



Evaluación de la generación de la Pequeña Central Hidroeléctrica de Moa*

Yonk Maikel Borges Matos

Carrera: Ingeniería eléctrica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se realizó una evaluación del impacto económico que ha tenido la generación de energía eléctrica de la Pequeña Central Hidroeléctrica de Moa. Para ello se realizó una caracterización de la instalación y del sistema de distribución municipal. Se describieron los resultados del análisis de la demanda y la generación, además, se realizó la valoración económica y ambiental determinando los costos, tanto de agua consumida, en función de la generación, como la cantidad y valor del combustible ahorrado.

Palabras clave: Generación eléctrica; central hidroeléctrica; sistema de distribución.

* Trabajo tutorado por el Ms.C. Yordan Guerrero Rojas.
Recibido: 19 junio 2013 / Aceptado: 25 febrero 2014.

Power generation evaluation to Small Hydroelectric Power Plant of Moa

Abstract: This investigation was carried out to evaluate the economic impact of power the facility and the power distribution system in the municipality. It included describing the results from the assessment of the power demand and distribution. An economic and environmental assessment was also carried out determining the costs of water consumed based on generation as well as fuel savings in terms of quantity and money.

Key words: Power generation; hydroelectric power plant; distribution system

Introducción

En la actualidad los costos de la producción de la energía eléctrica se incrementan continuamente, pues el recurso energético más utilizado presenta una situación de agotamiento gradual que lo hace día a día más costoso.

El aprovechamiento de la energía potencial acumulada en el agua para generar electricidad es una forma clásica de obtener energía. Alrededor del 20 % de la electricidad usada en el mundo procede de esta fuente. Es, por tanto, una energía renovable pero no alternativa, porque se viene usando desde hace muchos años como una de las fuentes principales de electricidad.

Dentro de estas energías la utilización del agua ha ido en ascenso cada año, a tal punto que en el año 2009 representó el 24 % de la producción energética mundial (Federico, *et al.*, 1995), con tendencia al aumento. Se calcula que si se explotara toda la energía hidroeléctrica que el mundo entero puede dar, solo se cubriría el 15 % de la energía total que consumimos. En realidad se está utilizando alrededor del 20 % de este potencial y, en general, en los países desarrollados, el porcentaje de explotación llega a ser de más del 50 %.

En Cuba, la aplicación de la hidroenergía como fuente de generación de electricidad data de principios del siglo pasado, cuando se pusieron en explotación pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, de los cuales algunos se mantienen generando en la actualidad (UNE, 2007).

Los costos de operación y mantenimiento están determinados por el personal necesario, lubricantes, piezas de reparación, infraestructura administrativa, etc. Ellos son función del tipo y la calidad de la tecnología empleada y de cuán racional sea el uso de la instalación. También dependen de la legislación de cada país (salarios, beneficios sociales, impuestos, etc.) (Boza & Caballero, 2002)

En el caso específico de Moa, la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE), ubicada en la presa Nuevo Mundo, está diseñada para generar una potencia de 2 MW, los cuales se encuentran sincronizados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Desde el año 2010 esta pequeña central hidroeléctrica beneficia el servicio eléctrico del municipio al integrarse al SEN. Por otro lado, al existir una falla en la red nacional podrá funcionar en isla, alimentando al circuito 6 u otro, o en paralelo con la batería de Grupos

Electrógenos Diesel que se encuentra instalada en el municipio, para alimentar la mayor parte de los clientes residenciales.

En el año 2010 inicia el funcionamiento de la Pequeña Central Hidroeléctrica de Moa, con capacidad de 2 MW, que son entregados directamente al SEN por medio de la interconexión con el circuito 6 que alimenta al reparto Rolando Monterrey. El aporte de energía y el combustible ahorrado por esta instalación aún no ha sido evaluado. Se impone un análisis de la energía entregada y del ahorro de combustible en esta instalación, que en el año 2012 fue la central de su tipo que más aportó al SEN.

El empleo de las energías renovables es una solución segura para la obtención de energía limpia, sin el uso de combustible fósil, esto no solo beneficia a la economía sino también al medio ambiente. Este trabajo se propone cuantificar el ahorro por sustitución de combustible, así como sus costos y las ganancias percibidas por la empresa por concepto de no emisión de gases contaminantes a la atmósfera; además de evaluar el impacto de la energía aportada por la PCHE de Moa al SEN.

Estructura de un microsistema

Un papel importante de las máquinas sincrónicas es su utilización como generadores de electricidad, ya sea como parte de microsistemas aislados o de un sistema eléctrico de potencia. El primero de estos está compuesto, en términos generales, por los siguientes subsistemas:

1. Generación de energía
2. Subestaciones
3. Distribución
4. Consumos.

Cada subsistema contiene, a su vez, diferentes componentes físicos, y por razones técnico-económicas la energía se genera, transmite y distribuye, en forma trifásica.

