondo ya existen junto con la galería.

Para el caso de ejecutar la conexión mediante sifones, se realiza el montaje de un SA para cada máquina, como recomienda el mejor aprovechamiento del recurso hidráulico y la lámina activa, evidentemente, cada uno tendrá una longitud mayor que el entubamiento a través de la galería y sus derivaciones, pero en compensación estos serán de un diámetro muy inferior y su montaje prácticamente no presenta ninguna complicación tecnológica, salvo el cruce sobre la cortina cuidando por la seguridad de esta. Como se ha mencionado anteriormente, los sifones no necesitan de rejillas ni válvulas de emergencia, solo una válvula solenoide de 50 mm de diámetro.

El entubamiento de las galerías, como una ventaja relativa sobre los sifones presenta la posibilidad de ser utilizado en una lámina hidráulica hasta el NVM, pero su costo hace que evaluar el uso de sifones pudiera ofrecer una alternativa si las características del sistema hidráulico, el comportamiento hidrológico del embalse y su explotación así lo recomiendan una vez calculadas ambas soluciones.

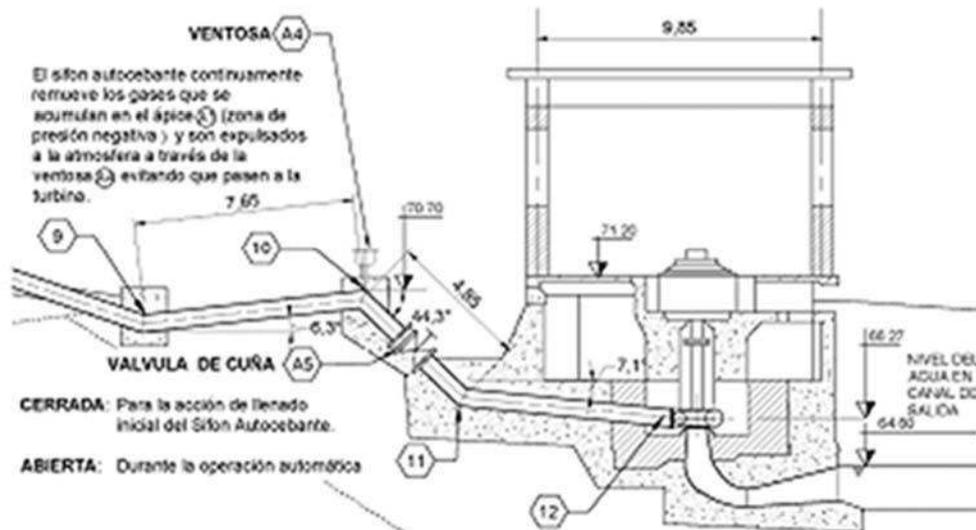


Fig. 9. Disposición de la tubería forzada para la expulsión automática de los gases acumulados.

Conclusiones

Las galerías construidas en la mayoría de nuestros embalses no fueron previstas para su uso energético, por lo que sus estructuras de entrega no soportan las características del flujo en conducción forzada.

1. El entubamiento de las galerías tiene la gran ventaja de que permite utilizar todo el recurso hidráulico disponible desde el NAM hasta el NVM.
2. La dificultad que presenta esta adaptación es la complejidad constructiva y alto costo de las estructuras requeridas.
3. En Cuba hasta el presente no ha sido utilizada una solución de Sifón para su aplicación en la generación de electricidad pero su empleo en el mundo es una práctica reconocida y avalada en la bibliografía.
4. La búsqueda de información proporciona ejemplos de hidroeléctricas en operación mediante sifones convencionales de diversos tipos en la zona del aliviadero de los embalses, pero en ningún caso se encuentra una solución en el punto de mayor carga hidráulica disponible.
5. El uso de sifones autocebantes demuestra la ventaja de ser una solución que resuelve las dificultades que presentan los sifones convencionales, además de ser rápida, económica y sin ninguna complejidad constructiva.
6. La solución de sifón elimina la necesidad de rejillas y compuertas en la toma.

