

Valoración de la capacidad de cogeneración de una planta eléctrica diésel de 10 kVA

Assessment of the cogeneration potential of a 10 kVA diesel electric generator set

Carlos Romero-Piedrahita¹, Yamid Carranza², Edinson Henao³

¹Escuela de Tecnología Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: cromero@utp.edu.co

²Escuela de Tecnología Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: yamidc@utp.edu.co

³Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: edisonhenao@utp.edu.co

RECIBIDO: Noviembre 15, 2016. ACEPTADO: Marzo 1, 2017. VERSIÓN FINAL: Mayo 15, 2017.

RESUMEN

Dado que la capacidad instalada de las plantas de energía eléctrica representa un porcentaje importante de la capacidad total de energía eléctrica en el país, la valoración de oportunidades de autogeneración es una estrategia necesaria para reducir los consumos energéticos globales y el impacto ambiental generado por la obtención de energía eléctrica a partir de los motores térmicos. El tema de la distribución de la energía en los motores de combustión se expone en el presente trabajo y se comentan algunos elementos normativos y parámetros básicos para estimar la conveniencia de la cogeneración y autogeneración. El trabajo es ilustrativo y se ejemplariza con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en una planta eléctrica de 10 kVA dotada de un motor Diesel bicilíndrico. Con ayuda de un sistema de carga formado por tres resistencias eléctricas refrigeradas se miden los consumos de combustible, la potencia eléctrica consumida, y se calculan los calores disipados al refrigerante y evacuados con los gases de escape y, con esto, se pasa a realizar la evaluación energética de la planta de generación de electricidad y a comprobar el potencial energético para cogeneración de su motor térmico Diesel.

PALABRAS CLAVE: Balance energético, Motor de combustión, Planta eléctrica.

ABSTRACT

Since the combustion engine based electrical generation has an important share in the total electrical energy produced by the country, the assessment of opportunities of autogeneration is seen as a needed strategy in the seek of reduction of energy consumption and the mitigation of environmental impact derived from the use of internal combustion engines. It is the purpose of the present work to disclose the engine energy balance composition and to depict some basic parameters for the cogeneration assessment of combustion engine based generator sets. The concepts presented in the paper are illustrated with the experimental measurements taken in a 10 kVA two cylinder Diesel engine based generator, tested under three load conditions given by a corresponding number of cooled electrical resistances. Measurements of fuel consumption, consumed electrical power, and heat evacuated with exhaust gases and coolant are used to calculate the thermal energy balance of the Diesel engine as well as the cogeneration potential of the generator set.

KEYWORDS: Energy balance, Combustion engine, Generator group.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de responder de forma segura, eficiente y ambientalmente sostenible a las necesidades crecientes de energía en los diferentes sectores de la economía nacional, demandan la racionalización, mejora técnica y ampliación de las fuentes de suministro de energía eléctrica. Aún en nuestro país, el consumo de combustibles fósiles es fundamental para la generación de bienes y servicios, por lo que a través de diferentes instancias y mediante diferentes mecanismos regulatorios, como el Ministerio de Minas y Energías de Colombia, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) lideran una política integral que promueve, genera y estimula programas y proyectos de generación, ahorro y uso eficiente de energía y particularmente de autogeneración [1][2][4-9].

A la luz de las necesidades de análisis y reglamentación de lo establecido en la Ley 1715 de 2014 [5], en un informe presentado a la UPME por el consorcio HARTRE [3], se reportan conclusiones que sirven para justificar la promoción de campañas de capacitación y recomendación calificada de tecnologías para el aprovechamiento de las energías de desecho (energía disponible en los gases de escape y en el refrigerante) en establecimientos comerciales, entidades públicas, hoteles y hospitales, donde las capacidades instaladas en cogeneración y autogeneración (mayormente equipadas con motores de combustión interna) son actualmente prácticamente nulas [3]. En el mismo informe se reporta la capacidad de autogeneración instalada de 234 MW, del sector industrial a diciembre de 2014, con una participación mayoritaria de los motores de combustión interna del 49% sobre otras tecnologías (pequeñas centrales hidroeléctricas, turbinas de vapor y turbinas de gas), con lo que se ve la relevancia de cuantificar las oportunidades de ahorros energéticos primarios donde quiera que se disponga de plantas de eléctricas basadas en motores de combustión interna

Parte de la energía suministrada a las máquinas de combustión interna se gasta en la producción de trabajo útil y el restante se pierde tradicionalmente en el calentamiento del refrigerante y la energía evacuada con los gases de escape. Es apenas lógico querer recuperar las dos últimas partes y es esto lo que se busca con los sistemas de autogeneración, cogeneración, trigeneración y poligeneración, para maximizar el aprovechamiento de la energía consumida, reducir los costos de los productos manufacturados y disminuir el impacto ambiental. La energía térmica puede recuperarse de los gases de escape del motor, el agua de refrigeración, el aceite de lubricación y emplearse para producir agua caliente, vapor de baja presión o agua fría (en un chiller de absorción) [10].

Algunos gobiernos tienen programas que incentivan la cogeneración con lo que, además de obtener beneficios directos por ahorros energéticos, se reducen los efectos directos sobre el medio ambiente, un problema bien sentido actualmente [11-12]. Tres parámetros utilizados en la valoración de estrategias de cogeneración son la relación calor/electricidad, el rendimiento eléctrico equivalente, y el rendimiento global de la instalación de cogeneración, y esos parámetros dependen de la energía que siendo evacuada por el motor puede recuperarse y transformarse en energía útil.

