

VALORACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL INCREMENTO DE LOS PARÁMETROS DEL VAPOR EN INGENIOS AZUCAREROS CUBANOS

TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT TO INCREASE THE STEAM PARAMETERS IN CUBAN SUGAR MILLS

Angel Rubio-González^{1}, Manuel Rubio Rodríguez¹ y Pablo Roque Díaz¹*

¹ Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA). Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 28, 2017; Revisado: Marzo 1º, 2018; Aceptado: Abril 9, 2018

RESUMEN

En el presente artículo, teniendo en cuenta la tendencia internacional al incremento de los parámetros del vapor (presión y temperatura) en las plantas energéticas de los ingenios azucareros, se realiza un estudio técnico económico, para el caso de Cuba, evaluando el paso a dos posibles valores superiores: 6,7 MPa y 520°C y 10 MPa y 540 °C. En el estudio se consideran dos figuras económicas, una la empresa inversionista y la otra el Estado cubano. El estudio permitió concluir que, para la empresa, en las condiciones de modelación utilizadas, no resulta atractivo el proyecto a los parámetros mayores por la disminución de las ganancias y de la rentabilidad, pero se valoran y demuestran las condiciones para lograr que sea atractivo. Para el Estado cubano el incremento de los parámetros del vapor, y consecuentemente la eficiencia y la entrega de energía, es siempre bueno, debido al menor costo de la generación eléctrica basada en bagazo y la reducción del precio pagado por ella.

Palabras clave: parámetros del vapor; industria azucarera; plantas energéticas.

ABSTRACT

Based on the international trend to increase steam parameters at cogeneration plants in sugar mills, this paper presents the results of a techno-economic assessment of rising steam parameters to 6,7 MPa/ 520 °C and 10 MPa/ 540 °C, at Cuban sugar mills.

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Angel Rubio, Email: arubio@uclv.edu.cu

The assessment analyzes the economic effect at the sugar company level and the country level. It results that under the initial modeling conditions there is not enough incentive for the sugar company to invest in rising parameters at cogeneration plants due to poor return indicators. Then the study looks for the initial investment parameters that would turn it attractive to the company. Rising steam parameters and consequently the efficiency and energy production is always good for the country due to the lower bagasse based power generation cost and price paid for it.

Key words: steam parameters; sugar mills; energy plants.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la eficiencia de los ciclos termodinámicos con la elevación de sus parámetros es un hecho conocido. Lo anterior se pone totalmente de manifiesto cuando en el ciclo termodinámico Rankine, utilizado tradicionalmente en la industria azucarera para la producción de potencia, se aumentan la presión y la temperatura del vapor que generan las calderas para su empleo en los turbogeneradores que producen la electricidad. Esto se traduce en un incremento de la cantidad de electricidad generada por unidad de masa de caña molida (kWh/tcaña) la que puede ser vendida acrecentando los ingresos económicos. Pero, la elevación de los parámetros implica un aumento de los costos inversionistas y esto obliga a un balance entre ganancias por eficiencia y costos por inversión. De hecho entonces, la elevación de los parámetros no es una decisión meramente técnica, sino una decisión técnica y económica.

En el año 2006 se publicó un estudio de varias decenas de procesos inversionistas, de varios países, encaminados a la conversión de ingenios azucareros en suministradores de electricidad (Rubio et al., 2006). En dicho estudio se mostró como la mayoría de los proyectos estudiados se ubicaban en el rango de los 6 MPa (60 bar) y algunos llegaban a los 8 MPa (80 bar); solo uno de los estudiados superaba los 10 MPa (100 bar). En el año 2014 ya existían, al menos, 25 ingenios operando a 10 MPa (100 bar) o más (Mitr Phol Group, 2012; Grupo de Expertos de AZCUBA, 2013; Rubio et al., 2014). Lo anterior demuestra que existe una tendencia a moverse hacia esa presión.

