

UTILIZAÇÃO DE UM GASEIFICADOR PARA O REAPROVEITAMENTO PARCIAL DA ENERGIA REJEITADA PELOS MOTORES DIESEL DE UMA PLANTA TERMOELÉTRICA

Matheus B. A. Barros, matheus.alencar@ufpe.br¹

Jarmison A. Silva, jarmisonaraujo@yahoo.com.br¹

Thiago L.C.C. Novaes, thiago.novaes@ifba.edu.br²

Daniel Rodríguez, danivd1188@gmail.com¹

Jorge R. Henríquez, rjorge@ufpe.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, PE, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Departamento de Ensino - Rua Jean Torres, s/n - Bairro John Kennedy - Loteamento Cidade Nova, CEP - 45.201-570 – Jequié- BA – Brasil.

Resumo: As restrições ambientais e a necessidade de uso mais eficiente dos combustíveis fósseis fazem com que o reaproveitamento de rejeitos térmicos e a utilização das chamadas fontes alternativas de energia seja cada vez mais importante. Nesse contexto, o presente trabalho visa analisar o potencial energético de se reaproveitar uma parcela da energia disponível nos gases de exaustão dos motores Diesel de uma planta termoeletrica para produzir gás combustível através da gaseificação de biomassa. O estudo foi realizado a partir de um modelo, construído na plataforma do software EES (Engineering Equation Solver), que engloba o processo de gaseificação e um sistema de recuperação de calor, tomando como base dados reais de uma planta termoeletrica instalada em Suape, Pernambuco. No estudo, foram analisadas primeiramente quais as condições de gaseificação que propiciam a produção de um gás com alto potencial energético, visando aumentar a eficiência global da planta através da integração de um gaseificador. Entre os principais resultados obtidos, foi observado que a integração do gaseificador pode aumentar a eficiência global da planta termoeletrica em quase vinte por cento em relação à eficiência original da central.

Palavras-chave: Biomassa, Gaseificação, Motor diesel, Eficiência térmica, Modelo numérico

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, cada vez mais indústrias de vários setores diferentes vêm buscando incessantemente formas de tornar seus produtos e processos menos prejudiciais ao meio ambiente. O uso indiscriminado de combustíveis fósseis ao longo dos anos é um grande fator responsável pelo crescente aumento da poluição, vivenciado nas grandes cidades do mundo, o que afeta diretamente a saúde dos habitantes dessas cidades, além de contribuir consideravelmente para o fenômeno do efeito estufa, grande responsável pelo gradual aumento da temperatura do planeta. Além disso, esses combustíveis vêm se tornando cada vez mais escassos devido ao seu consumo exacerbado. Dessa forma, grandes esforços vêm sendo realizados, com o intuito de aperfeiçoar as tecnologias que possam aproveitar ao máximo e de forma sustentável a energia proveniente das chamadas fontes renováveis de energia. Dentre essas fontes, uma cujo uso encontra-se em crescente expansão tanto no mercado nacional quanto no internacional consiste na biomassa.

De acordo com Oliveira (2014) a geração de energia elétrica a partir da biomassa tende a aumentar cada vez mais devido ao desenvolvimento e aprimoramento de novas tecnologias, que fazem com que a conversão de biomassa em energia elétrica ocorra de modo mais eficiente, além obviamente do reconhecimento das vantagens ambientais inerentes ao seu uso racional, como o controle das emissões de CO₂ e enxofre.

O uso da biomassa como fonte de energia não é algo recente, e diversas técnicas visando o melhor aproveitamento da energia contida nessa fonte vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas. Uma dessas técnicas consiste na gaseificação dessa biomassa, com o intuito de obter um gás combustível dela derivado. Esse gás obtido possui um baixo poder calorífico e pode ser utilizado como combustível em máquinas térmicas tais como turbinas a gás e motores alternativos de combustão interna. O processo de gaseificação da biomassa normalmente ocorre em reatores chamados gaseificadores (Lora et al, 2008).

Para que a gaseificação ocorra, é necessário o emprego de um agente oxidante (ou agente gaseificador) junto à biomassa no gaseificador. Diferentes agentes gaseificadores podem ser utilizados no processo de gaseificação, dependendo principalmente do uso final que será dado ao gás obtido. O agente gaseificador pode variar desde oxigênio

puro, vapor de água ou ar atmosférico, até combinações que envolvam quantidades relativas de vapor de água superaquecido incorporados ao ar ou ao oxigênio. A mistura gasosa obtida com a incorporação do vapor de água superaquecido como agente gaseificador é conhecida como gás de síntese ou *syngas* (Lora et al, 2008). Ainda segundo esses autores, o gás produzido a partir da gaseificação utilizando oxigênio puro ou vapor de água como agente oxidante possui um poder calorífico consideravelmente superior ao do gás obtido quando o ar atmosférico é empregado.

O gás formado no processo de gaseificação é composto basicamente pelos gases combustíveis hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), e por gases inertes como vapor d'água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2). Quando o agente gaseificador é o ar atmosférico, o gás produzido também apresenta um alto teor de nitrogênio (N_2) na sua composição (Hoffman, 2010). Os percentuais dos gases combustíveis formados variam com as condições de operação do gaseificador (pressão, temperatura, quantidade de agente oxidante utilizado), com o tipo e com o percentual de umidade da biomassa utilizada, e com o tipo de gaseificador empregado (Lora et al., 2008).

A aplicação do gás de síntese produzido a partir da técnica de gaseificação da biomassa como combustível em motores de combustão interna (MCI) utilizados em pequenas centrais termoelétricas corresponde a uma alternativa interessante para a produção de energia (Martínez, 2012). Os motores de combustão interna com ignição por compressão (ou motores a Diesel) são mais utilizados nas centrais termoelétricas devido à sua robustez e à sua eficiência no consumo de combustível. A utilização do gás de síntese como combustível nesses motores é facilitada pelo fato de que apenas pequenas adaptações são necessárias para que esses equipamentos possam operar no modo *dual fuel* (bi-combustível), alimentados por uma combinação entre o gás derivado da biomassa e o combustível convencionalmente utilizado no motor (Rinaldini et al, 2017). Os mesmos autores afirmam que a utilização do gás de biomassa como combustível complementar nos motores Diesel é altamente benéfica para a redução da emissão de materiais particulados por parte desses motores, além de não prejudicar o desempenho dessas máquinas de forma acentuada.

