O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratizacão mundial do conhecimento.



BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano V | Volume 14 | Nº 41 | Boa Vista | 2023

http://www.ioles.com.br/boca

ISSN: 2675-1488

https://doi.org/10.5281/zenodo.7953719

BOLETIM DE CONJUNTURA

www.ioles.com.br/boca

RECUPERAÇÃO DE ENERGIA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL

Bibiana Porto da Silva[1]

Ana Cristina Ruoso[2]

Nattan Roberto Caetano[3]

Andressa Germann Avila[4]

Resumo

Esta pesquisa investigou o uso do processo de recirculação dos gases de exaustão (EGR) para recuperar parte da energia térmica e química deixada no fluxo de exaustão da caldeira. Foi realizada uma análise teórica da conversão e utilização de energia a partir de uma caldeira de pequeno porte, na qual foram realizadas diversas medições e análises dos relatórios de operação, que forneceram as condições de contorno e informações relevantes para a modelagem dos processos. A metodologia considerou a radiação dos gases de exaustão, balanços termodinâmicos e cálculos de engenharia econômica para a análise de recuperação de energia. Os resultados financeiros indicam que a implementação do processo de recirculação dos gases de escape, referente a 20% da relação EGR, apresentou 69% e 1,45 anos de taxa interna de retorno e payback, respectivamente. No entanto, o processo regenerativo apresentou taxa interna de retorno e valores de payback de 112% e 0,9 anos. De fato, ambos os processos podem ser aplicados, a fim de aumentar a eficiência e reduzir as emissões. Dessa forma, a implementação do processo de recirculação dos gases de exaustão pode contribuir para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na indústria, ao mesmo tempo em que promove a redução dos custos operacionais e melhora a eficiência da caldeira.

Palavras Chave: Caldeira de Lenha; Recuperação de Energia; Regeneração de Calor.

Abstract

This research investigated the use of exhaust gas recirculation (EGR) process to recover part of the thermal and chemical energy left in the exhaust boiler stream. A theoretical analysis of energy conversion and use was performed based on a small boiler, in which were performed several measurements and analysis of the operation reports, which provided the boundary conditions and relevant information for modelling the processes. The methodology considered the radiation from exhaust gases, thermodynamics balances, and economic engineering calculations for the energy recovery analysis. Financial results indicate that the exhaust gas recirculation process implementation, regarding 20% of EGR ratio, presented 69% and 1.45 years of internal returning rate and payback, respectively. However, the regenerative process presented internal returning rate and payback values of 112% and 0.9 years. Indeed, both process might be applied, in order to increase the efficiency and reduce the emissions. In this way, the implementation of the exhaust gas recirculation process can contribute to the development of more economical practices in the industry, while promoting the reduction of operating costs and improving boiler efficiency.

Keywords: Energy Recovery; Firewood Boiler; Heat Regeneration.

INTRODUÇÃO

A biomassa tem sido amplamente utilizada como fonte de energia ao longo dos séculos. No entanto, a crescente demanda por energia renovável e a preocupação com as mudanças climáticas globais têm impulsionado o aumento do uso da biomassa, acompanhado de um controle adequado das emissões atmosféricas (ARAHUETES; OLCINA CANTOS, 2019; HAMID ELSHEIKH *et al.*, 2014;

[1] Graduada em Engenharia de Alimentos. Doutoranda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: bibiana.porto@ufrgs.br

[2] Graduada, mestre e doutoranda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: bibiana.porto@ufrgs.br

[3] Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Doutor em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). E-mail: nattancaetano@gmail.com

[4] Graduada em Ciências Contábeis. Mestranda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). E-mail: andressa.germann@acad.ufsm.br

PATRONELLI *et al.*, 2018). No Brasil, as condições climáticas, geográficas e tecnológicas favoráveis, juntamente com o uso de silvicultura plantada, resultam em altos níveis produtivos de biomassa (WHITEMAN; WICKRAMASINGHE; PIÑA, 2015).