La finalidad del presente trabajo consiste en aportar los elementos conceptuales relacionados con el balance energético de los motores de combustión interna en general y los parámetros generales básicos que pueden usarse para decidir si un motor dado de un grupo electrógeno puede recomendarse para adecuarse (repotenciarse) para recuperación de energía. Tras presentar los elementos conceptuales básicos, se realizan los cálculos experimentales en un grupo electrógeno de laboratorio compuesto por un motor Diesel bicilíndrico y un generador eléctrico, cargado con un conjunto de resistencias e instrumentado para adquirir la información requerida para valorar el balance energético del motor de combustión y valorar las posibilidades de cogeneración.

2. CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS DEL BALANCE ENERGÉTICO Y LA VALORACIÓN DE LA CAPACIDAD DE COGENERACIÓN

En general, la energía consumida en los motores alternativos se descompone casi por partes iguales entre el trabajo útil, el calor evacuado con el refrigerante, y el calor fugado con los gases de escape, con proporciones mayores de pérdidas a bajas cargas y tendencia a la reducción de las mismas a medida que la carga aumenta. Las proporciones varían mucho en función de la destinación del motor, de su tecnología y también de la potencia del mismo. A mayores potencias se suele tener menos pérdidas relativas de calor disipado al refrigerante. Adicionalmente, los generadores eléctricos tienen mayor o menor rendimiento dependiendo de la relación entre la carga eléctrica activa y la reactiva.

2.1 Aproximaciones generales al balance térmico de los motores

Observando las tendencias de control de la combustión y de la renovación de la carga del motor Diesel, y la gestión térmica en general del motor, la descomposición porcentual de la energía suministrada con el combustible en condiciones nominales de operación para el nivel de perfeccionamiento actual de los motores Diesel, se acerca a la descrita en la Figura 1. La figura incorpora las

disipaciones de calor al refrigerante en los enfriadores de los gases de escape recirculados al cilindro y en el enfriador del aire (mezcla de gases) de admisión. El calor disipado a través de las paredes externas del motor no es fácil de evaluar. Procesando información provista en catálogos comerciales de grupos electrógenos, se han obtenido las gráficas mostradas en las Figuras 2 y 3, en las que se relaciona el calor disipado al refrigerante de algunos motores comerciales, discriminando los calores disipados directamente al sistema de refrigeración del motor y al posefriador del aire de admisión.

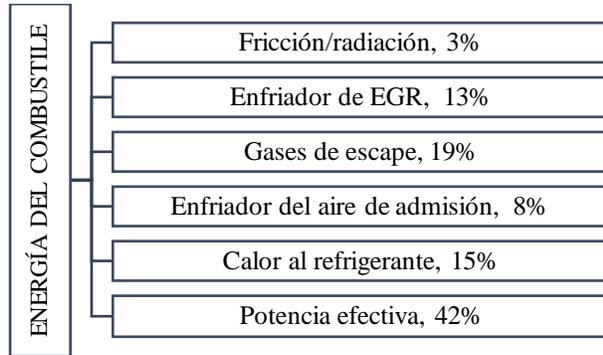


Figura 1. Aproximación al balance térmico de un motor Diesel moderno. **Fuente.** Elaboración propia.

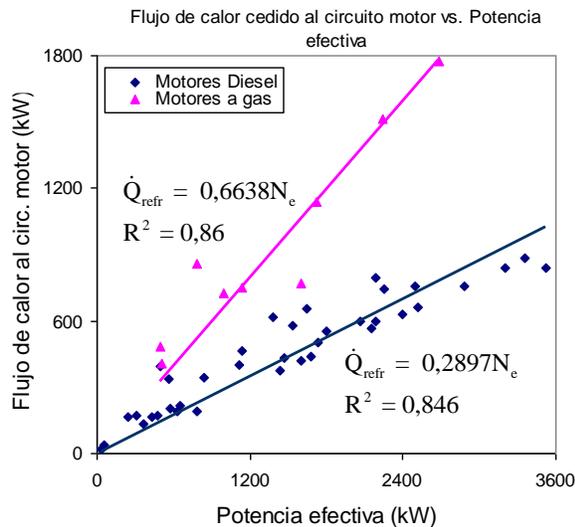


Figura 2. Calor disipado al refrigerante que pasa por el motor. Los motores analizados incluyen por igual motores con enfriador de aire y sin él. **Fuente.** Elaboración propia.

La aplicación de enfriamiento de la carga fresca ha sido, por razones de costo, más empleada en los motores de potencias mayores, pero gradualmente se empieza a aplicar también en los motores pequeños. La energía perdida con los gases de escape constituye aproximadamente la diferencia entre la energía equivalente aportada por el combustible y la suma de la

potencia efectiva y la energía transferida y disponible en el refrigerante.

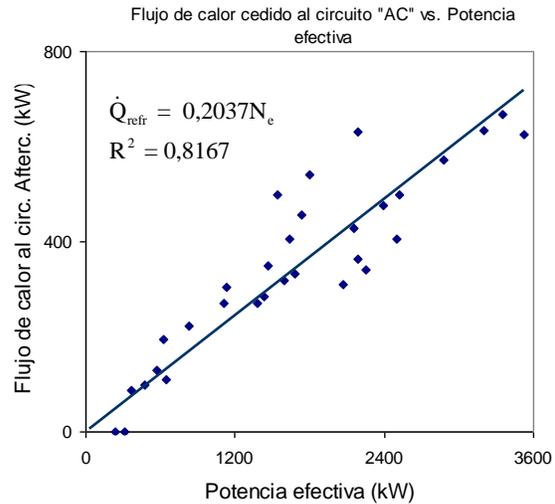


Figura 3. Calor disipado al refrigerante que pasa por el posefriador del aire de admisión. **Fuente.** Elaboración propia.