A integração de tecnologias em um mesmo sistema que permita o melhor aproveitamento da energia primária através do uso da energia em cascata representa uma forma inteligente e responsável do gerenciamento da energia disponível. Liang et al. (2014) por exemplo, analisaram a performance de um sistema de cogeração eletricidade-refrigeração que utiliza o calor de exaustão de um motor marítimo. O sistema é baseado em uma combinação entre um Ciclo Rankine para a geração de eletricidade utilizando água como fluido de trabalho e um ciclo de refrigeração por absorção utilizando uma solução binária amônia e água como fluido.

Song et al. (2014), por sua vez, propõem uma forma de aumentar a eficiência térmica de motores Diesel marítimos por meio do reaproveitamento do calor rejeitado pelo equipamento através dos gases de exaustão e da água de arrefecimento. O método analisado consistiu na utilização de um Ciclo Rankine Orgânico (CRO). A potência máxima do sistema foi escolhida como critério de avaliação para selecionar o fluido de trabalho mais adequado e para otimizar os parâmetros termodinâmicos do sistema. Ao empregar um CRO utilizando ciclohexano como fluido de trabalho, foi observado que a potência máxima de saída para o sistema alcança o valor de 99,7 kW, o que correspondeu a um aumento de 8,7% na eficiência.

De forma semelhante, em Morawski (2016), são avaliadas alternativas através do uso de sistemas térmicos de recuperação de calor para reutilizar os rejeitos térmicos provenientes dos 15 motores Diesel que equipam a Termoelétrica UTE Viana, com o objetivo de aumentar a eficiência e a potência produzida da usina. O resultado obtido foi que, dentre todas as alternativas analisadas, a que apresentou o máximo reaproveitamento da energia rejeitada pelos motores, foi a combinação entre um Ciclo Rankine Orgânico (para reaproveitar a energia perdida através dos gases de exaustão) e um *Opcom ORC Powerbox* (para o reaproveitamento da energia perdida através da água de resfriamento). Este arranjo foi capaz de gerar uma potência elétrica adicional de 10,6 MW (aumento de 6,1% da potência inicialmente produzida pela usina). Comparando a eficiência da planta, essa é a alternativa que também corresponde à maior eficiência global, com eficiência energética da ordem de 45,41%, contra um valor inicial de 42,8%.

Dessa forma, o presente estudo visa analisar, sob o ponto de vista energético, os efeitos da instalação de um gaseificador em uma planta termoelétrica. A instalação desse equipamento tem como objetivo reaproveitar uma parcela da energia disponível nos gases de exaustão dos motores Diesel da planta para auxiliar no processo de gaseificação da biomassa, devendo-se avaliar o quanto essa medida irá contribuir no aumento da eficiência global da central.

2. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido através de uma abordagem teórico-numérica envolvendo uma modelagem do processo de gaseificação e analisando as melhores condições de gaseificação a partir dos rejeitos térmicos dos motores. A partir disto, são analisadas as eficiências energéticas da planta integrada considerando a disponibilidade total do gás de síntese produzido como energia para uso externo à planta ou como insumo energético (combustível) para os motores, reduzindo desta forma o consumo do combustível convencionalmente utilizado nos motores. Ambas as estratégias de operação são analisadas neste estudo.

Para o trabalho em questão, a biomassa selecionada para simular o processo de gaseificação foi a Jurema Preta (*Mimosa hostilis*), uma biomassa de origem vegetal que consiste em uma árvore arbustiva, típica da caatinga e que está presente em abundância em praticamente todo o nordeste brasileiro. O vapor de água é utilizado como o agente oxidante do processo. Na Tab. 1 a seguir são apresentados os percentuais em massa de carbono, hidrogênio, oxigênio, umidade e cinzas da biomassa selecionada, obtidos a partir de uma análise elementar, bem como o poder calorífico inferior da Jurema Preta (em kJ/kg), segundo (Silva, 2016).

Tabela 1. Percentuais em massa e poder calorífico inferior da biomassa vegetal Jurema Preta.

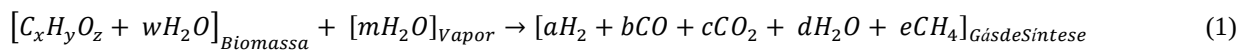
Biomassa	Percentuais em massa					PCI _{Bio} (kJ/kg)
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Umidade	Cinzas	
Jurema Preta	42,63%	6,18%	39,10%	11,05%	1,04%	21910

O modelo do processo de gaseificação, que engloba as reações termoquímicas que regem o processo de gaseificação da biomassa (Silva, 2016; Henríquez et al, 2015) e o reaproveitamento parcial da energia disponível nos gases de exaustão dos motores da planta (que se dá através de um sistema de recuperação de calor), foi desenvolvido utilizando o ambiente de programação do software *Engineering Equation Solver (EES)*. O modelo do processo de gaseificação utilizado envolve equilíbrio químico, e os dados de entrada consistem na temperatura e pressão de gaseificação, na composição química elementar da biomassa e na razão entre a massa de vapor de água e a massa de biomassa empregada (razão V/B). Os resultados principais fornecidos pelo modelo são a composição (em termos das frações molares) e o poder calorífico inferior do gás de síntese produzido, bem como a massa de gás combustível produzida.

O reaproveitamento parcial da energia disponível nos gases de exaustão dos motores se dará por meio de trocadores de calor, que irão utilizar parte dessa energia para pré-aquecer a biomassa e o agente oxidante, que precisam ser aquecidos até a temperatura de gaseificação pré-determinada, para que assim possam ser utilizados no gaseificador.