1.- Generación: La energía eléctrica se genera en las centrales eléctricas. Una central eléctrica es una instalación que utiliza una fuente de energía primaria para hacer girar una turbina que, a su vez, hace girar un alternador, que produce energía en corriente alterna sinusoidal a voltajes intermedios, entre 5 kV a 23 kV en forma convencional, aunque existen unidades de generación en 115 kV o 230 kV.

2.- Subestaciones: Las instalaciones llamadas subestaciones son plantas transformadoras que se encuentran junto a las centrales generadoras (Subestación elevadora) y en la periferia de las diversas zonas de consumo (Subestación reductora), enlazadas entre ellas por la red de transporte.

3.- Distribución: Las redes de distribución de energía se encuentran en áreas urbanas y rurales, pueden ser aéreas o subterráneas (estéticamente mejores, pero más costosas). La red de distribución está formada por la red en Alta Tensión (AT) (suele estar comprendida entre 6 kV a 24,9 kV) y en Baja Tensión (BT) (380/230/110 V).

4.- Consumo: En los centros de consumo de la energía eléctrica este se puede realizar en baja o alta tensión:

Otros elementos importantes en el análisis de los microsistemas o microrredes lo constituyen la generación y la demanda.

La generación, en términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía no eléctrica (química, mecánica, térmica o luminosa, entre otras) en energía eléctrica. Para la generación a nivel industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, que ejecutan algunas de las transformaciones citadas. Estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico.

La demanda de energía eléctrica de una ciudad, región o país tiene una variación a lo largo del día; esta variación es función de muchos factores, entre los que destacan: tipos de industrias existentes en la zona y turnos que realizan en su producción, climatología extremas de frío o calor, tipo de electrodomésticos que se utilizan más frecuentemente, tipo de calentador de agua que haya instalado en los hogares, la estación del año y la hora del día en que se considera la demanda. La generación de energía eléctrica debe seguir la curva de demanda de manera instantánea y, a medida que aumenta la potencia demandada, se debe incrementar el suministro o generación y viceversa.

Hidroeléctrica Nuevo Mundo

La PCHE Nuevo Mundo cuenta con 2 MW de capacidad instalada; esta planta generadora de electricidad se encuentra a 44 m por debajo del dique de salida de la presa del mismo nombre. Situada entre montañas a más de 500 m sobre el nivel del

mar, en su proyecto inicial se concibió como un aseguramiento energético de la industria del níquel.

La presa Nuevo Mundo tiene una capacidad nominal de 141 000 000 m³ de agua embalsada que se mantiene relativamente constante a través del año, lo que asegura el recurso hídrico para que las turbinas trabajen de forma continua. Esto es debido al magnífico régimen de lluvias que prevalece en la región montañosa donde se encuentra (San Miguel, 2011).

Atendiendo a la altura del diseño, la PCHE tiene una capacidad total de generación de 2 000 kW, para ello cuenta con dos turbinas de caudal de 2,8 m³/s cada una, para un chorro total de 5,6 m³/s.

La tensión de salida es de 6,3 kV, la que posteriormente se eleva a 13,8 kV en la subestación de salida, con un transformador de 2 500 kVA, conectándose con el circuito residencial 6 del reparto Rolando Monterrey y alimentando las facilidades temporales de Ferroníquel. Las principales características de los generadores y turbinas hidráulicas se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Datos nominales del conjunto Turbina-Generador

Turbina	Generador
Tipo HLA244-WJ-60	Tipo: SFW100-8/1430
Altura de diseño o carga nominal: 44,2 m	Corriente nominal: 114,55 A
Carga máxima: 57 m	Tensión nominal: 6,3 kV
Carga mínima: 25 m	Potencia activa nominal: 1 MW
Gasto: 2,8 m ³ /s	Potencia aparente nominal: 1,25 MVA
Potencia: 1,0515 MW	Factor de potencia: 0,8
Velocidad: 900 rpm	Corriente de excitación: 171 A
Salida: 64 kW	Tensión de excitación: 67 V
Altura de succión: 1,8 m	Tipo de conexión: Y
Velocidad de envaramiento: 1940 rpm	Número de fases: 3
Presión mínima del caracol: 1,24 MPa	Eficiencia: 95 %
Peso: 12,93 t	Clase de aislamiento del rotor: F
	Clase de aislamiento del estator: B
	Peso: 11,8 t

Evaluación de la generación

Desde el surgimiento de la PCHE se ha incrementado progresivamente la producción de electricidad en esta instalación, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Generación promedio para el período septiembre 2011 - agosto 2012

Generación		
Meses	Año	P(kW)
septiembre	2011	1596,99
octubre	2011	839,47
noviembre	2011	879,73
diciembre	2011	1254,80
enero	2012	1277,94
febrero	2012	327,81
marzo	2012	1727,76
abril	2012	1715,49
mayo	2012	1759,96
junio	2012	1760,95
julio	2012	1176,33
agosto	2012	891,18

Además de este período, se cuenta con los registros de la generación desde la puesta en marcha hasta el 2012. En la Figura 1 se muestra el comportamiento anual de la misma.