7. El cierre de emergencia se induce mediante una válvula solenoide de 50-100 mm de diámetro evitando el golpe de ariete en el sistema, todo lo cual reduce costos.
8. La expulsión de los gases fue un fenómeno observado en la investigación original pero al no influir más que en la eliminación de la necesidad de construir una obra de salida solo fue mencionado como prueba para descartar ese paradigma.
9. El fenómeno anterior, a los efectos de la hidroenergía, puede ser considerado como un descubrimiento.

Recomendaciones

Los criterios dados hacen que la decisión sobre la utilización de una solución de entubamiento o de sifones dependan de:

1. El estudio hidrológico y la permanencia de niveles del embalse que permitan el aprovechamiento del recurso hidráulico dentro de la lámina activa para los sifones.
2. La evaluación financiera de los costos y recursos necesarios para ejecutar una u otra variante, teniendo en cuenta que ambas soluciones, significan también una agresión a la seguridad del embalse y deben ser considerados todos los elementos de protección necesarios.
3. Presuntamente, la capacidad comparada para la producción de energía respecto a los costos de inversión es el criterio fundamental para una decisión respecto a la tecnología a aplicar en cada caso.
4. El caso de estudio mostrado: Najasa I, debe ser revisado considerando otras variantes para el diseño y ejecución de la bocatoma y RA utilizando otro diseño del sifón autocebante, que manteniendo el principio puede permitir la reducción de la longitud obligada L_{cum} para una RA vertical o inclinada.
5. Resulta necesario revisar en cuanto se reduce este objeto de obra, situando la RA con la pendiente del talud u otra mayor según variantes evaluadas, hasta encontrar una inclinación de compromiso. Esto se debe a la presencia de una berma en el talud mojado y la profundidad correspondiente a la Z_{max} .
6. Dar a conocer esta propuesta a las entidades de EIPH del país para evaluar y determinar la solución más ventajosa en las CHE a construir en el programa de inversiones de la Empresa de Hidroenergía.

Bibliografía

- CORTADA FERRERA, JORGE LUIS (1998A). Patente de Invención «Sifón autocebante de garganta». La Habana: OCPI (Oficina Cubana de la Propiedad Industrial). No. 22524, Clasificación Internacional de Patentes-E03V7/07.
- CORTADA FERRERA, JORGE LUIS (1998B). Tesis de Maestría: Sifón autocebante de garganta, un diseño sin equipamiento auxiliar para el cebado y mantenimiento del flujo. La Habana: Centro de Investigaciones Hidráulicas. Reg. Ispjae Fo.085, No.1898, MES Fo.157, No.3923.
- European Small Hydropower Association (2004). Guide on how develop a small hydropower plant. Bruselas: ESHA.
- FONTANILLS, LUIS A (2015). *Proyecto de una PCHE en la presa Najasa II*. La Habana: Tesis de grado, CIH, Ispjae.
- GIBSON, A.H (1952). *Hydraulics and its applications*. London: Constable & Co.
- PEÑA, LEONARDO (2014). *Estudio de Prefactibilidad MCHE NAJASA I, Camagüey*. La Habana: Empresa de Hidroenergía.
- KISIELIEVA, P.F.(1974); *Manual de hidráulica*. (en ruso). Moscú: Energía.
- SCHÄFFER, AUGUST (1971). *Hidráulica y construcciones hidráulicas*. Barcelona: Ed. Labor.
- SCHOKLITSCH, A. (1981). *Arquitectura hidráulica (I)*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili.
- Zhagjiang University (2014). *Metodología del Hangzhou Regional Center, Asia Pacífico en China (HRCAP)*. Beijing: Zhagjiang University Press.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

M.Sc. Manuel Álvarez González.

EDITOR JEFE:

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

EDITORA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra.

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

M.Sc. Manuel Fernández Rondón.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. David Pérez Martín.

Dr. César Cisnero Ramírez



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>