2.1. Modelo do Processo de Gaseificação da Biomassa

Considerando o modelo do processo de gaseificação da biomassa, desenvolvido por Silva et al. (2016), a Eq. (1) a seguir corresponde à equação que governa o processo genérico de gaseificação da biomassa utilizando vapor de água como agente oxidante. Os coeficientes x , y e z representam respectivamente as quantidades em mol de carbono, hidrogênio e oxigênio da biomassa, enquanto que o coeficiente w corresponde ao teor de umidade presente na biomassa. Esses coeficientes são determinados a partir dos percentuais em massa de carbono, hidrogênio, oxigênio e umidade presentes na biomassa, apresentados na Tab. 1, e correspondem a dados de entrada do algoritmo. O coeficiente molar m está associado à quantidade de vapor de água injetado no processo de gaseificação. Esse valor é determinado a partir da massa de vapor de água, que por sua vez é calculada pela razão V/B. Uma razão de 0,25, por exemplo, indica que uma massa de vapor de água igual a 25% da massa de biomassa utilizada será injetada no processo. O valor de V/B também corresponde a um dado de entrada do modelo.



Analisando os produtos da reação de gaseificação, os coeficientes, a , b , c , d e e correspondem às quantidades molares dos principais componentes do gás de síntese produzido. Fazendo um balanço dos elementos químicos envolvidos no processo, três equações são obtidas, com o intuito de determinar os coeficientes dos produtos da reação. As Eqs. (2), (3) e (4) representam respectivamente os balanços químicos para o carbono, o hidrogênio e o oxigênio.

$$x = b + c + e \quad (2)$$

$$y + 2w + 2m = 2a + 2d + 4e \quad (3)$$

$$z + w + m = b + 2c + d \quad (4)$$

Para determinar os cinco coeficientes dos produtos da reação de gaseificação, é necessário agregar duas novas equações ao sistema de equações anterior. Essas duas equações são obtidas a partir das equações de equilíbrio químico relacionadas às reações de dissociação envolvidas no processo de gaseificação, e são apresentadas no trabalho de Silva et al. (2016).

Conhecidas as concentrações molares do gás de síntese, o cálculo do poder calorífico inferior do *syngas* (PCI_{GS}) é apresentado na Eq. (5), e corresponde à razão entre o calor de reação ($Q_{reação}$), obtido estequiometricamente através de um processo isotérmico, e a massa molecular do gás de síntese (M_{GS}).

$$PCI_{GS} = \frac{Q_{reação}}{M_{GS}} \quad (5)$$

No presente estudo é suposto que a biomassa e o vapor de água, como agente oxidante do processo, são injetados ao mesmo tempo no gaseificador, e que estes são totalmente convertidos no gás de síntese. Também foi considerado que o processo de decomposição térmica da gaseificação ocorre em regime permanente, e que o estado de equilíbrio químico foi alcançado para a formação do gás de síntese. Para que o processo de gaseificação ocorra à temperatura de

gaseificação pré-definida T_s , é necessário que a biomassa e o vapor de água, inicialmente à temperatura ambiente T_e , sejam pré-aquecidos antes de serem injetados no gaseificador. Logo, a energia necessária para aquecer a biomassa até a temperatura de gaseificação é igual à variação de entalpia da biomassa, que pode ser calculada pela Eq.(6).

$$Q_{Bio} = \Delta H_{Bio} = (x \cdot c_{pC} + y \cdot c_{pH} + z \cdot c_{pO}) \cdot (T_s - T_e) + w \Delta h_{H_2O} \quad (6)$$

Na equação acima, c_{pC} , c_{pH} e c_{pO} correspondem, respectivamente, aos calores específicos à pressão constante do carbono, do hidrogênio e do oxigênio, enquanto Δh_{H_2O} representa a variação de entalpia específica da água, relacionada ao aumento de temperatura. De forma análoga, a energia necessária para aquecer o vapor de água, utilizado como agente oxidante do processo, até a temperatura de gaseificação, pode ser obtida a partir da Eq.(7) a seguir.

$$Q_{Vap} = \Delta H_{Vap} = m \cdot \Delta h_{H_2O} \quad (7)$$

Ao fim do processo de gaseificação, o gás de síntese obtido deve ser limpo e resfriado até a temperatura ambiente, para que possa então ser comercializado ou utilizado em outros processos. Não faz parte do escopo do presente estudo simular como se dão a limpeza e o resfriamento do gás produzido, sendo considerado aqui que este já foi resfriado e limpo quando vendido ou quando aplicado como combustível complementar dos motores da planta.

2.2. Sistema de Recuperação de Calor

Para o reaproveitamento parcial da energia disponível nos gases de exaustão dos dezessete motores da planta, um sistema de recuperação de calor composto por três trocadores de calor com escoamento contracorrente foi planejado. A energia reaproveitada por meio desses trocadores é utilizada no pré-aquecimento da biomassa e do vapor de água, para que estes possam ser utilizados no gaseificador à temperatura de gaseificação estipulada.

Os motores Diesel que compõem a planta são de quatro tempos, da marca Wärtsilä, do tipo W20V46F. Esses motores são turboalimentados e têm uma potência nominal de 23 MW. O motor Wärtsilä W20V46F pode funcionar com combustível líquido do tipo óleo combustível pesado (HFO), óleo combustível leve (LFO) ou óleo diesel (DO). Os combustíveis LFO ou DO são utilizados apenas nas partidas e nas paradas do motor. Em operação o motor utiliza óleo combustível B1.

Seis dos dezessete motores estão acoplados a um sistema de produção de vapor. Esse sistema é basicamente formado por: seis caldeiras de recuperação fabricadas pela marca *Aalborg Industries*, modelo UNEX H tipo 6U (cada uma acoplada a um motor), que produzem vapor para processo interno da planta a partir da disponibilidade de energia térmica dos gases de exaustão dos motores; duas caldeiras auxiliares, que funcionam com óleo diesel; um sistema de água de alimentação, constituído por um depósito de água de alimentação, por uma unidade de bomba de água de alimentação e por uma unidade de dosagem de químicos; um sistema de condensado e duas unidades de aquecimento de vapor.

A utilização dos gases de exaustão como fonte de aquecimento nas caldeiras de recuperação acarreta em uma diminuição na temperatura desses gases. Dessa forma, após a sua utilização nas caldeiras, os gases de combustão provenientes dos seis motores acoplados às caldeiras terão uma temperatura consideravelmente inferior à temperatura dos gases de exaustão dos outros onze motores da planta, cujos gases de combustão não são, originalmente, reutilizados na planta como fonte de aquecimento.