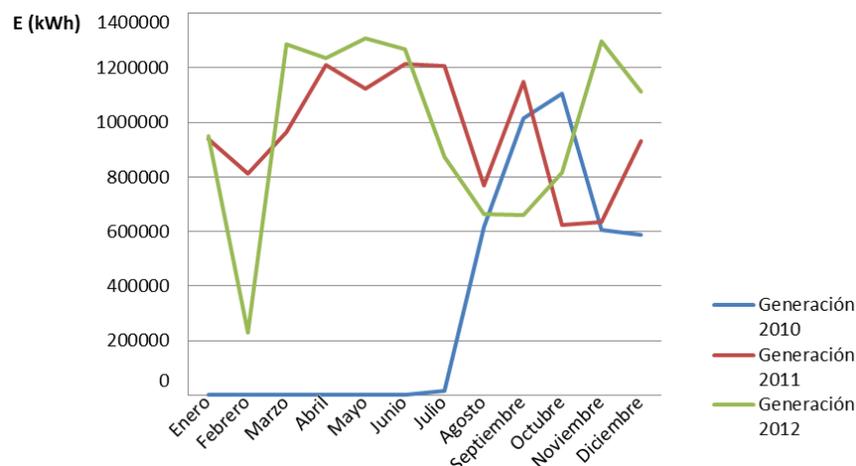


Figura 1. Comportamiento mensual de la energía durante el año 2010 hasta 2012.

La generación se ha mantenido inestable desde la puesta en marcha de la Pequeña Central Hidroeléctrica debido a las averías presentadas por los componentes del sistema de generación, proporcionando caídas en los picos de la misma en cada una de las interrupciones que han provocado al proceso. Se muestra que la pendientes de las curvas no se comportan estables alrededor de un valor .

Comportamiento generación vs demanda del Microsistema PCHE-circuito 6

Partiendo de los registros horarios de generación y demanda se trabaja con los valores promedios estableciendo una relación que permite determinar la posibilidad de autoabastecimiento o no del circuito 6.

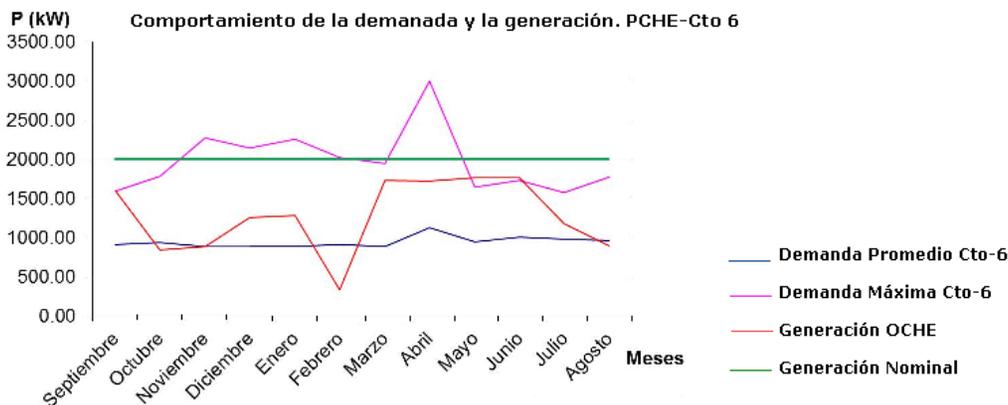


Figura 2. Relación entre las demandas media y máxima vs generación media.

En la Figura 2 es apreciable que la demanda promedio del circuito 6 se satisface con la generación de la PCHE a plena capacidad. Por lo que es posible prescindir de la generación convencional desde el SEN, siempre que se garantice la estabilidad del microsistema. Sin embargo, para los registros de demanda máxima, aún funcionando la PCHE a plena capacidad, no es posible cubrir la demanda.

Tabla 3. Registros de demanda horaria (1 de abril de 2012)

Horario	Demanda (kW)	Generación (kW)
12:00 a.m.	618,75	1 952
1:00 a.m.	565,75	1 897
2:00 a.m.	539,33	1 904
3:00 a.m.	524,33	1 914
4:00 a.m.	537	1 920
5:00 a.m.	571,25	1 920
6:00 a.m.	734	1 920
7:00 a.m.	898,50	1 918
8:00 a.m.	978,25	1 922
9:00 a.m.	1053	1 894
10:00 a.m.	1 179	1 948
11:00 a.m.	1 298,50	1 906
12:00 p.m.	1 034,75	1 924
1:00 p.m.	816	1 912
2:00 p.m.	889,25	1 922
3:00 p.m.	1 052,75	1 918
4:00 p.m.	1 274,50	1 920
5:00 p.m.	1 454	1 867
6:00 p.m.	1 484,25	1 840
7:00 p.m.	1 283,50	1 982
8:00 p.m.	1 060,75	1 918
9:00 p.m.	955,50	1 922
10:00 p.m.	827	1 918
11:00 p.m.	815,60	1 918