A lenha é amplamente utilizada em aplicações industriais e possui vantagens, como programas de reflorestamento bem estruturados e a reposição contínua das reservas (SILVA *et al.*, 2017; SAIDUR *et al.*, 2011). Do ponto de vista industrial, a madeira destinada a fins energéticos é competitiva em relação a outras fontes, devido à sua natureza renovável e à capacidade de sequestro de dióxido de carbono pelas florestas (BARAL, 2004; DEMESTICHAS *et al.*, 2020; YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008). A madeira é um dos produtos mais ativos do agronegócio brasileiro. O país possui 9,5 milhões de hectares de florestas plantadas e é atualmente o maior exportador de celulose de eucalipto do mundo (PEVS, 2021). Utilizada como matéria-prima para diferentes fins, a produção de madeira movimenta a agricultura brasileira, o que resultou no faturamento de US$ 101 bilhões em 2020 (CEPEA, 2021). Além disso, o setor florestal no estado do Mato Grosso do Sul, por exemplo, mantém 4.046 vagas de emprego de empregos.

Nesse contexto, a disponibilidade de energia obtida por meio da combustão da lenha é de fundamental importância para a matriz energética e econômica do país (ASIKAINEN *et al.*, 2008; THAPA; BORQUIST; WEISS, 2018). Assim, o processo de recirculação dos gases de exaustão (EGR) pode ser considerado uma opção para o uso de energia, redução das emissões de poluentes e otimização do sistema (CHUI; GAO, 2010; SANTIS *et al.*, 2016; GÓMEZ *et al.*, 2016).

Este trabalho consiste numa análise da viabilidade financeira do processo de utilização da energia da Recirculação dos Gases de Escape (EGR) aplicado em uma caldeira a lenha de pequeno porte. Além disso, uma análise semelhante foi realizada considerando o processo regenerativo aplicado à caldeira. Para embasar nossa análise, utilizamos medições e informações operacionais obtidas durante a operação da caldeira, fornecendo as condições de contorno, informações de dimensionamento, quantidade de energia e custos envolvidos no processo. Também estimamos as incertezas dos resultados.

Conduzimos uma análise teórica com base nos parâmetros de viabilidade econômica. Utilizamos resultados termodinâmicos obtidos por meio de conceitos e métodos de aplicação do uso de energia, utilizando modelos matemáticos para obter resultados teóricos da implementação dos processos de Recirculação dos Gases de Escape e Energia Regenerativa. Os dados necessários para alimentar esses modelos foram obtidos diretamente em uma pequena caldeira, fornecidos pelo setor de operação, obtidos em laudos e na literatura.

A estrutura deste artigo está organizada em seis seções, conforme apresentado a seguir. Na primeira seção consta a introdução, que tem como finalidade apresentar o tema, a justificativa da pesquisa, o objetivo, os procedimentos metodológicos de levantamento e análise de dados, e, estrutura do texto. A segunda seção aborda o contexto sobre fontes de energia sustentáveis. Já a terceira seção trata sobre a recirculação dos gases de exaustão (EGR). A quarta seção apresenta os procedimentos metodológicos. Na seção 5 são relatados os resultados e discussões. Após, traz-se a conclusão, além das referências bibliográficas.

FONTES DE ENERGIA SUSTENTÁVEIS

Em uma análise global, a fonte de energia ideal para uma sociedade em desenvolvimento deve proporcionar baixos custos de produção e vendas, baixo risco de apagões ou falhas no fornecimento (KLUNK; DASGUPTA; DAS, 2017, 2018; ZHANG *et al.*, 2015). No entanto, diferentes fontes de energia renovável apresentam desafios e impactos ambientais a serem considerados.

As usinas hidrelétricas, por exemplo, emitem gás metano que é cerca de 20 vezes mais prejudicial do que o CO_2 (SANTOS *et al.*, 2017; FEARNSIDE; PUEYO, 2012; FRAGA *et al.*, 2014; KLUNK *et al.*, 2012). Os sistemas de energia solar são caros devido à complexidade dos painéis fotovoltaicos com baixa eficiência relativa de armazenamento. Além disso, a energia elétrica gerada por essas fontes depende da sazonalidade (ZAHEDI, 2011). A energia eólica pode afetar a fauna e a flora locais (DIAMOND-SMITH; SMITH; HODOGLUGIL, 2011; SCHUCK, 2006; SIVARAMAN, 2014). Adicionalmente, o uso de energia eólica em larga escala pode gerar impactos na segurança e estabilidade operacional do sistema elétrico e, consequentemente, aumentar os custos de produção (SAGANI; HAGIDIMITRIOU; DEDOUSSIS, 2019a).