O primeiro trocador de calor irá envolver o aquecimento da água até a sua temperatura de vaporização, a evaporação completa da água em vapor de água e o aquecimento desse vapor de água até certa temperatura. Como a vazão de água variará de acordo com a quantidade de biomassa injetada no gaseificador, a temperatura final desejada para o vapor de água será pré-definida, dentro dos limites de disponibilidade energética do fluido quente. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, é impossível que o fluido quente forneça energia ao fluido frio até um ponto no qual a temperatura de saída do fluido frio seja maior do que a temperatura de entrada do fluido quente. Assim, a temperatura de saída estimada para o fluido frio deve ser inferior à temperatura de entrada do fluido quente. Os gases quentes de exaustão provenientes dos seis motores acoplados às caldeiras de recuperação da planta serão utilizados como fluido quente nesse primeiro trocador, após o emprego desses gases nas caldeiras.

O segundo trocador de calor irá realizar um novo aquecimento no vapor de água obtido na saída do primeiro trocador de calor. Os gases quentes provenientes dos outros onze motores da planta termoeletrica são aqui empregados como fluido quente. A temperatura de saída do vapor nesse trocador também é pré-definida respeitando-se a segunda lei da termodinâmica. Como não ocorre mudança de fase nesse trocador, e como a vazão do fluido quente é muito superior à vazão do fluido frio, a mudança de temperatura experimentada pelo fluido quente será muito pequena.

O terceiro trocador de calor envolve o pré-aquecimento da biomassa até uma temperatura pré-definida. O fluido quente nesse trocador consiste nos gases provenientes dos onze motores da planta, após a sua utilização no segundo trocador de calor. No terceiro trocador também ocorrerá mudança de fase, uma vez que a parcela de umidade presente na biomassa é evaporada.

Apenas a energia reaproveitada pelos trocadores de calor não é suficiente para o aquecimento total da biomassa e do vapor de água, uma vez que a temperatura dos gases de exaustão dos motores é inferior à temperatura de gaseificação, sendo necessário um aquecimento adicional dos insumos, antes destes serem admitidos no gaseificador.

A Fig.1 a seguir apresenta um esquema simplificado de como seria a configuração da planta termoeletrica após a instalação do gaseificador e do sistema de recuperação de calor, especificando as funções de cada um dos trocadores de calor.

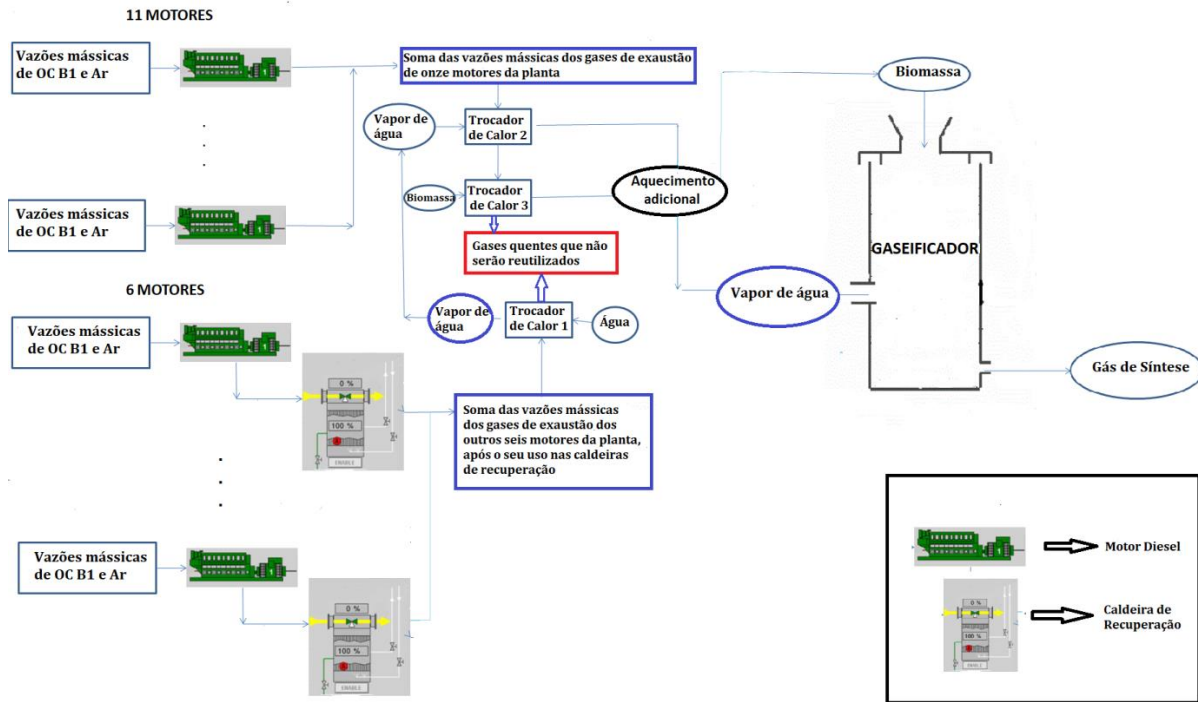


Figura 1. Esquema simplificado da planta termoeletrica analisada, com o gaseificador e o sistema de recuperação de calor devidamente instalados.

2.3. Eficiência Global da Planta Termoeletrica

A eficiência da planta termoeletrica original (antes da instalação do gaseificador) pode ser calculada de acordo com a Eq.(8) a seguir.

$$\eta_{planta,orig} = \frac{17 \cdot \dot{W}_{util}}{17 \cdot \dot{m}_{OCB1} \cdot PCI_{OCB1}} = \frac{17 \cdot \dot{W}_{util}}{17 \cdot \dot{Q}_{comb}} \quad (8)$$

Onde $\dot{W}_{util}$ corresponde à taxa de potência útil média de cada um dos dezessete motores da planta, $\dot{m}_{OCB1}$ corresponde à vazão mássica de óleo combustível B1 na entrada de cada motor e PCI_{OCB1} corresponde ao poder calorífico inferior do óleo combustível (41400 kJ/kg). O fator $\dot{Q}_{comb}$ representa a taxa de energia térmica de entrada do motor, fornecida na forma dos combustíveis. O valor de $\dot{Q}_{comb}$ é determinado para a situação na qual o motor é alimentado apenas com OC B1, uma vez que a vazão mássica de óleo combustível na entrada de cada motor é conhecida para essa situação. Assim, $\dot{Q}_{comb}$ é dada pelo produto entre o poder calorífico inferior do OC B1 e a vazão mássica de óleo combustível na entrada do motor, necessária para que a taxa de potência útil média ($\dot{W}_{util}$) seja entregue.