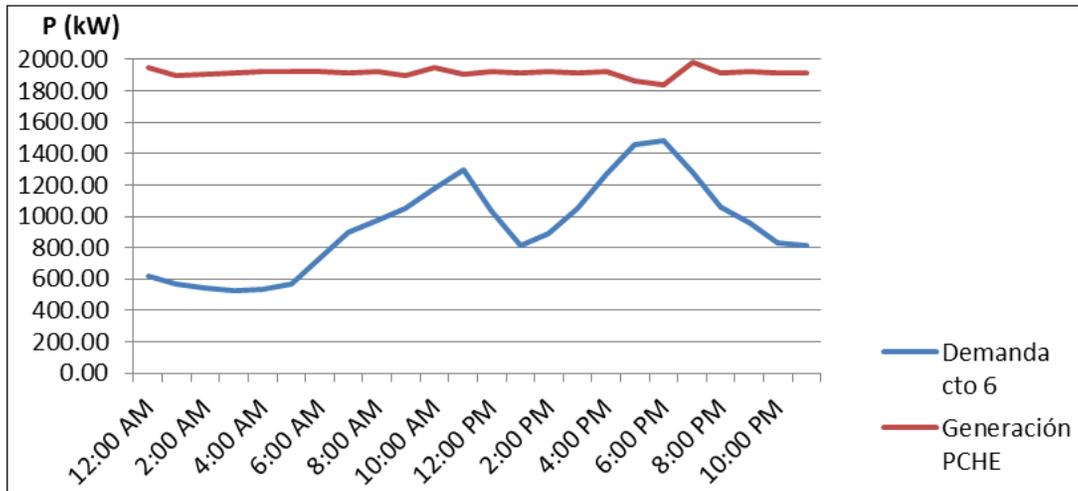


Figura 3. Comportamiento demanda-generación. PCHE. 1 de abril de 2012.

La generación ha estado estable y ha suplido la demanda del circuto 6 en todos las horas del día.

Tabla 4. Registros de demanda horaria (3 de julio de 2012)

Horario	Demanda (kW)	Generación (kW)
12:00 a.m.	914	1 796
1:00 a.m.	784	1 794
2:00 a.m.	740	1 796
3:00 a.m.	727	1 704
4:00 a.m.	713	1 804
5:00 a.m.	728	1 804
6:00 a.m.	941	1 802
7:00 a.m.	905	1 806
8:00 a.m.	853	1 804
9:00 a.m.	882	1 808
10:00 a.m.	940	1 804
11:00 p.m.	1 104	1 810
12:00 p.m.	1 127	1 810
1:00 p.m.	917	1 818
2:00 p.m.	766	1 162
3:00 p.m.	880	1 812
4:00 p.m.	999	1 803
5:00 p.m.	1 236	1 821
6:00 p.m.	1 400	1 704
7:00 p.m.	1 447	1 784
8:00 p.m.	1 360	1 810
9:00 p.m.	1 113	1 634
10:00 p.m.	1 001	1 604
11:00 p.m.	923	1 800

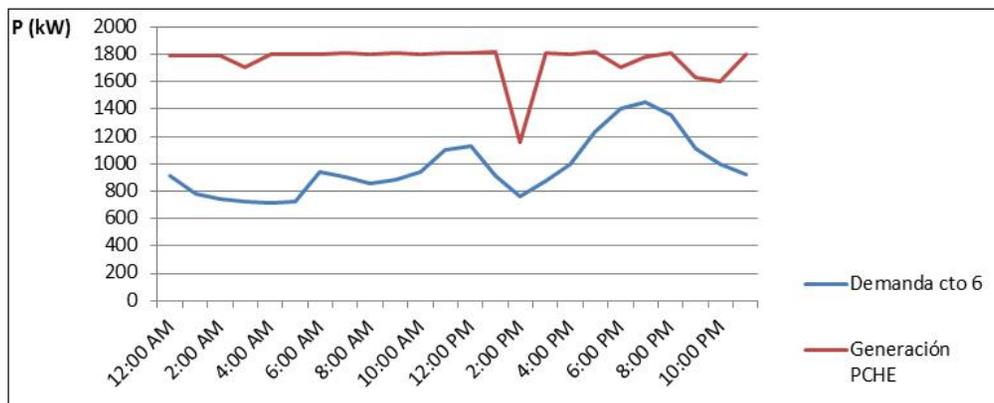


Figura 4. Comportamiento demanda-generación. 3 de julio de 2012.