A medida que crece la potencia nominal de los motores, la disipación específica de calor también se reduce. Las gráficas se han obtenido para motores de rangos de potencias desde los más pequeños en grupos electrógenos comerciales, hasta los más grandes utilizados en electrogeneración en zonas no interconectadas. Se ha utilizado información de motores Perkins, Volvo, Caterpillar, Cummins, General Motors, John Deere y Detroit Diesel.

Ha existido la idea de que si las superficies internas de la cámara de combustión se mantienen a mayor temperatura, las pérdidas de calor pueden ser menores (Morel [13],[14]), lo que ha dado lugar a la experimentación con aislamientos de las superficies empleando materiales cerámicos (Taymaz [15] realizó una revisión bastante extensa de los trabajos más relevantes realizados en este tema). En las gráficas de la Figura 4 se ilustran los balances energéticos de un motor con aislamiento y sin aislamiento, reproducidas del trabajo de Descombes [16], quien presentó los resultados de un estudio experimental de un motor Diesel sobrealimentado. Este motor tenía un aislamiento en la precámara de combustión y un recubrimiento cerámico en la cara superior del pistón. Los resultados de las pruebas mostraron que la eficiencia energética del motor permanece casi constante y que la reducción de las pérdidas de calor a las paredes redundaba en un incremento simultáneo de la energía contenida en los gases de escape. La fracción acumulada de los flujos de calor hacia el refrigerante, de un lado, y hacia el escape, por otro lado, permanece casi constante cuando el motor opera bajo carga. Una análisis bastante fundamental de

las implicaciones termodinámicas del empleo de aislamientos y los posibles alcances, a partir de la Segunda Ley de la Termodinámica, fue realizado por Caton [17], quien entre otras conclusiones afirma que, promoviendo que los procesos de combustión se realicen a mayores temperaturas (como resultado, por ejemplo, de la utilización de aislamientos cerámicos en la cámara de combustión), se minimiza la destrucción de la disponibilidad de la energía del combustible resultado de los procesos de combustión, aumentándose las temperaturas de los gases de escape, e incrementándose los niveles de disponibilidad en ellos.

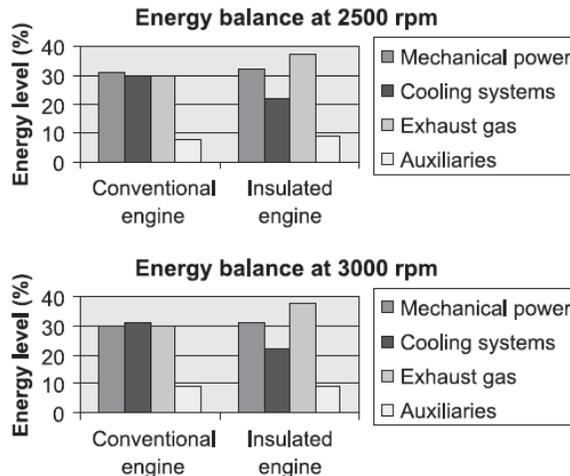


Figura 4. Comparación entre los balances energéticos de un motor con aislamiento y sin aislamiento [16]. Fuente. [16].

2.2 El motor entendido como máquina termodinámica de trabajo

Al analizar la termodinámica de la combustión en un motor alternativo, se entiende que el sistema está comprendido por el gas atrapado en la cámara de combustión durante la compresión, la combustión y la expansión, como se ilustra en la figura 4. Este gas es una mezcla de combustible, aire, gases residuales y EGR (exhaust gas recirculation). Durante la combustión los reactantes se convertirán en productos de combustión (CO_2 , H_2O , CO , etc.) y la energía química se convertirá en energía térmica.

Esquematisando la cámara de combustión como se hace en la Figura 5, puede decirse que ésta es el volumen encerrado por las paredes del cilindro, la superficie interna de la culata, la superficie superior del pistón y las válvulas. Las paredes de la cámara de combustión constituyen las fronteras del sistema. Todo el espacio de combustión puede verse como un volumen lleno por una masa de aire fresco, gases quemados, gases soplados desde el cárter del motor y combustible inyectado.

Aplicando la Primera Ley de la Termodinámica [17][18], se obtiene la descomposición de la energía del sistema, como se plantea en la ecuación (1).

$$\frac{dE_{sis}}{dt} = \frac{dU}{dt} = \frac{dQ_{comb}}{dt} + \frac{dQ_p}{dt} + \frac{dW}{dt} + \frac{dm_{adm}}{dt}h_{adm} + \frac{dm_{esc}}{dt}h_{esc} + \frac{dm_{fug}}{dt}h_{fug} \quad (1)$$

La ecuación (1) y literalmente equivale a decir que la variación de la energía del sistema (E_{sis}), asumiendo que no hay pérdidas de energía en deformaciones del volumen de control, se reduce a la variación de la energía interna del sistema (U).

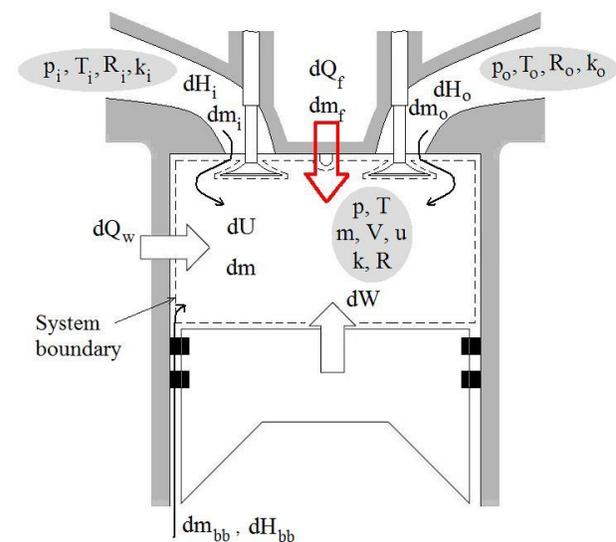


Figura 5. Modelo termodinámico del motor. Fuente. Elaboración propia.