Considerando agora a situação na qual o gaseificador e os trocadores de calor estão instalados, a eficiência global da planta termoeletrica (η_{planta}) é calculada pela razão entre a energia útil e a energia fornecida ao sistema, de acordo com a Eq.(9) a seguir.

$$\eta_{planta} = \frac{17 \cdot \dot{W}_{util} + \dot{m}_{GS} \cdot PCI_{GS} - 17 \cdot \alpha_{GS} \cdot \dot{Q}_{comb}}{\dot{m}_{Bio} \cdot PCI_{Bio} + \dot{Q}_{adic} + 17 \cdot \dot{Q}_{comb} \cdot (1 - \alpha_{GS})} \quad (9)$$

Na equação anterior o parâmetro $\dot{m}_{Bio}$ corresponde à vazão mássica de biomassa empregada, PCI_{Bio} é o poder calorífico inferior da biomassa utilizada e $\dot{Q}_{adic}$ representa a energia adicional que deve ser fornecida para o aquecimento do vapor de água e da biomassa até a temperatura de gaseificação. O fator α_{GS} representa a fração de gás de síntese empregada como combustível em cada motor, e é definida como a parcela da taxa de energia total que deve ser fornecida para cada motor na forma de combustível ($\dot{Q}_{comb}$) que é suprida pelo gás de síntese. O valor de $\dot{Q}_{comb}$ é mantido fixo à medida que o OCB1 é parcialmente substituído pelo syngas simulado, devendo ser suprido pela queima da combinação de combustíveis. Assim, o produto $\alpha_{GS} \cdot \dot{Q}_{comb}$ corresponde à parcela da taxa de energia $\dot{Q}_{comb}$ que é suprida pela queima do gás de síntese em cada motor da planta. Por fim, PCI_{GS} corresponde ao poder calorífico inferior

do gás de síntese produzido, enquanto que $\dot{m}_{GS}$ é a vazão mássica de gás de síntese produzida para as condições de gaseificação selecionadas e para a quantidade de biomassa empregada.

A fração máxima de energia térmica que pode ser suprida pelo fluxo de gás de síntese produzido pelo gaseificador, considerando a energia que deve ser fornecida na forma de combustível para os dezessete motores da planta, pode ser determinada através da Eq.(10).

$$\alpha_{GS} = \frac{\dot{m}_{GS} \cdot PCI_{GS}}{17 \cdot \dot{Q}_{comb}} \quad (10)$$

Considerando a situação na qual todo o gás de síntese é produzido para uso externo à planta (sendo comercializado, por exemplo), tem-se que a fração de gás de síntese (α_{GS}) utilizada como combustível nos motores da planta será igual a zero. Assim, a Eq. (11) a seguir apresenta uma variação da Eq.(9) para o cálculo da eficiência da planta nessa situação.

$$\eta_{planta} = \frac{17 \cdot \dot{W}_{util} + \dot{m}_{GS} \cdot PCI_{GS}}{\dot{m}_{Bio} \cdot PCI_{Bio} + \dot{Q}_{adic} + 17 \cdot \dot{Q}_{comb}} \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente estudo propõe diferentes análises relacionadas ao processo de gaseificação da biomassa integrada a uma central termoeletrônica equipada com motores Diesel. Os efeitos da temperatura e da fração injetada de vapor de água (razão V/B) sobre as frações molares e sobre o PCI do gás de síntese produzido foram estudados, bem como sobre a quantidade de energia que deve ser fornecida para o aquecimento dos insumos do processo. A influência da integração do gaseificador sobre a eficiência da planta termoeletrônica como um todo constitui um ponto fundamental de análise.

A Tab. 2 apresenta alguns dados fundamentais para a realização dos cálculos relativos ao reaproveitamento da energia disponível nos gases de exaustão e à eficiência térmica da planta termoeletrônica. A potência, a vazão mássica de óleo combustível injetada em cada motor e a temperatura dos gases de exaustão (após a passagem pelo turbocompressor) são valores médios, calculados com base nos valores registrados para cada motor.

Tabela 2. Dados de entrada, relativos ao motor Diesel da planta termoeletrônica, para o modelo da gaseificação da biomassa e do sistema de recuperação de calor.

Motor Wärtsilä, do tipo W20V46F	
Parâmetros	
Taxa de potência útil média por motor	22342[kW]
Vazão mássica de OCB1	1,24028[kg/s]
Vazão dos gases de combustão	39,9 [kg/s]
Temperatura dos gases de exaustão (após o turbocompressor)	362,5 [°C]

A temperatura dos gases de exaustão apresentada na Tab. 2 será utilizada para os cálculos relativos à recuperação da energia disponível nos gases de combustão provenientes dos onze motores que não estão acoplados às caldeiras de recuperação. Os gases provenientes dos outros seis motores apresentam uma menor temperatura, uma vez que uma parcela da energia disponível nesses gases é utilizada para a produção de vapor nas caldeiras. A temperatura dos gases de exaustão desses motores após a sua utilização nas caldeiras de recuperação é igual a 246 °C, valor que será considerado para os cálculos. As temperaturas de saída do vapor de água nos trocadores de calor um e dois foram assumidas com base nas temperaturas de entrada dos fluidos quentes usados nos respectivos trocadores, sendo apresentadas na Tab. 3. A temperatura da biomassa na saída do terceiro trocador de calor é estimada pelo modelo, com base na temperatura de entrada do fluido quente nesse trocador. É considerado que a água e a biomassa entram respectivamente nos trocadores de calor um e três à temperatura ambiente ($T_e=298,2K$).

Tabela 3. Temperaturas assumidas para o vapor de água na saída dos trocadores de calor um e dois.

Temperaturas de saída assumidas para vapor de água	
Vapor de água (Trocador de Calor 1)	245 [°C]
Vapor de água (Trocador de Calor 2)	360 [°C]

Primeiramente foi analisado como variações na temperatura de gaseificação e na fração de vapor de água injetada no processo afetariam o potencial energético do gás de síntese produzido a partir da gaseificação da Jurema Preta. Essa análise permite decidir qual será a melhor razão V/B e a melhor temperatura de gaseificação a serem assumidas, em termos do potencial energético do gás de síntese produzido, levando em conta também a energia que precisa ser despendida para a sua produção. Essas análises iniciais são conduzidas considerando-se uma vazão mássica de biomassa injetada no processo igual a 1000 g/s.