Valoración técnico-económica

Teniendo en cuenta la energía generada por la Pequeña Central Hidroeléctrica en los años de generación, valorando el combustible consumido por una termoeléctrica para obtener esta misma cifras de energía generada y tomando como referencia el precio del petróleo (diesel) el día 25 de mayo de 2013 (101,32 dólares el barril), para el período de tiempo analizado se obtienen los costos en que se hubiesen incurrido de haberse utilizado la termoenergía y se obtuvieron los siguientes resultados por meses y años, como se muestran en las Tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5. Ahorro y costo combustible según generación para el año 2010

Meses	Costo de combustible (CUC)	Ahorro de combustible (t)	Generación (kWh)
julio	9 022,546	5	15 135
agosto	290 540,166	161	618 165
septiembre	474 609,2232	263	1 013 390
octubre	519 724,9928	288	1 107 100
noviembre	283 322,1292	157	604 352
diciembre	274 298,57	152	586 427
Total	1 851 517,627	1 026	3 944 569

Tabla 6. Ahorro y costo combustible según generación para el año 2011

Meses	Costo de combustible (CUC)	Ahorro de combustible (t)	Generación (kWh)
enero	442 127,0444	245	940,812
febrero	380 769,6788	211	811,985
marzo	452 954,0996	251	965,704
abril	568 448,7676	315	1 212,067
mayo	526 952,1484	292	1 122,680
junio	570 253,2768	316	1 215,619
julio	566 643,2452	314	1 207,965
agosto	360 920,0776	200	768,510

septiembre	539 574,594	299	1 149,836
octubre	292 344,6752	162	624,569
noviembre	297 758,2028	165	633,403
diciembre	438 517,0128	243	933,568
Total	5 437 262,823	3013	11 586 718

Tabla 7. Ahorro y costo combustible según generación para el año 2012

Meses	Costo de combustible (CUC)	Ahorro de combustible (t)	Generación (kWh)
enero	445 330,7828	247	950,785
febrero	106 471,1088	59	228,156
marzo	602 736,4688	334	1 285,453
abril	579 275,8228	321	1 235,156
mayo	613 563,524	340	1 309,410
junio	595 517,4188	330	1 267,882
julio	411 448,3616	228	875,192
agosto	310 390,7804	172	663,038
septiembre	310 390,7804	172	660,160
octubre	384 378,6972	213	817,636
noviembre	609 954,5056	338	1 298,209
diciembre	523 334,0112	290	1 113,782
Total	5 492 792,262	3043	11 704,859

La generación mediante esta energía renovable no solo provoca un impacto económico por ahorro en inversión, sino que deviene en un impacto ambiental por la no emisión de CO₂ a la atmósfera que genera también ganancias para la empresa, dejándose de emitir 21 789 t desde la puesta en marcha de la PCHE.

Tabla 8. Resumen de impacto de la PCHE sobre el SEN y el medio ambiente

Años	Total de generación (kWh)	Agua consumida (m ³)	Combustible diesel ahorrado (t)	Costo de agua consumida (CUP)	Costo de combustible (CUC)	CO ₂ Dejado de emitir(t)	Bonificación de CO ₂ (CUC)
2010	3 944,569	35 253 220	1 026	149 125,93	1 851 518,64	3 156	31 600
2011	11 586,718	110 772 715	3 013	464 017,84	5 437 257,757	9 269	92 700
2012	11 704,859	125 073,959	3 043	570 881,03	5 491 396,073	9 364	93 600
Total	27 236,146	271 099 894	7 081	1 184 024,8	12 780 172,47	21 789	217 900

Para realizar los cálculos expuestos en las tablas anteriores se utilizaron las siguientes

$$\text{fórmulas: } Ca = Ic \cdot x \quad (1)$$

Donde:

Ca: Combustible ahorrado

Ic: Índice de consumo por kW generado por una termoeléctrica (cte = 0,26)

x: Cantidad de kW generados

$$Cd = p \cdot q \quad (2)$$

Donde:

Cd: Costo de combustible diesel

p: Precio del barril de combustible

q: Cantidad de barriles

$$Cac = Pa \cdot V \quad (3)$$

Donde:

Cac: Costo del agua consumida

Pa: Precio del m³

V: Cantidad de m³

$$Q = q \cdot y \quad (4)$$

Donde:

Q: Cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera

q: Cantidad de CO₂ emitido por kW generado (cte = 0,8)

y: Cantidad de kW generados

$$IQ = Pq \cdot q \quad (5)$$

Donde:

IQ: es ingreso por CO₂ dejado de emitir

Pq: es precio por unidad de CO₂ dejado de emitir.

Del análisis de los valores relacionados en las tablas se obtuvieron los resultados siguientes:

Se ahorraron por concepto de combustible en los años:

2010: 1 851 518,64 CUC

2011: 5 437 257,757 CUC

2012: 5 491 396,073 CUC

Obteniéndose un ahorro en el período de 12 780 172,47 CUC.

Luego de sustraerle al costo del combustible el costo del agua consumida (convertido de CUP a CUC), para la generación del período se obtiene un ahorro de 12 732 811,48 CUC, pero el ahorro total se contabiliza al sumar el ahorro que se obtiene de la operación anterior con la bonificación que percibe la empresa por el pago que se les realiza por la no emisión de CO₂, el valor del mismo asciende a 12 950 711,48 CUC, lo cual equivale a una suma total de 323 767 787 CUP.

En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran los gráficos que describen el comportamiento de los costos en que se hubiesen incurrido con la generación termoenergética para los distintos meses de los años que componen el período analizado. La irregularidad mostrada en los mismos se encuentra en correspondencia con los ascensos y descensos de la generación alcanzada en ellos.