La variación de la energía interna del sistema en el motor de combustión interna es la resultante de la variación por unidad de tiempo del calor suministrado al sistema con el combustible (Q_{comb}) y la energía correspondiente a la carga de admisión ($m_{adm}h_{adm}$), la energía convertida en forma de trabajo mecánico incluyendo las pérdidas mecánicas (W), el calor disipado a través de las paredes al refrigerante (Q_p), la energía equivalente de los gases de escape referidos a las condiciones de admisión ($m_{esc}h_{esc}$) y la energía equivalente de los gases de la cámara fugados a través de los intersticios en los anillos ($m_{fug}h_{fug}$).

Entendido el motor como máquina de realización de trabajo, la Figura 5 da una cabal representación del sistema para ser modelado desde el punto de vista termodinámico. No obstante, el motor no puede funcionar con su solo volumen de trabajo y debe interactuar con el medio externo para renovar la fuente de energía (inyección de combustible y admisión de aire

fresco), evacuar los productos de combustión, asegurar mediante un sistema adecuado (sistema de refrigeración) los límites de temperatura seguros para la operación de sus componentes, y garantizar el mínimo de pérdidas mecánicas y desgaste de los componentes (necesidad de un sistema de refrigeración). La integración de los subsistemas le da funcionalidad e integralidad al motor, pero también se corresponde con el esquema de repartición de las pérdidas del motor como máquina.

Físicamente, el motor se compone de la máquina propiamente hablando, fundamentada en el mecanismo manivela-deslizador para la realización del trabajo mecánico y el conjunto de subsistemas que posibilitan que este mecanismo pueda funcionar continuamente y que la combustión sea eficiente y ambientalmente amigable. Para esto, la estructura del motor debe complementarse con los subsistemas de lubricación, refrigeración, escape, admisión e inyección de combustible. Los subsistemas de refrigeración y escape pueden integrar funciones adicionales demandadas por las estrategias de renovación de la carga y combustión y demandas de sistemas externos al motor como sistemas de calentamiento de fluidos externos [19].

Introduciendo un término de pérdidas misceláneas que dan cuenta no sólo de las pérdidas por fugas de gases, sino también de otras pérdidas propias del motor real como las disipadas al ambiente a través de su superficie externa y la energía almacenada en la masa estructural del motor y en las masas de los fluidos, el balance energético de un motor puede realizarse, de manera práctica, midiendo los flujos másicos de aire y combustible, el refrigerante, los gases de escape y también midiendo las revoluciones y el momento torsor del motor, con los que se calcula la potencia efectiva [20].

Para efectos prácticos de cálculo del balance energético del motor, la ecuación (1) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} m_{comb}H_{i_comb}\eta_{comb} + m_{air}h_{air} = \\ \dot{Q}_{equiv} + m_{air}h_{air} = N_e + \dot{Q}_{refr} + \dot{Q}_{misc} + \dot{Q}_{esc} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde, m_{comb} y m_{air} corresponden a los flujos másicos de combustible y aire, respectivamente, h denota la entalpía, \dot{Q}_{equiv} es la energía desprendida por la combustión del combustible de poder calorífico H_{i_comb} , η representa el rendimiento de la combustión, N_e es la potencia media efectiva, \dot{Q}_{refr} es el calor disipado al refrigerante (calor transferido a través de las paredes de la cámara de combustión, más el calor proveniente del intercambio con el aceite del motor, los gases de

admisión y escape), \dot{Q}_{misc} es el término que cierra el balance e integra el calor evacuado al aceite refrigerante (en caso de que el aceite tenga refrigeración independiente del sistema de refrigeración del motor) más el calor disipado por convección y por radiación al ambiente que rodea el motor y también la energía almacenada en las masas del motor durante los procesos transitorios. Durante el calentamiento del motor parte (si no toda) de las pérdidas misceláneas se utilizan en el calentamiento de las partes estructurales y de la masa de los fluidos, mientras no se opera el termostato.

La potencia efectiva del motor se obtiene conociendo las revoluciones y el momento torsor del motor:

$$N_e = M_e \frac{\pi n}{30} \quad (3)$$

Siendo n y M_e las revoluciones y el momento torsor efectivo del motor, respectivamente.

La energía térmica disipada en el motor por convección al refrigerante puede calcularse por la expresión:

$$\dot{Q}_{refr} = \dot{m}_{refr} c_{p_refr} (T_{refr}^{sal} - T_{refr}^{ent}) \quad (4)$$

Siendo \dot{m}_{refr} y c_{p_refr} el flujo másico y el calor específico del refrigerante, T_{refr}^{ent} y T_{refr}^{sal} las temperaturas del refrigerante a la entrada y la salida del motor, respectivamente.

La energía que se evacúa con los gases de escape referenciada a la temperatura de admisión se determina midiendo los gastos másicos de combustible, \dot{m}_{comb} y de aire, \dot{m}_{air} y las temperaturas del aire de admisión, T_{adm} , del combustible, T_{comb} y de los gases de escape, T_{esc} , tras determinar las entalpías de la carga de trabajo, h_{adm} y de los gases de escape, h_{esc} , empleando la expresión:

$$\dot{Q}_{esc} = (\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{air}) [h_{esc}(T_{esc}) - h_{adm}(T_{adm})] \quad (5)$$

Durante el calentamiento del motor, desconsiderando la disipación de calor a través de las superficies externas del motor, parte de la energía suministrada con el combustible se almacena en forma de calor en las masas de la estructura, mientras que otra parte se transporta con los fluidos, refrigerante y aceite, progresivamente según la expresión:

$$\frac{dQ_{dis}}{dt} = m_{bl} c_{pbl} \frac{dT_{bl}}{dt} + \dot{m}_{refr} c_{p_refr} dT_{refr} + m_{ac} c_{p_ac} dT_{ac} \quad (6)$$

Donde Q_{dis} representa el calor total disipado por el motor a través de las paredes; T_{refr} y T_{ac} son las temperaturas del refrigerante y del aceite, m_{bl} y c_{pbl} representan la masa térmicamente sensible del bloque y el calor específico del material, m_{refr} y m_{ac} son los flujos máscicos de refrigerante y aceite a través de la camisa de refrigeración y las galerías de lubricación, respectivamente (el flujo del aceite es más complejo y la inclusión del término en la expresión es una aproximación grosera que no contempla el volumen de aceite en el cárter), c_{p_ac} representa el calor específico del aceite.