Para as análises relativas ao efeito de variações na razão V/B sobre a qualidade energética do gás sintetizado, a temperatura de gaseificação é fixada em 800 °C (temperatura comumente empregada em processos de gaseificação).

Tais análises foram feitas para cinco valores da razão V/B (0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25). A Fig. 2a apresenta um gráfico do PCI do gás de síntese produzido, em função da razão entre as quantidades de vapor de água e de biomassa empregadas no processo (em valores percentuais). Os resultados mostram que a participação do vapor de água no processo de gaseificação influencia diretamente a qualidade energética do gás de síntese produzido. É possível observar que o PCI do gás obtido diminui à medida que a quantidade de vapor de água injetada no processo é aumentada, uma vez que uma maior quantidade de vapor de água estará presente no gás final, diminuindo assim o seu potencial como combustível. Dos resultados, um valor de V/B igual a 0,25 proporciona assim a obtenção de um gás com maior qualidade energética, além do fato de que uma maior quantidade de vapor de água demandará um maior fornecimento de energia térmica para o seu aquecimento.

Fixando-se agora a quantidade de vapor de água injetada no processo como sendo igual a 25% da quantidade de biomassa utilizada (razão V/B igual a 0,25), uma segunda análise foi conduzida, variando-se a temperatura de gaseificação entre 500 e 1400°C, a intervalos de 100°C. A vazão mássica de biomassa foi novamente fixada em 1000 g/s. A Fig. 2b mostra a variação do poder calorífico inferior do gás de síntese em função da temperatura de gaseificação. É possível observar um aumento gradual no PCI do gás à medida que a temperatura é aumentada até a temperatura de aproximadamente 1000°C, ponto a partir do qual o PCI praticamente se estabiliza em torno de 16000 kJ/kg.

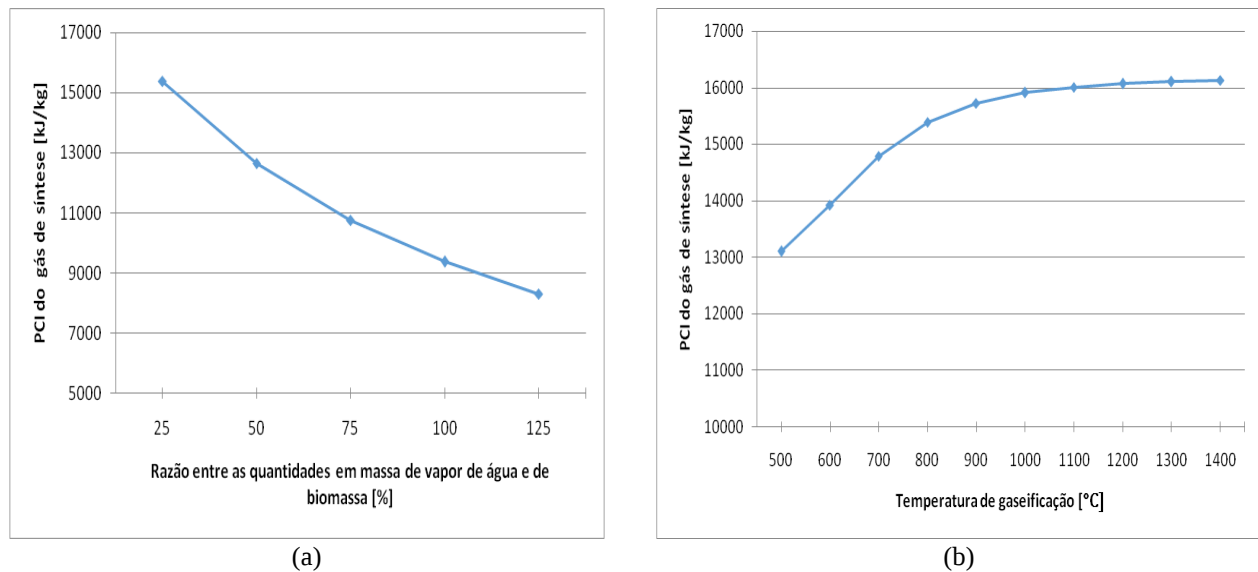


Figura 2. Poder calorífico inferior do gás de síntese produzido: (a) em função da razão (V/B), para uma temperatura de gaseificação de 800 °C; (b) em função da temperatura de gaseificação, para (V/B) igual a 0,25.

Considerando que maiores temperaturas de gaseificação correspondem a um maior fornecimento de energia térmica para o aquecimento dos insumos, e observando a estabilização do potencial energético do gás de síntese produzido, concluiu-se que uma temperatura de gaseificação de 1000°C corresponde a uma boa alternativa para o processo de gaseificação aqui em análise.

Assim, o processo de gaseificação será considerado como ocorrendo a uma temperatura de 1000 °C, e com uma fração injetada de vapor de água em massa igual a 25% da quantidade de biomassa empregada. Fixando esses valores, é possível avaliar o efeito do aumento da produção de gás de síntese sobre a eficiência da planta termoeletrica. A Tab.4 a seguir apresenta o PCI do gás de síntese produzido nessas condições, bem como os percentuais molares dos gases que o compõem.

Tabela 4. Percentuais molares e poder calorífico inferior do gás de síntese, para uma fração injetada de vapor de água de 25% e uma temperatura de gaseificação de 1000°C.

Percentuais molares [%]					PCI _{GS} [kJ/kg]
CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	
1,60	49,03	37,05	3,86	8,46	15911

Por razões técnicas (formação de ácido sulfúrico), a temperatura mínima que pode ser atingida pelos gases de exaustão dos motores após a sua utilização no sistema de recuperação de calor é igual a aproximadamente 140°C. Isso corresponde a um limite para a produção de gás de síntese, uma vez que existe uma vazão mássica de biomassa (e de agente oxidante) máxima que pode ser aquecida para essas condições. O modelo de gaseificação mostra que, para uma vazão mássica de biomassa de 37 kg/s, a temperatura dos gases de exaustão na saída de um dos trocadores de calor

atinge o valor mínimo de 140,4°C. Essa situação corresponde a uma vazão mássica de gás de síntese produzida de aproximadamente 45,86 kg/s.