En países como EE.UU., China, Tailandia y Brasil, se observa que aumentaron las presiones escalonadamente (Rubio et al., 2014), pasando siempre por valores de entre 4-4,5 MPa (40-45 bar) y 6-8 MPa (60-80 bar), antes de ir al entorno de los 10-11 MPa (100-110 bar). Esto tiene su explicación en el hecho de que en la zona de vapor sobrecalentado, el incremento de la temperatura tiene una mayor influencia en la energía que contiene el vapor (entalpía) que el incremento de la presión. Lo anterior, sumado al hecho de que la selección de los aceros para la construcción de las calderas (en particular los domos y los sobrecalentadores) se realiza sobre todo en función de la temperatura y la presión (debido al límite de fluencia lenta o límite de *creep*), hace que cuando para sobrepasar una temperatura se tenga que pasar al empleo de un acero de más calidad (y por ende de mayor costo) resulte útil entonces elevar la temperatura hasta el máximo posible de ese nuevo acero. Esto produce saltos discretos (escalonados) en el uso de las temperaturas y de hecho en la presión. En estas valoraciones debe tenerse presente además que, cuando se aumenta la presión y se mantiene la temperatura constante, la humedad en las últimas etapas de las turbinas puede aumentar a valores

inadmisibles, lo que se resuelve incrementando también la temperatura o, a ciertos valores, recalentando el vapor.

La industria azucarera cubana tuvo como presión tope para la producción de vapor, durante muchos años, los 2,8 MPa (28 bar). Esto respondió a una política de pobre interés en incrementar la venta de electricidad a partir de la biomasa cañera, por tener asegurado el suministro de combustible fósil para las termoeléctricas desde el campo socialista. Esta política estuvo vigente hasta inicios de la década de 1990 cuando desapareció el campo socialista, y después resultó muy difícil la transformación por las dificultades económicas que imperaron en el país. Este estancamiento de la presión limitó el incremento de la eficiencia termodinámica en los ingenios azucareros cubanos. En el año 2014, el gobierno cubano aprobó una nueva ley para la inversión extranjera (Ley No 118, 2014) la que ha motivado la promoción de una cartera de proyectos inversionistas (Cartera de oportunidades, 2015). En total se ofertaron 19 ingenios azucareros para inversiones en el campo energético, con vistas a convertirlos en importantes productores de electricidad para el sistema eléctrico nacional (SEN). Estos ingenios han comenzado a ser identificados con el nombre de bioeléctricas en el argot del sector. En el 2016, el grupo empresarial AZCUBA incrementó los ingenios seleccionados para conversión en bioeléctricas hasta un total de 25 (Hernández y Rubio, 2016). Lo anterior ha impulsado el inicio de estudios pre-inversionistas, a nivel de proyectos de oportunidad y factibilidad, para cada una de las 25 bioeléctricas, y lógicamente el incremento de los parámetros del vapor resulta un elemento clave en estos proyectos.

Teniendo en cuenta la experiencia internacional en el incremento de las presiones antes descrita y el hecho de que se trata de una decisión de carácter técnico y económico, con valoraciones de posibilidades de financiamiento extranjero y de suministros mediante importaciones (por no disponerse de las necesarias producciones nacionales principalmente de calderas y turbogeneradores), se ha realizado este estudio en el que se consideraron dos alternativas de incremento. Una primera, pasar a 6,7 MPa (67 bar) y 520 °C, salto moderado, y una segunda, pasar a 10 MPa (100 bar) y 540 °C, salto alto. Por todo lo anterior, el presente trabajo se propone como objetivo determinar para dos figuras económicas -una la empresa inversionista y la otra el Estado cubano- la mejor de las dos alternativas de incremento de parámetros del vapor definidas en el párrafo anterior, en un ingenio azucarero cubano, para el aumento de la generación de electricidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para dar cumplimiento al objetivo, el método empleado consistió en el análisis comparativo de dos alternativas inversionistas, una a 6,7 MPa (67 bar) y 520 °C, y otra a 10 MPa (100 bar) y 540 °C, mediante la evaluación del valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el plazo de recuperación de la inversión (PRI), obtenidos de la modelación del flujo de caja descontado para una empresa inversionista, así como las ganancias del Estado cubano mediante los impuestos y el costo evitado por reducción de combustible importado, para ambos proyectos. Esto implicó la determinación de las variables a considerar y la definición de un conjunto de datos de partida para el estudio. A continuación se explican las decisiones adoptadas.