2.3 Elementos de Normatividad de autogeneración y cogeneración. Promoción de la autogeneración en el sector comercial y de servicios

En Colombia, mediante el documento de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG, 085 del 29 de octubre de 2008 se fijan los requisitos para los cogeneradores y se plantean las condiciones para que un proyecto sea declarado de cogeneración, con base en el indicador REE (Rendimiento Eléctrico Equivalente), como se indica en la Tabla I [4].

Mediante la Resolución 005 de 2010 de la CREG, en Colombia se aprobó la determinación de los requisitos y condiciones técnicas que deben cumplir los procesos de cogeneración [4]: “Los cogeneradores pueden vender energía, bajo los siguientes requisitos principales: 1. Mantener un Rendimiento Eléctrico Equivalente (REE) superior al mínimo exigido; 2. Producción mínima de energía eléctrica y térmica en el proceso. • Si produce Energía Eléctrica a partir de Energía Térmica, la Energía Eléctrica producida deberá ser mayor al 5 % de la Energía Total generada por el sistema (Térmica + Eléctrica). • Si produce Energía Térmica a partir de un proceso de generación de Energía Eléctrica, la Energía Térmica producida deberá ser mayor al 15 % de la Energía Total generada por el sistema (Térmica + Eléctrica). 3. El valor del REE y la producción mínima de energía eléctrica y térmica se determinan por medio de auditorías energéticas y pruebas. 4. Se establece la restricción de que el proceso de cogeneración debe ser de propiedad de quien realice la actividad productiva de la cual hace parte”.

Oficialmente la generación distribuida aparece en el plan energético nacional 2010-2014, en el cual se aclara que dentro de la generación distribuida se consideran la autogeneración, la cogeneración y la generación aislada. A partir de la expedición de la Ley 1715 de 2014 [5], en Colombia se formaliza la autogeneración como una actividad en la que las empresas jurídicas y empresas pueden comercializar sus excedentes disponibles de

energía eléctrica, obtenida en sus procesos industriales, a través de la red, en los términos establecidos por la CREG para tal fin. El modelo de red eléctrica inteligente se abre a los usuarios, quienes pueden ser también generadores y distribuidores de energía y adaptar sus consumos según la información de precios en tiempo real.

Tabla 1. Valor mínimo de REE para status autogenerador.

Tipo de combustible REE [%]	REE [%]
Gas natural	53,5
Carbón	39,5
Hidrocarburos grados API < 30	30,0
Hidrocarburos grados API > 30	51,0
Bagazo y demás residuos agrícolas de la caña de azúcar	20,0
Otros combustibles de origen agrícola	30,0

El Gobierno Colombiano expidió el Decreto 2143 de 2015 [9], mediante el cual se reglamentan incentivos tributarios para la promoción, desarrollo y utilización eficiente de la energía. Se abren paso las microrredes, con fuentes de generación distribuida, almacenamiento local, cargas controladas y la posibilidad de formar islas eléctricas automáticamente.

El Estado Colombiano está promoviendo programas para la generación distribuida (GD) y probablemente incentivará más los proyectos para autogeneración en los sectores comerciales, residencial y de servicios, emulando iniciativas como la del Departamento de Energía de los Estados Unidos, el cual impulsó el programa de Sistemas de motores alternativos avanzados (ARES), diseñado para desarrollar unidades pequeñas de cogeneración (micro-generadores) de alta eficiencia [12]. Si se crean incentivos para la autogeneración y cogeneración en los sectores comerciales, residencial y de servicios, podría verse atractiva la incorporación al sistema de generación de unidades comerciales de cogeneración ya existentes en el mercado internacional, como son las fabricadas por compañías como SenerTec Dachs (holandesa), Tedom (checa), Boderus (belga) Energia Nova (italiana), Cogenco (inglesa), Eqtec (española), Yanmar (japonesa), Enertec Kraftwerke (alemana), entre otras.

La compañía checa Tedom produce microplantas, diseñadas para gas natural, pero que pueden ser modificadas para biogás, se producen para rangos de potencias desde 23 kW hasta 300 kW y reportan una eficiencia entre el 76 y el 85% cuando se utilizan simultáneamente para generar electricidad y calor [22]. SenerTec Dachs instaló cerca de 100 unidades de micro-cogeneración de 5 kWe basadas en motor a gas natural

en el 2004. La unidad entrega 5,5 kW de electricidad y 12,5 kW de calor. Las plantas se venden principalmente a hoteles pequeños, balnearios, unidades residenciales, centros de atención. A un costo de 14000 Euros, estimando ahorrar 1,341 Euros al año, la inversión se recupera en 8 años; son diseñadas para operar con gas, pero pueden alimentarse con GLP, Diesel o bio-Diesel [22].