En el año 2012, donde se alcanzaron las más altas cifras de energía entregada al SEN, los costos han sido mayores. De forma general, los costos se incrementan de un año a otro debido al aumento de la generación total en los años objeto de análisis, que comienzan en 2010 con un costo de 1 851 518,64 y terminan en el 2012 en 5 491 396,07, obteniéndose un aumento del costo en 3 639 877,43. En caso de que la energía registrada anualmente pudiera incrementarse hasta los máximos valores mensuales que se puedan generar se logra un incremento en el costo del combustible para generar la misma.

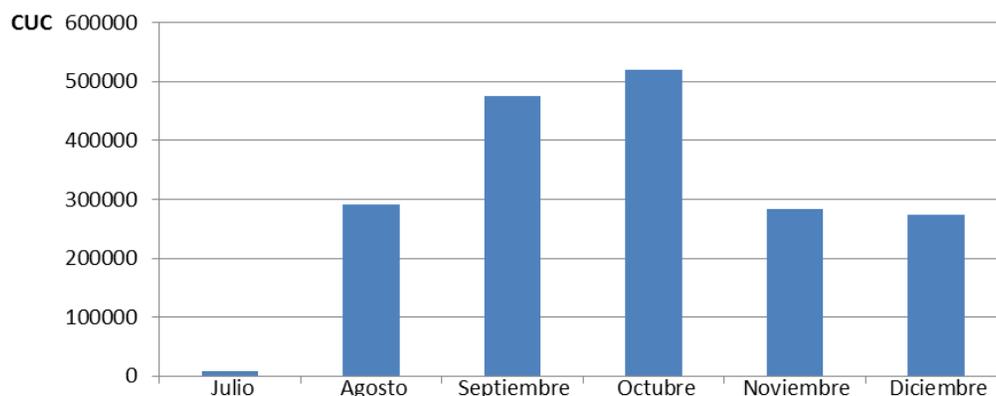


Figura 5. Costo de combustible del año 2010.

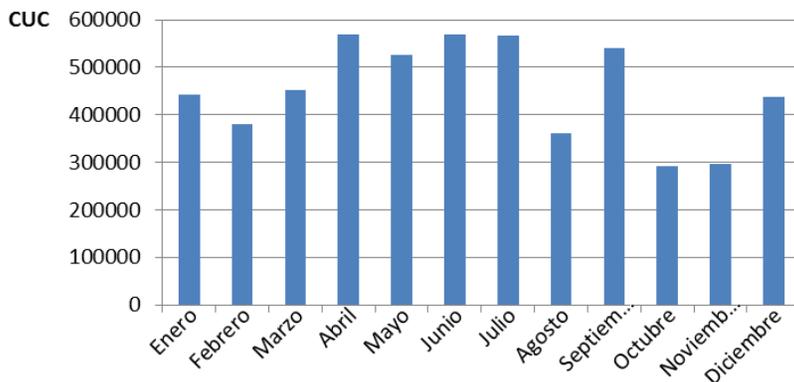


Figura 6. Costo de combustible del año 2011.

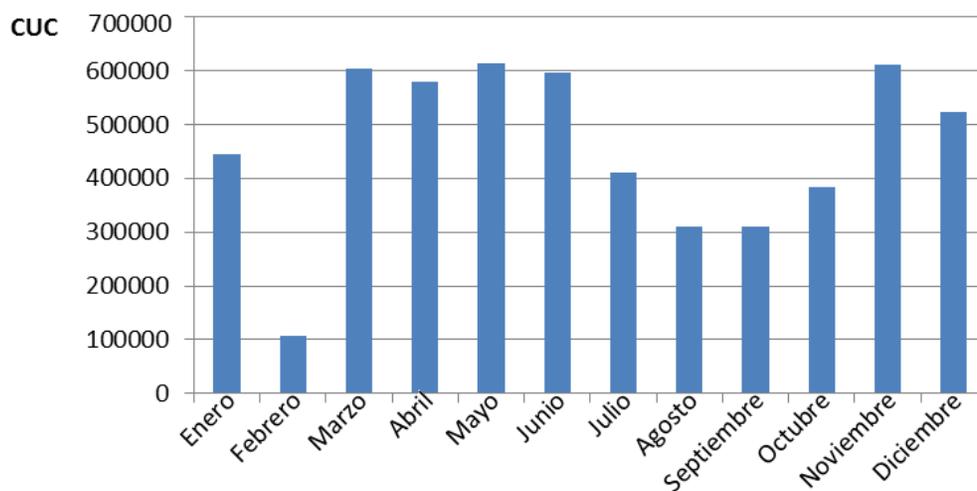


Figura 7. Costo de combustible del año 2012.

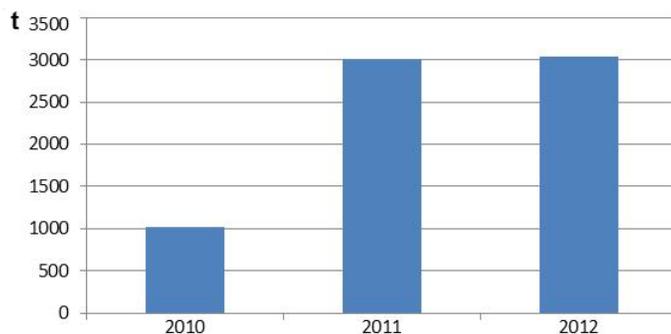


Figura 8. Combustible diesel ahorrado.