El estudio se realizó para un ingenio azucarero con un esquema energético clásico, basado en: generación de vapor en calderas operadas con bagazo y residuos agrícolas cañeros (incorporados al bagazo), empleo de todo el vapor para generar electricidad en turbogeneradores, total electrificación de los sistemas de accionamiento (motores) y uso de vapor de escape (y/o extracciones) en el proceso de producción de azúcar. La valoración de este esquema típico de cogeneración de la industria azucarera permitió identificar como fundamentales para este estudio las variables siguientes:

Variables técnicas: capacidad de molienda del central azucarero (t/día de caña molida), tipo de caldera y horno, tipo de turbina o turbinas, disponibilidad de bagazo para operación fuera de zafra (t/zafra) disponibilidad o no de combustible adicional (t/zafra) consumo de vapor en el proceso de producción del azúcar (kgvapor /tcaña) e insumo propio de electricidad (kWh/tcaña).

Variables económicas: costo inversionista unitario (USD/kWe instalado), precio de venta de la electricidad (USD/kWh), tasa de descuento (%), impuestos (%), sistema de depreciación, costos fijos de operación y mantenimiento (% de la inversión) y costos variables de operación y mantenimiento (USD/kWh producido).

El sistema eléctrico nacional (SEN) cubano, en cuanto a productores, está integrado por suministradores de varias empresas estatales. En cuanto a la comercialización (compra a productores y venta de la electricidad) esta se realiza únicamente por la Unión Eléctrica (UNE) empresa estatal que representa los intereses del Estado cubano.

Partiendo de las características generales previstas en la Ley de la inversión extranjera, que permite diferentes modalidades de inversión (empresa mixta, contrato de asociación económica y empresa de capital totalmente extranjero) y de las consideraciones anteriormente explicadas del SEN, el estudio se efectuó considerando dos figuras económicas: empresa inversionista (dispone de las ganancias luego de impuestos) y el Estado cubano que gana por dos vías, con los impuestos a la empresa, y representado por la UNE, con el costo evitado, que es la diferencia entre el precio al que se paga el kWh a la empresa y lo que le cuesta producirlo a la UNE.

A continuación se presentan los datos de partida utilizados en el presente estudio. Estos datos fueron colegiados con el Grupo Nacional de Expertos de AZCUBA (Grupo de Expertos de AZCUBA, 2013). AZCUBA es la Organización Superior de Dirección Empresarial (consorcio de empresas) que agrupa a todas las empresas azucareras estatales cubanas, a las que se subordinan los ingenios azucareros. Este Grupo de Expertos está asesorando el proceso inversionista de las bioeléctricas y conoce y valora todas las ofertas que está recibiendo el país. De hecho, el Grupo de Expertos decidió también los dos saltos de presión objeto de estudio.

2.1. Datos y definiciones de la instalación energética.

Potencia para 6,7 MPa 40 MW y acumulación de bagazo para quemar fuera de zafra 30 %. Al pasar de 6,7 a 10 MPa se mantuvo constante el porcentaje de bagazo acumulado, esto provoca un aumento de la potencia a instalar, y el correspondiente aumento del costo inversionista fue tenido en cuenta. Para las turbinas de condensación se asumió una eficiencia isentrópica de 84 % y para las de contrapresión a 6,7 y 10 MPa se asumieron 78 y 80 % respectivamente.

2.2. Datos de la electricidad.

Precio de la electricidad, durante y después de amortización 0,15 USD/kWh y costo de la producción de electricidad en la UNE 0,17 USD/kWh. El precio de la electricidad se asumió en base a una reducción del 12 % del costo actual de producción, tomado de la proyección para el año 2030 hecha por la UNE (UNE, 2015).

2.3. Datos para la evaluación económica.

Costo inversionista unitario a 6,7 MPa 2 200 USD/kWe, costo inversionista unitario a 10 MPa 2 440 USD/kWe (resultado de 20 % de incremento del costo total inversionista, lo que implica un aumento del costo inversionista unitario de 11 %), tasa de descuento 10 %, impuestos, durante y después de amortización 35 %, período de evaluación del proyecto 20 años y depreciación lineal a 20 años sin valor residual. En la Tabla 1 se encuentran los restantes datos utilizados.