2.4 Índices energéticos de la cogeneración

La energía mecánica en las plantas eléctricas se realiza en energía eléctrica con una eficiencia que depende de la relación entre la energía activa y la energía reactiva dada por el sistema de carga

($N_{eléc_activa} = \sqrt{3}I_{consumida}V_{generador} \cos\phi$) y del rendimiento del electrogenerador, η_{gen} . Así, considerando la potencia consumida igual a la potencia activa del generador, la potencia mecánica del motor se determina mediante la expresión:

$$N_e = \frac{N_{elétrica_activa}}{\eta_{generador}} = \frac{\sqrt{3}I_{consumida}V_{generador} \cos\phi}{\eta_{generador}} \quad (7)$$

Y el rendimiento efectivo del motor por:

$$\eta_{e\ motor} = \frac{N_e}{\dot{Q}_{equiv}} \quad (8)$$

Es común evaluar el rendimiento de la planta eléctrica en función de la potencia equivalente en el combustible suministrada al motor de combustión:

$$\eta_{inst_eléc} = \frac{N_{elétrica_consumida}}{\dot{Q}_{equiv}} \quad (9)$$

Asumiendo que todo el calor evacuado con los gases de escape y el refrigerante es utilizable ($Q_{útil} = Q_{refr} + Q_{esc}$), se acostumbra definir la relación calor electricidad, R_{CE} , para calificar la capacidad del motor para ser utilizado en cogeneración:

$$R_{CE} = \frac{Q_{esc} + \dot{Q}_{refr}}{N_{elétrica_activa}} \quad (10)$$

Adicionalmente al parámetro R_{CE} , puede hacerse una abstracción y considerar el rendimiento de un motor eléctrico equivalente, R_{EE} , cuyo consumo de potencia de combustible es menor al de la planta eléctrica en la magnitud de la energía recuperada de los gases de escape

y el refrigerante (evaluada esta energía recuperada por un rendimiento de regeneración), definido como [4]:

$$R_{EE} = \frac{N_{elétrica_activa}}{\dot{Q}_{equiv} - \frac{Q_{esc} - Q_{refr}}{\eta_{regen}}} \quad (11)$$

Finalmente, el rendimiento de la planta eléctrica con cogeneración puede evaluarse con el rendimiento global de la instalación de cogeneración:

$$\eta_{inst_cogen} = \frac{Q_{gas} + Q_{refr} + N_{elétrica_consumida}}{\dot{Q}_{equiv}} \quad (12)$$

Dependiendo de la normatividad de cada país, se fijan unos límites para incentivar la producción de energía. Como se comentó en el párrafo anterior, en Colombia, la Resolución 085 de la CREG define los valores del REE requeridos para que un proyecto sea declarado de cogeneración (Tabla I).

En España, por ejemplo, las plantas con un rendimiento global de la instalación con valores superiores a los de la tabla 2. son autorizadas para comercializar la energía excedente.

Tabla 2. Valor mínimo de R_{EE} para status autogenerador.

Combustible	Tecnología	REE (%)
Líquido	Motores	56
Gaseoso	MCIA	55
	Turbina de gas	59

Fuente. Elaboración propia.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN UTILIZADA Y METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS

3.1. Descripción de la instalación adecuada para las pruebas de la planta eléctrica

La instalación está integrada por un motor Diesel de dos cilindros de aspiración natural e inyección mecánica acoplado a un sistema de carga basado en un generador eléctrico y un banco de resistencias, un medidor de caudal de refrigerante tipo rotámetro, una válvula para controlar el paso de refrigerante, un medidor volumétrico de consumo de combustible con dos válvulas de control, un medidor de columna de agua para la medición de la presión de admisión del motor, un sistema de instrumentación representado por los medidores de voltaje y amperaje del generador, tres termopares a la

salida del escape y a la entrada y salida del refrigerante, el sistema de control de las resistencias eléctricas de carga y los medidores de presión y temperatura ambiente.

En la Figura 6 se ilustra la disposición del grupo electrógeno empleado en las pruebas.



Figura 6. Detalle del grupo electrógeno instrumentado para las pruebas. **Fuente.** Elaboración propia.

Las características principales del motor y del generador utilizado son:

Grupo electrógeno. Motor Diesel de cilindros, 72 mm de diámetro de pistón, 75 mm de carrera, 611 cm³ de cilindrada, alimentado con gasóleo como combustible, de poder calorífico $H_c = 42000$ kJ/kg (a $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$), 0,84 kg/l de densidad y gravedad API de 35. Generador eléctrico trifásico con capacidad de 230–400 V de tensión a 3000 min⁻¹, potencia máxima de 10 kVA a 50 Hz de frecuencia; rendimiento de 87%. Resistencias eléctricas (3) de 2 kW de potencia unitaria.

Instrumentación. Caudalímetro de aire representado por una tobera de constante $k=0,9686$ m²/s/h y un manómetro de columna de agua $\Delta H_{max}=1$ m; caudalímetro de combustible representado por un volumen marcado de capacidad 100 cm³ y un cronómetro digital; caudalímetro de agua representado por un rotámetro con rango máximo 1000 kg/h; sensores de temperatura de agua representados por termorresistencias tipo PT-100. Se emplea un termopar tipo K para medir la temperatura de gases de escape.

3.2. Metodología de ensayo

Tras comprobar que las válvulas de paso del combustible se encuentran en las posiciones apropiadas y que la válvula de paso del refrigerante están abiertas se pone en marcha el motor y se verifica que todos los instrumentos de medida registran correctamente los parámetros correspondientes. Se conecta la primera resistencia

eléctrica y cuando el motor alcance el régimen térmico adecuado (temperatura del refrigerante en el rango 70 – 80°C), se registran todos los parámetros indicados por los instrumentos de medida (ver Tabla III). El consumo de combustible se mide mediante el tiempo tomado para desocupar el volumen aforado del medidor y tras su medición se asegura el rellenado del volumen de aforo mediante el control de las válvulas de paso. Terminadas las primeras mediciones se pasa a cargar el motor con dos resistencias y luego con tres, repitiendo los procedimientos de registro.