La Figura 8 muestra que el ahorro de diesel en los años 2011 y 2012 fue de 3 000 t en cada uno, siendo estas las mayores cantidades de combustible ahorrado para el período analizado.

Correspondencia entre generación y agua consumida

El agua consumida que se expresa a través del volumen (V) se calcula de la siguiente forma:

$$V = E \cdot 367 / H \cdot \eta \tag{6}$$

Donde:

E: Energía

H: Carga

η : Eficiencia del generador.

En las Figuras 9, 10, 11 y 12 se muestra el comportamiento del agua consumida, con respecto a la generación de la PCHE para los tres años de funcionamiento de la instalación.

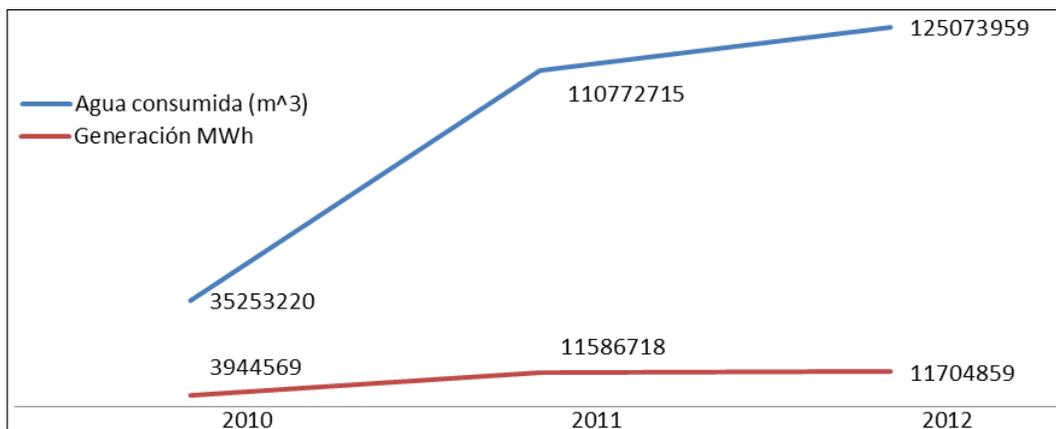


Figura 9. Correspondencia agua consumida-generación.

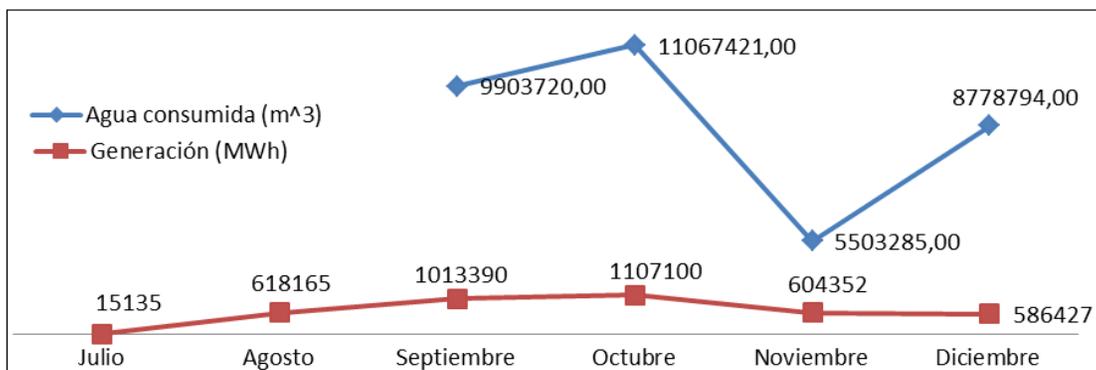


Figura 10. Correspondencia agua consumida-generación en el año 2010.