Tabla 1. Datos complementarios

Dato	Unidad	Alternativas	
		6,7 MPa 520 °C	10 MPa 540 °C
Días de zafra	días	150	150
Caña molida	t/h	315	315
Índice de producción de bagazo	tbagazo/tcaña	0,347	0,347
Índice de acumulación de bagazo	t bagazo acumulado/ t bagazo disponible	0,3	0,3
Eficiencia de la caldera	%	88	88
Calor específico de combustión del bagazo	MJ/kg	8,18	8,18
Índice de consumo de vapor en el proceso	kgvapor/tcaña	300	300
Índice de consumo de electricidad en zafra	MWh/tcaña	0,03	0,03
Índice de costo fijo de operación y mantenimiento	% de la inversión	2	2
Índice de costo variable de operación y mantenimiento	USD/kWh	0,02	0,02

Es imprescindible aclarar que el estudio de los aspectos financieros y de mercado no se abordaron por resultar solo valorables en casos concretos de estudios de factibilidad, y adicionalmente, en la situación de Cuba, altamente dependientes de los acuerdos con un potencial inversionista o financista extranjero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estudio comparativo de las alternativas a 6,7 y 10 MPa.

Aplicando el método de flujo de caja descontado y utilizando los datos expuestos anteriormente, se obtuvieron los resultados para la empresa y el Estado que pueden verse en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis comparativo al pasar de 6,7 a 10 MPa

Resultados	6,7 MPa 520 °C	10 MPa 540 °C	Diferencia en %
Empresa			
VAN (Millones de USD)	47,6	42,2	-11,3 %
TIR (%)	18	16	-11,1 %

PRI (años)	8,1	9,5	17,3 %
Estado cubano			
Impuestos (Millones de USD)	55,7	58,1	4,3 %
Costo evitado (Millones de USD)	32,7	35,3	8 %
Ganancia total (Millones de USD)	88,4	93,4	5,7 %

Un análisis de la Tabla 2 permite observar que para la empresa, al pasar de 6,7 a 10 MPa, el VAN se reduce en 11,3 % y la rentabilidad promedio expresada en la TIR se reduce también de 18 a 16 %. El período de recuperación de la inversión se alarga hasta casi los 10 años; sin embargo, para el Estado aumenta en 8 % el ahorro por concepto de costo evitado en la energía producida para la red, y considerando los impuestos el beneficio total asciende un 5,7 %. De lo anterior se deduce que, para las condiciones de modelación, a una empresa no le es atractivo el proyecto de mayores parámetros por la disminución de las ganancias (VAN) y de la rentabilidad (TIR), pero al Estado sí le resulta beneficioso por el incremento de sus ganancias, aunque es justo reconocer que en magnitud porcentual no es muy atractivo dicho incremento. Con el objetivo de ampliar este análisis se decidió hacer un estudio de sensibilidad, para el que se seleccionó como variable clave el costo inversionista unitario. Existen otras variables de interés, pero esta es la más interesante por decidir en alta medida la rentabilidad del capital, así como la magnitud total de la inversión.

3.2. Estudios de sensibilidad.

a) Influencia del incremento del costo unitario inversionista cuando se aumenta la presión, manteniendo el costo de 2 200 USD/kWe a 6,7 MPa. El incremento se valoró entre un 5 y un 14 % pues el estudio anterior lo evaluó a 20 %.

Esta alternativa se modela fundamentada en la posibilidad de que en negociaciones con un inversionista se logren ofertas que cumplan con estas nuevas condiciones de partida. Al igual que en el análisis anterior se modeló para la empresa y el Estado. Para facilitar la comparación los resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 1.