Una vez realizadas las mediciones se calculan las variables requeridas para cuantificar la distribución de la energía en la planta eléctrica, los rendimientos y los parámetros cuantificadores de la viabilidad de recuperación de energía, empleando las expresiones (2), (4), (5), (7) – (12), tras calcular las masas de aire y combustible como:

La masa de aire mediante la expresión

$$m_a = k\sqrt{2\rho g\Delta H} \quad (13)$$

El consumo de combustible por la expresión

$$m_{comb} = \frac{V_f}{t_{comb}} \rho_f \quad (14)$$

y la potencia correspondiente al combustible suministrado por

$$\dot{Q}_{equiv} = m_f H_c \quad (15)$$

4. RESULTADOS DEL BALANCE TÉRMICO DEL MOTOR Y DE LA VALORACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COGENERACIÓN

Tras procesar la información obtenida en las pruebas realizadas sobre la instalación para los tres casos de carga, el resumen de los resultados del balance térmico del motor y los parámetros de valoración de la capacidad de cogeneración de la planta se presenta en la tabla III. En la medida en que aumenta la carga, la partición entre las energías para potencia efectiva, gases de escape y refrigerante se va igualando a favor de la potencia efectiva. Se ha asumido un rendimiento de la combustión del 100 %, las pérdidas por transferencia de calor al medio ambiente y las pérdidas de accionamiento de elementos como las bombas no han entrado en el balance, con déficits de aproximadamente 5, 7 y 9,4 kW para los tres estados de carga, que dan cuenta de esas pérdidas no medidas. A la luz de los límites de la tabla I, considerando la gravedad API del combustible ($35 > 30$) no es

aprobable la cogeneración para esta planta eléctrica, al menos en las condiciones en las que está operando. Sin embargo, debe observarse que el límite normativo de REE de 51% resulta ser muy alto y penaliza y desestimula la cogeneración, al menos para los grupos

electrógenos de las características del grupo objeto de la prueba.

Tabla 3. Síntesis de los resultados de los tres casos de carga de la planta eléctrica.

Parámetro	Unidades	1 resistencia 3 A	2 resistencias 6 A	3 resistencias 9 A
\dot{Q}_{equiv}	kW	17,73	22,91	30,15
N_e	kW	2,60	5,20	7,79
\dot{Q}_{gas}	kW	4,01	5,34	7,12
\dot{Q}_{refr}	kW	6,22	5,41	5,86
\dot{Q}_{aire}	kW	0,01	0,01	0,03
η_e	-	0,15	0,23	0,26
$N_{eléc_activa}$	kW	2,13	4,26	6,39
$\eta_{inst_eléct}$	-	0,12	0,19	0,21
R_{CE}	-	4,81	2,52	2,03
R_{EE}	-	0,34	0,39	0,41
η_{inst_cogen}	-	0,70	0,66	0,64

Fuente. Elaboración propia.

Los resultados del balance energético del motor se ilustran en la gráfica de la Figura 7. Debe anotarse que el balance realizado tiene que mirarse con carácter aproximativo, dado que las mediciones, sobre todo las del caudal del refrigerante se han realizado con dificultades asociadas a la estabilización del caudal, cuya regulación es manual.

Se puede ver el mejoramiento de la relación potencia efectiva en relación con el combustible suministrado, también la reducción relativa del calor disipado al sistema de refrigeración y el crecimiento algo más pronunciado de las pérdidas con los gases de escape. La variación de los rendimientos para los tres estados de carga se ilustra en la gráfica de la Figura 8.

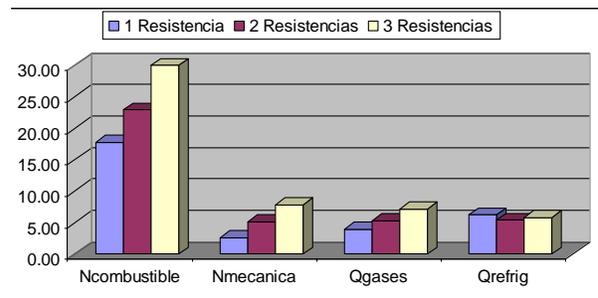


Figura 7. Balance energético del motor de la planta eléctrica bajo los tres estados de carga. **Fuente.** Elaboración propia.

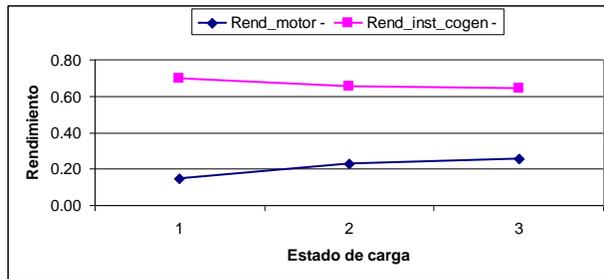


Figura 8. Variación del rendimiento del motor y del rendimiento global de cogeneración, asumiendo que toda la energía disipada con los gases de escape y con el sistema de refrigeración es utilizada. **Fuente.** Elaboración propia.

Se puede ver de la figura 7 y de la tabla 3, como era de esperarse, que el rendimiento del motor crece con la carga y así mismo decrece el de la instalación de cogeneración.

5. CONCLUSIONES

Se ha abordado la distribución energética de los motores de combustión de una manera general, a partir de algunas referencias reconocidas en la literatura y también de la sistematización de la información relacionada con los valores de energía disipada al refrigerante para un grupo representativo de motores, presentando una correlación para los calores disipados por el radiador del motor y el posenfriador del aire de admisión.