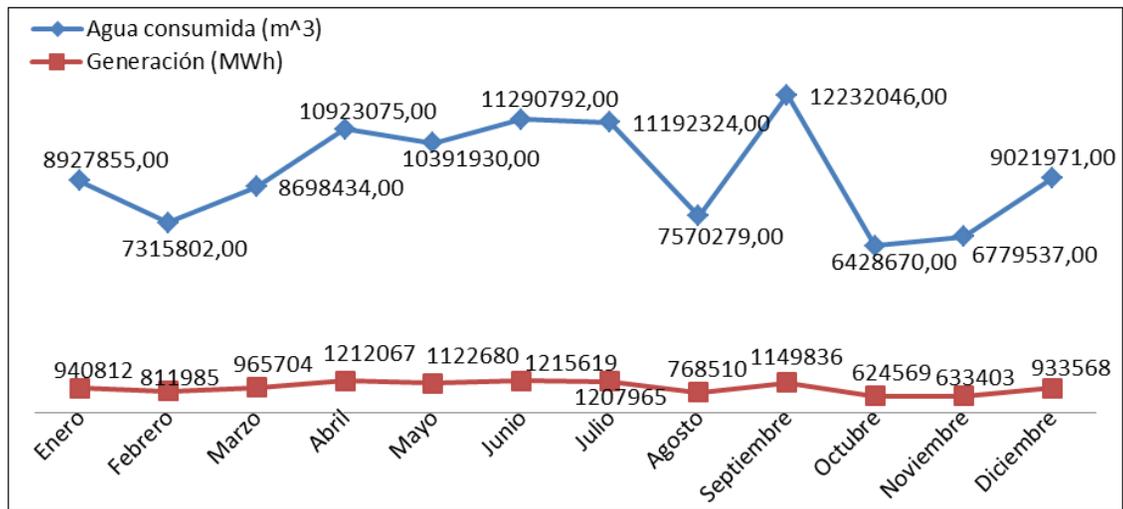


Figura 11. Correspondencia agua consumida-generación en el año 2011.

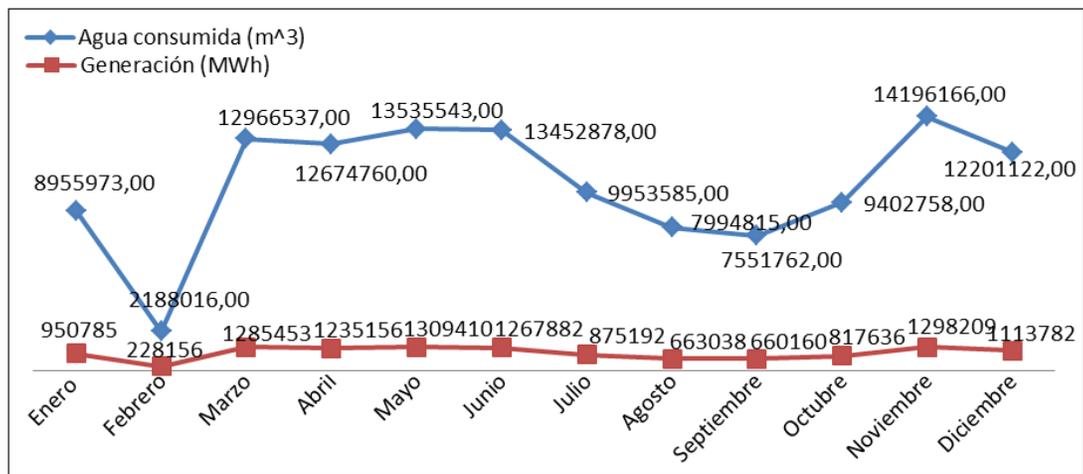


Figura 12. Correspondencia agua consumida-generación en el año 2012.

Para comprender el comportamiento del agua consumida, en función del total de generación en cada uno de los años, se debe primeramente analizar que luego que el nivel del agua de la presa desciende a valores menores que 44 m la carga de las turbinas disminuye y se necesita mayor cantidad de agua para generar los mismos 2 MW que en condiciones normales (con una altura de la presa entre 44 m y 57 m).

Durante los primeros dos meses del año 2010 no se dio entrega del agua consumida, por condiciones específicas de organización en los primeros meses de puesta en marcha.

Conclusiones

Los años con mayores ahorros por concepto de combustible son el 2011 y 2012, con 5 437 257,75 y 5 491 396,07 CUC, respectivamente.

La generación de la PCHE desde su puesta en marcha ha permitido ahorrar 7 081 t de diesel.

Se dejaron de emitir a la atmósfera 21 789 t de CO₂.

El impacto económico del período de generación es de 12 950 711,48 CUC

Del análisis del circuito 6 se concluye que la PCHE puede satisfacer la demanda promedio.

Con la generación de energía eléctrica por la PCHE se han ahorrado 7 081 t de diesel.

Se determinó que la PCHE ha permitido que se dejen de emitir 21 789 t de CO₂ a la atmósfera.

Con la puesta en marcha de la PCHE se han ahorrado 12 780 172,47 CUC, hasta diciembre de 2012.

Referencias bibliográficas

BOZA, J. & CABALLERO A. 2002: Las fuentes alternativas y la pequeña hidroenergía en Cuba. Un análisis económico. *Energética* 12(2): 44-49

FEDERICO, C. ET AL., 1995: Manual de mini y microcentrales hidroeléctricas: una guía para el desarrollo de proyectos. ITDG. Imp. 274 p. Perú.

UNIÓN NACIONAL ELÉCTRICA. 2007: Dirección de generación distribuida. Generación distribuida en Cuba julio 2007. Ppt. Julio.

SAN MIGUEL, D. 2011: Ventajas de la generación unificada diesel-hídrica en el sistema de distribución del municipio Moa. *Ciencia & Futuro* 1(3): 1-8. [en línea]. Consultado: 11 octubre 2012. Disponible en: http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/view/287/pdf.