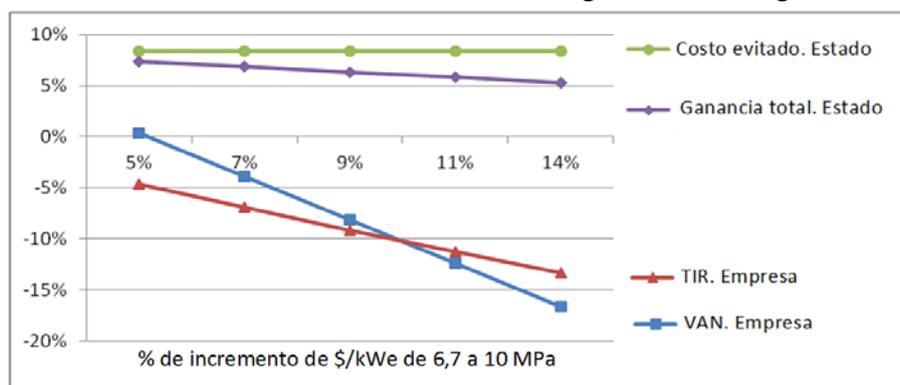


Figura 1. Influencia del incremento del costo inversionista unitario manteniendo el costo de 2 200 USD/kWe a 6,7 MPa

De la figura se puede deducir que, para la empresa, la alternativa a 10 MPa iguala en VAN a la de 6,7 MPa si el aumento de costo unitario alcanzara solo un 5 %. Cuando el aumento es de un 14 % el VAN a 10 MPa se reduce en un 17 %. Las TIR siempre se mantienen por debajo de la alternativa a 6,7 MPa reduciéndose la diferencia a un -5 % en el caso de un incremento de costo unitario de solo un 5 %. Aunque no se graficaron,

los plazos de recuperación a 10 MPa se mantuvieron siempre por encima de los de la alternativa a 6,7 MPa. Para la empresa, solo si se tomará como elemento clave de decisión el VAN y se lograran incrementos inferiores al 5 % del costo inversionista unitario, resultaría atractivo el paso a 10 MPa.

Para el Estado el costo evitado se mantiene constante, mientras que la ganancia total se incrementa a valores cercanos al 7 %. Esto fundamenta desde los intereses del Estado el paso a los 10 MPa.

b) Disminución del costo unitario inversionista a 6,7 MPa, manteniendo la relación de incremento de la inversión total a 10 MPa igual a 20 %.

Con la finalidad de profundizar en la perspectiva de la empresa, se realizó un estudio de sensibilidad considerando una posible disminución del costo unitario inversionista a 6,7 MPa, manteniendo el incremento del costo inversionista total a 10 MPa en 20 %. Esta disminución que se modela, se fundamenta en la posibilidad de bajar costos a partir del incremento del valor agregado en Cuba y el lógico descenso de los costos a partir del fenómeno de aprendizaje tecnológico. Ver Figura 2.

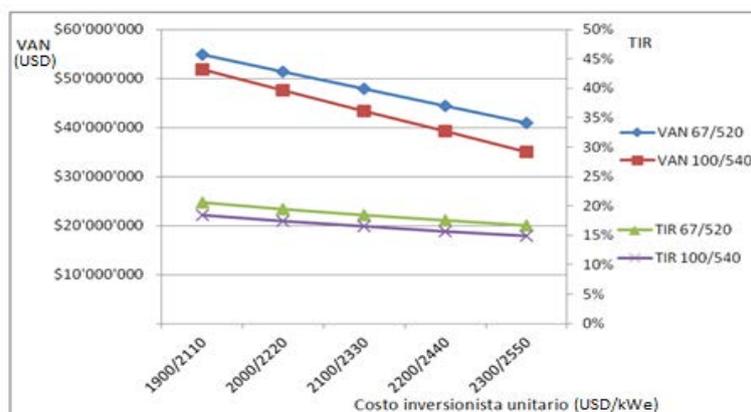


Figura 2. Influencia del incremento del costo inversionista unitario al disminuir el costo a 6,7 MPa, manteniendo el incremento de la inversión total a 10 MPa igual a 20 %

De la figura se deduce que, para la empresa, a pesar de la diferencia de pendiente de los VAN a 6,7 y 10 MPa, el punto de cruce se encuentra muy por debajo de los 1900 y 2110 USD/kWe (a 6,7 y 10 MPa respectivamente) por lo que en el rango de costos modelado, a la empresa nunca le resulta atractivo el paso a 10 MPa. Las TIR mantienen siempre una diferencia igual en todos el rango de variación, aunque lo hacen entre un 20 y un 15 %, valores satisfactorios todos. Aunque no se graficaron, los plazos de recuperación a 10 MPa se mantienen siempre por encima de los de la alternativa a 6,7 MPa. Las significativas pendientes logradas en el comportamiento del aumento del VAN con la reducción de los costos unitarios, para uno y otro caso de estudio, demuestran, como era lógico esperar, que la reducción de costos resulta una acción imprescindible en cualquier caso para el logro de un buen resultado en los indicadores económicos.