A Fig. 3 apresenta um gráfico da eficiência global da planta termoelétrica em função da vazão mássica de biomassa injetada no processo de gaseificação considerando a situação na qual todo o gás de síntese é produzido e disponibilizado para uso externo à planta (fração de gás de síntese utilizada como combustível dos motores é igual a zero). Considerando a restrição da temperatura mínima que pode ser atingida pelos gases quentes provenientes dos motores, a vazão de biomassa foi variada de 0 a 37 kg/s. Pode-se observar que, para essa situação, a eficiência global da planta atinge um valor máximo de aproximadamente 63% (quando a vazão mássica de biomassa injetada atinge o valor máximo de 37 kg/s), resultado quase vinte por cento maior que a eficiência original da planta termoelétrica, antes da instalação do gaseificador e do sistema de recuperação de calor.

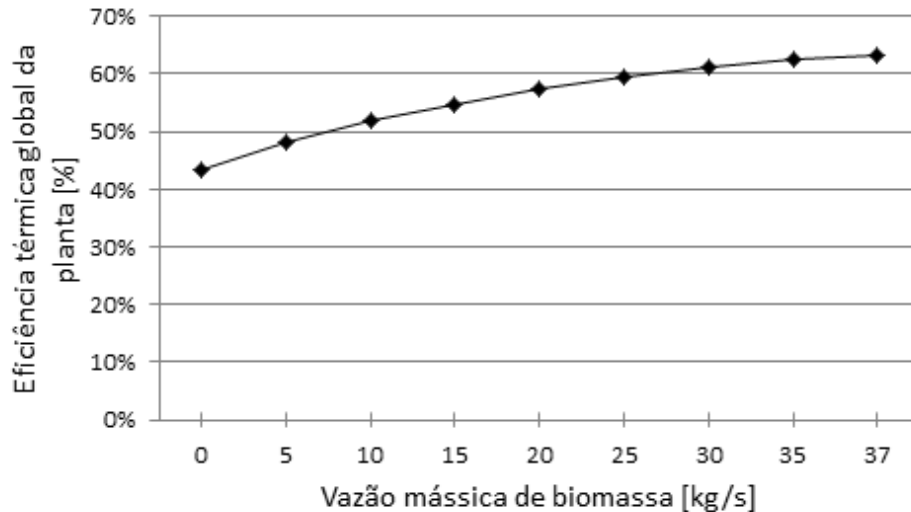


Figura 3. Eficiência da planta termoelétrica, em função da vazão mássica de biomassa injetada no gaseificador, para a situação na qual todo o gás de síntese é disponibilizado para uso externo à planta.

Avaliando agora a situação na qual uma fração do gás de síntese produzido no gaseificador será injetada em cada um dos motores Diesel da planta termoelétrica para suprir uma parcela do fluxo de energia fornecido para esses motores, deve-se determinar qual seria a eficiência global da planta para essas condições. Para essa análise é assumido que a substituição parcial do OCB1 pelo *syngas* não influencia o funcionamento dos motores da planta, e que os parâmetros de saída desses motores (temperatura, pressão, potência de saída) se comportam da mesma forma quando o motor é alimentado apenas pelo óleo combustível e pela combinação entre o *syngas* e o OCB1. Considerando a produção máxima de gás de síntese, o modelo determinou que até 83,6% da energia fornecida na forma de combustíveis para a planta como um todo pode ser suprida pelo fluxo de gás de síntese produzido.

A Fig. 4 apresenta um gráfico da eficiência da planta termoelétrica, em função da fração de gás de síntese empregada como combustível nos dezessete motores da planta, partindo da situação de máxima produção de *syngas*. Essa eficiência foi determinada utilizando-se a Eq. (9). Pela figura pode-se observar que um aumento na participação do gás de síntese como combustível dos motores acarreta em uma diminuição na eficiência da planta. Assim, para essas condições, a eficiência da planta torna-se igual à eficiência da planta original (indicada pela linha horizontal no gráfico) para uma fração de gás de síntese de aproximadamente 70%, se tornando inclusive inferior ao valor original para frações de *syngas* superiores, como pode ser observado no gráfico. Assim, para frações de gás de síntese superiores a 70% a instalação do gaseificador deixa de ser vantajosa sob o ponto de vista energético, uma vez que a energia gasta para produzir o gás de síntese é superior à energia que é reaproveitada na forma de gás de síntese pelos motores da planta termoelétrica.

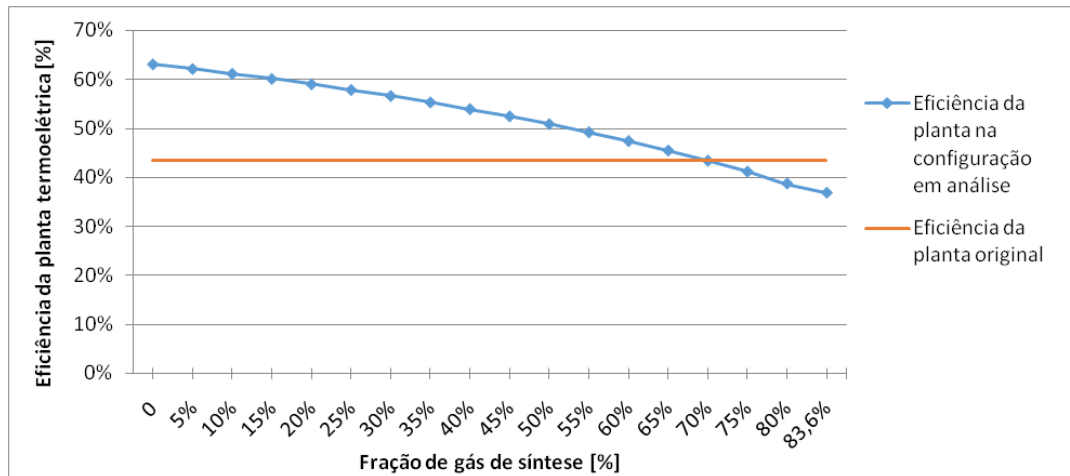


Figura 4. Eficiência global da planta termoeletrica, em função da fração de gás de síntese empregada como combustível em cada motor da planta.