Se han esbozado elementos de la normatividad colombiana relacionada con la cogeneración y la autogeneración de energía para justificar el ejercicio del balance energético de los motores y su proyección.

Se han ilustrado los fundamentos teóricos del balance energético de los motores de combustión interna, y como aplicación, se ha cuantificado de una manera gruesa los parámetros de cogeneración como la relación calor electricidad, el rendimiento eléctrico equivalente y el rendimiento global de una planta eléctrica, suponiendo que toda la energía disipada con los gases de escape y con el refrigerante se aprovecha. Aún con este supuesto, el desempeño de la instalación no da los valores necesarios para justificar la utilización de la planta en cogeneración, bajo la normatividad colombiana [4]. Esto no deja de lado que la energía se pueda y deba emplear en otros sistemas auxiliares o para fines donde esa energía se necesite y los costos de utilización lo permitan.

En particular, las mediciones realizadas en la planta eléctrica y el control del sistema de refrigeración del motor que se ha empleado no permiten mucha exactitud y, además, se tienen grandes incertidumbres en las

mediciones sobre todo de caudales y temperaturas del refrigerante. Adicionalmente, se tienen incertidumbres sobre la calidad de la combustión. Aun así pensamos que el ejercicio experimental realizado es ilustrativo conceptual e instrumentalmente para los interesados en el mejoramiento del aprovechamiento energético de sus instalaciones, dado que actualmente en el mundo ya se están comercializando microgeneradores para utilización en establecimientos comerciales con pequeña demanda de energía, como se reporta en particular en el CHP Deployment Program impulsado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos [12] [22].

6. REFERENCIAS

- [1] Ley 1215 de 2008. Por la cual se adoptan medidas en materia de generación de energía eléctrica. Diario Oficial 47052 de Colombia. Julio 16 de 2008.
- [2] Resolución 085/1996. Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG. Cogenerador conectado al SIN. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 1996.
- [3] Capacidad instalada de autogeneración y cogeneración en sector de industria, petróleo, comercio y público del País. Informe presentado por el consorcio HART-RE a la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, diciembre 22 de 2014. [PDF] Disponible en: http://www.andi.com.co/cgc/Documents/1_Informe_final_auto_cogeneracion.pdf.
- [4] Resolución CREG 005 de 2010. Por la cual se determinan los requisitos y condiciones técnicas que deben cumplir los procesos de cogeneración y se regula esta actividad. Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG, 2010.
- [5] Ley 1715 de 2014. Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial de Colombia No. 49.150. Mayo 13 de 2014.
- [6] Decreto 2469 de 2014. Lineamientos en materia de entrega de excedentes de autogeneración. Ministerio de Minas y Energía, MME, 2014.
- [7] Resolución CREG 024 de 2015. Regulación de la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG, 2015.
- [8] Resolución 0281 de 2015. Definición del límite de autogeneración de pequeña escala. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, 2015.

- [9] Decreto 2143 de 2015. Incentivos para promover las inversiones en Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) y la gestión eficiente de la energía contenidos en el Capítulo III de la Ley 1715. Ministerio de Minas y Energía, MME, 2015.
- [10] H. I. Onovwiona, and V. I. Ugursal. “Residential cogeneration systems: review of the current technology”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10(5), 2006, pp. 389-431.
- [11] IEA, International Energy Agency. *World Energy Outlook 2016, Resumen Ejecutivo*.
- [12] Reciprocating Engines (DOE CHP Technology Fact Sheet Series) – Fact Sheet, 2016: [PDF] Disponible en: <https://energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/CHP-Recip%20Engines.pdf>.
- [13] T. Morel and R. Keribar. “Heat radiation in D. I. Diesel engines”, SAE paper 860445, 1986.
- [14] T. Morel et al. “Methods for heat analysis and temperature field analysis of the insulated Diesel”, NASA CR-174783, 1984.
- [15] I. Taymaz, I. “An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine”, *Energy* 31, 2006.
- [16] G.Descombes, F. Maroteaux and M. Feidt. “Study of the interaction between mechanical energy and heat exchanges applied to IC engines”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, issue 16, 2003, pp. 2061-20078.
- [17] J. A. Caton. “A review of investigations using the Second Law of Thermodynamics to study internal combustion engines”, SAE paper 2000-01-0952, 2000.
- [18] J.B. Heywood, “Internal combustion engine fundamentals”, Mc-Graw Hill, 1988.
- [19] Romero, P. C. *Máquinas de combustión interna. Fundamentos de construcción y cálculo*. UTP, 2003.
- [20] Romero, P. C. *Contribución al Conocimiento del Comportamiento y la Gestión Térmica de los Motores de Combustión Interna Alternativos*. Tesis Doctoral, CMT-UPV, Valencia, España, 2009.
- [21] A.J. Torregrosa et al. “Assessment of the influence of different cooling system configurations on engine warm-up, emissions and fuel consumption”, *IJAT*, vol. 9, n° 4, pp. 447-458, 2008.
- [22] European Renewable Energy Council, EREC. “Creating Markets for Renewable Energy Technologies EU RES Technology Marketing Campaign. Documento derivado del proyecto RESTMAC”. [PDF] Disponible en http://www.energy-cities.eu/IMG/pdf/RESTMAC_-_Cogeneration_at_Small_Scale.pdf.
- [23] H. Perez-Blanco, “Experimental characterization of mass, work and heat flows in an air cooled, single cylinder engine”, *Energy conversion and management* 45, 2004.
- [24] Díaz, G. C. A. et al. Diseño y construcción de una planta piloto para la producción de biodiesel de manera continua. *Revista UIS Ingenierías*, [S.l.], vol. 7, n° 1, 2010. [En Línea] Disponible en: <<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/401>>.