Los dos estudios de sensibilidad efectuados han demostrado que existen puntos de inflexión a partir de los cuales la opción a 10 MPa se hace preferible económicamente. Los autores consideran que muy probablemente en los países que están pasando a 10 MPa, la relación de costos de inversión unitarios de las alternativas a 6,7 y a 10 MPa sobrepasan los puntos de inflexión a partir de los cuales resulta favorecida la segunda.

4. CONCLUSIONES

1. Se determinó para dos figuras económicas -una la empresa inversionista y la otra el Estado cubano- la mejor de dos alternativas de incremento de parámetros del vapor (6,7 MPa y 520 °C y 10 MPa y 540 °C) en un ingenio azucarero cubano, para el aumento de la generación de electricidad, resultando la rentabilidad del capital superior para la alternativa a 6,7 MPa y 520 °C.
2. Para la empresa el paso a una presión de 10 MPa se justificaría desde el punto de vista del VAN solo si se lograra que el incremento del costo inversionista unitario, al pasar de 6,7 a 10 MPa, fuese inferior a un 5 %.
3. Para el Estado hay siempre beneficios en ambas alternativas con un precio de 0,15 USD/kWh, por ser un precio inferior al costo en que actualmente se incurre en la producción de electricidad por el SEN.

REFERENCIAS

- Cartera de oportunidades, 2015., Disponible URL en: http://www.granma.cu/file/sp/cartera-de-inversion-14/datos/documentos/Cuba_cartera-de-oportunidades_2014_ESP.pdf, pp. 31, Consultado: Mayo 24, 2017.
- Grupo de Expertos de AZCUBA, Resumen de análisis sobre niveles de temperatura y presión., Documento interno de AZCUBA, La Habana, 21 de junio de 2013, pp. 1-9.
- Hernández, B y Rubio, A., Eficiencia energética y energías renovables en la industria azucarera cubana, Encuentro Internacional en la Cámara de Industria y Comercio de Alemania sobre oportunidades de inversión en energía renovable en Cuba. Frankfurt del Main. Junio 2016.
- Ley No 118, Ley de la inversión extranjera No118 de 2014, Disponible URL en: http://www.granma.cu/file/pdf/2014/04/16/G_2014041609.pdf, Consultado: Mayo 24, 2017.
- Mitr Phol Group, Biomass power: High Efficiency Boiler Technology for Sugar Industry., Seminar on Renewable Energy Technology Implementation. Thailand. October 2012. Disponible URL en: http://eeas.europa.eu/delegations/thailand/documents/thailande_eu_coop/energy_efficiency/renewable_energy_technology_implementation_in_thailand/final_presentations_4oct/6_high_efficiency_boiler_technology_sugar_industry_suwat_en.pdf Consultado: Mayo 24, 2017.
- Purchase, B.S., Challenges and potential solutions for storage of large quantities of bagasse for power generation, International Sugar Journal. No 8, 2014 pp. 495-513.
- Rubio, A., Roque, P. y Pérez, F., Estado del arte en la cogeneración de electricidad en la industria de la caña de azúcar. Primeros pasos hacia una industria sucroenergética., Centro Azúcar, Vol. 33, No. 2, 2006, pp. 42-51.
- Rubio, A., Rubio, M. y Roque, P., Estudio económico y consideraciones técnicas sobre la conveniencia del empleo de presión de vapor de 67 o 100 bar para la construcción de bioeléctricas en Cuba., Documento interno del Grupo de Expertos AZCUBA. 2014, pp. 1-11.
- UNE, Unión Eléctrica, actualidad y perspectivas., Presentación pública en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 21 de noviembre 2015.