Assim, a partir das análises anteriores, pode-se concluir que é vantajoso, levando em conta a eficiência térmica da planta termoeletrica, produzir o gás de síntese para que este seja utilizado fora da planta (comercializá-lo, por exemplo), devendo-se avaliar muito bem como deve ser feito o seu uso como combustível complementar dos motores.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o efeito térmico da incorporação de um gaseificador em uma planta termoeletrica com o intuito de utilizar uma parcela dos gases de exaustão dos motores da planta para auxiliar a produção de um gás combustível, derivado da biomassa vegetal Jurema Preta. A partir das análises realizadas foi concluído que uma temperatura de gaseificação de 1000°C e uma quantidade em massa de vapor de água igual a 25% da quantidade em massa de biomassa empregada proporcionam a produção de um gás de síntese com bom potencial energético, sem que seja necessário, para a sua produção, o gasto de uma grande quantidade de energia além da reaproveitada através dos trocadores de calor instalados.

Foi observado também que a instalação do gaseificador e do sistema de recuperação de calor pode proporcionar um aumento de quase vinte por cento na eficiência global da planta termoeletrica, quando o gás de síntese produzido é totalmente disponibilizado para uso externo à planta.

Considerando a situação na qual a vazão mássica de gás de síntese produzida é utilizada para suprir uma parcela da energia que deve ser fornecida aos motores da planta, foi observado que a vazão máxima de gás de síntese produzida pode suprir até 83,6% da energia necessária, considerando todos os dezessete motores da planta. Também foi observado que a eficiência térmica global da planta tende a diminuir, à medida que se aumenta a participação do *syngas* simulado como combustível dos motores. A partir dessas análises, foi concluído que a instalação do gaseificador é mais vantajosa, sob o ponto de vista energético, quando o gás de síntese produzido for disponibilizado para a venda ou para alguma outra aplicação externa à planta. Vale frisar que essa análise não levou em conta os efeitos da substituição de combustível sobre o desempenho dos motores.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Energética Suape II S/A. pelas informações técnicas disponibilizadas através do projeto de pesquisa e desenvolvimento que é realizado via cooperação técnica entre a Energética Suape II S/A e a UFPE, Contrato nº 23/2016-UFPE, Processo nº 23076.007123/2016-69.

6. REFERÊNCIAS

- Henríquez, J.R., Silva, J.A., Figueiredo, R.A., Figueiredo, Jacek S. Michalewicz, J.S., Rômulo S. C. Menezes, R.S.C., Simulação numérica do processo de gaseificação aplicada a fontes de biomassa da região nordeste do Brasil, Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Lisboa, Portugal, 2015.
- Hoffman, B. S. O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termoeletricas a carvão em larga escala no curto prazo? Mar. 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Liang, Y., Shu, G., Tian, H., Wei, H., Liang, X., Liu, L., Wang, X. *Theoretical Analysis of a novel electricity-cooling cogeneration system (ECCS) based on cascade use of waste heat of marine engine. Energy Conversion and Management*, vol. 85, p. 888-894, Fev. 2014.
- Lora, E. E.; Gomez, E. O.; Cortez, L. A. B. Biomassa para energia. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. 733 p.

- Martínez, J. D., Mahkamov, K., Andrade, R. V., Lora, E. E. S., *Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines*. *Renewable Energy*, vol. 38, p. 1-9, Fev. 2012.
- Morawski, A. P. Avaliação da Repotenciação de uma Termoelétrica Equipada com Motores de Combustão Interna Diesel por Meio da Recuperação de Calor Residual. Fev. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo.
- Oliveira, G. C. Análise térmica e econômica do ciclo combinado integrado com gaseificação da casca de arroz. 2014. 75 f. Projeto de graduação em Engenharia Mecânica - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Rinaldini, C. A., Allesina, G., Pedrazzi, S., Mattarelli, E., Savioli, T., Morselli, N., Puglia, M., Tartarini, P., *Experimental Investigation on a Common Rail Diesel engine partially fuelled by syngas*. *Energy Conversion and Management*, vol. 138, p. 526-537, 15 Abr. 2017.
- Silva, J. A. Análise paramétrica da transformação termoquímica de biomassa via processo de gaseificação: uma abordagem numérica. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Song, Y.; Song, J.; Gu, C. *Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines*. *Energy*, vol. 82, p. 976-985, Fev. 2015.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

USE OF A GASIFIER TO PARTIALLY REUSE THE REJECTED ENERGY OF THE DIESEL ENGINES OF A THERMOELECTRIC PLANT

Matheus B. A. Barros, matheus.alencar@ufpe.br¹
Jarmison A. Silva, jarmisonaraujo@yahoo.com.br¹
Thiago L.C.C. Novaes, thiago.novaes@ifba.edu.br²
Daniel Rodríguez, danivd1188@gmail.com¹
Jorge R. Henríquez, rjorge@ufpe.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, PE, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Departamento de Ensino - Rua Jean Torres, s/n - Bairro John Kennedy - Loteamento Cidade Nova, CEP - 45.201-570 – Jequié- BA – Brasil.

Abstract. *The environmental restrictions and the necessity of a more efficient use of fossil fuels increase the importance of the reuse of thermal wastes and the utilization of the so-called alternative energy sources. In this context, the present work analyses the energy potential of reuse a fraction of the energy available on the exhaust gases from the Diesel engines of a thermoelectric plant to assist in the production of a combustible gas, through the gasification of a biomass. The study was conducted from a numerical model, developed in the platform of the software EES (Engineering Equation Solver). This model includes the gasification process and the heat recovery system, based on actual data from a thermoelectric plant installed in Suape, Pernambuco. In the work, were first analyzed which are the gasification conditions that enables the production of a gas with high energy potential, aiming to increase the global thermal efficiency of the plant through the integration of the gasifier. Among the main results obtained, it was shown that the integration of the gasifier can increase the global efficiency of the thermoelectric plant in almost twenty per cent in relation to the original efficiency of the central.*

Keywords: Biomass, Gasification, Diesel engine, Thermal efficiency, Numerical model