A segurança energética requer um enfoque multidimensional que envolve diversificação da matriz energética, promoção de fontes renováveis, eficiência energética e cooperação internacional (MASON-JONES; DAVIES; THOMAS, 2022). A adoção de medidas nesses aspectos contribuirá para um futuro energético mais seguro, sustentável e resiliente (DENG *et al.*, 2021). Quando se trata de sustentabilidade, é importante considerar não apenas o custo e a eficiência da fonte de energia, mas também os impactos ambientais associados à sua produção e uso (KANG, 2020). De fato que muitas fontes de energia renovável têm desafios a superar em termos de viabilidade econômica e operacional, bem como impactos ambientais a serem considerados e superados (TOBOSO-CHAVERO *et al.*, 2021).

Uma matriz energética confiável e diversificada é necessária para o desenvolvimento e o crescimento econômico (TANG; PENG; XU, 2018). Nesse contexto, a lenha se destaca como uma

opção devido ao seu baixo custo de exploração em comparação com outras fontes (PIEROBON *et al.*, 2015; SPINELLI; WARD; OWENDE, 2009). Além disso, no Brasil, o setor florestal é responsável pela manutenção de 4,4 milhões de empregos (KLUNK; DASGUPTA; DAS, 2017).

Portanto, a disponibilidade de energia devido à combustão da lenha é de fundamental importância para a matriz energética (GUERRA *et al.*, 2014; THAPA; BORQUIST; WEISS, 2018). Alguns estudos mencionaram a utilização de lenha na geração de energia. Podemos estacar o trabalho de Sagani, Hagidimitriou e Dedoussis (2019b) que comprovou a viabilidade econômica do uso de resíduos florestais para gerar energia. Já o estudo realizado por Díez, Gómez e Pérez (2018) demostrou que a densidade aparente, dureza e área superficial da biomassa afetam a velocidade da chama, a relação celulose/lignina influencia positivamente o rendimento, aumentando a eficiência do processo de geração de energia (DÍEZ; GÓMEZ; PÉREZ, 2018).

Outros estudos evidenciaram os efeitos ambientais positivos da utilização da lenha. Por exemplo, o estudo conduzido por Ahmadi, Kannangara e Bensebaa (2020) que comparou a geração de energia a partir de resíduos florestais com a geração de energia diesel, demonstrando uma redução nas emissões e um desempenho favorável em termos de compensação de carbono em todos os cenários analisados. Além disso, o artigo de Adams e Mcmanus (2014) avaliou a energia líquida produzida e os impactos ambientais de uma usina combinada de calor e energia que utiliza resíduos florestais, constatando que o uso desses resíduos resulta em baixas emissões de gases de efeito estufa em comparação aos combustíveis fósseis, além de oferecer ganhos de energia e um rápido período de retorno energético. Por sua vez, Okoko *et al*. (2017) avaliaram a pegada de carbono da lenha, carvão e briquetes como alternativas de geração de energia. Os resultados indicaram que a utilização do carvão vegetal em vez da lenha pode resultar em maior degradação ambiental, uma vez que a pegada de carbono do carvão vegetal é maior do que a da lenha (OKOKO *et al.*, 2017).

A pegada de carbono não é especificamente mencionada como um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, mas está diretamente relacionada a algumas metas e objetivos dentro da agenda. Como, por exemplo, ODS 7 (Energia limpa e acessível), o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura sustentáveis) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) (MALAGÓ *et al.*, 2021). Esses objetivos buscam promover o uso sustentável da energia, a adoção de tecnologias limpas, a melhoria da eficiência energética, a promoção da produção e do consumo sustentáveis (LIU; NGUYEN, 2020). Sendo relacionados aos esforços globais para alcançar a sustentabilidade e o combate às mudanças climáticas, objetivos centrais da Agenda 2030 (DJEKIC *et al.*, 2021).

RECIRCULAÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO (EGR)

A recirculação dos gases de exaustão conhecida como o termo em inglês *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) é uma abordagem excelente para reduzir as emissões de NO_x (AGRAWAL *et al.*, 2004). Portanto, a recirculação dos gases de escape pode ser considerada uma opção promissora para melhorar a eficiência termodinâmica, reduzir as emissões de poluentes e otimizar o sistema, contribuindo para a estabilidade da matriz energética (ALCARÁZ-CALDERON *et al.*, 2019; ALI *et al.*, 2014; SANTIS *et al.*, 2016; LI; DITARANTO; BERSTAD, 2011).

Embora a maioria dos esforços de recirculação de gases de escape são destinados a motores a diesel (AGRAWAL *et al.*, 2004) e mudança nas proporções de combustíveis (JIMÉNEZ-ESPADAFOR *et al.*, 2012; SINGH; SINGH; AGARWAL, 2014). Assim, existem trabalhos considerando EGR em caldeiras operando com combustíveis gasosos como gás natural e petróleo liquefeito, ou combustíveis líquidos como querosene e óleos, ou combustíveis sólidos como carvão e biomassa (ALCARÁZ-CALDERON *et al.*, 2019; ALI *et al.*, 2017; GÓMEZ *et al.*, 2019; LI; DITARANTO; BERSTAD, 2011; YU *et al.*, 2013). No entanto, é importante observar que os estudos que utilizam biomassa como combustível geralmente se concentram apenas nas reduções de emissões obtidas por meio da implementação do EGR (GÓMEZ *et al.*, 2019; HENRIQUES, 2018; SHINOMORI *et al.*, 2011).

Gómez *et al*. (2019) conduziram um estudo teórico sobre a influência da relação entre EGR e excesso de oxigênio em uma caldeira de biomassa. Henriques (2018), também avaliou o efeito de EGR e métodos de preparação de ar aplicados em uma pequena caldeira, que usa pellets de madeira como combustível. Nos resultados foi observado um aumento da transferência de calor quando a razão EGR aumenta e o excesso de oxigênio é baixo. Portanto, o EGR pode ser positivo para o desempenho térmico e as emissões de contaminantes em valores moderadamente baixos do excesso de oxigênio. Os resultados desses estudos mostraram que a aplicação de EGR aumentou o desempenho térmico da caldeira e reduziu as emissões de NO_x. Além disso, o método de estadiamento aéreo aplicado, que é semelhante ao EGR. Henriques (2018) comprovar eficácia na redução das emissões de material particulado. No entanto, as emissões de CO aumentaram, o que pode indicar um efeito adverso na eficiência da combustão.

É importante ressaltar que uma baixa concentração de oxigênio reduz as taxas de reação e a temperatura da chama, aumentando os níveis de hidrocarbonetos não queimados e CO (CARAPELLUCCI; GIORDANO; VACCARELLI, 2016; DITARANTO; HALS; BJORGE, 2009; ELKADY *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2011; LI.; DITARANTO; BERSTAD, 2011). Por outro lado, a baixa concentração de oxigênio promove a formação de NOx, uma vez que a dependência da concentração de

oxigênio e da temperatura da chama são reduzidas com o aumento da razão EGR. Portanto, 40% é a proporção EGR sugerida (ALI *et al.*, 2016; HU *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2011; LI; DITARANTO; BERSTAD, 2011; LINDQVIST *et al.*, 2014).

No estudo realizado por ElKady *et al*. (2009), foi observada uma redução de mais de 50% nas emissões de NOx com uma razão EGR de 35%. Além disso, o EGR é capaz de alterar a fração molar de CO_2 (LI *et al.*, 2011; LI; DITARANTO; BERSTAD, 2011). Em relação à eficiência energética, o sistema integrado com EGR apresenta o melhor desempenho em relação aos outros métodos (CARAPELLUCCI; GIORDANO; VACCARELLI, 2016; RØKKE, 2006).

Shinomori *et al*. (2011) investigaram experimentalmente as emissões em pequenas caldeiras, utilizando um queimador do tipo auto-recirculação. Uma enorme instalação de configuração foi empregada para medir o campo de fluxo com um sistema PIV (velocimetria de imagem de partícula) e distribuições espaciais de NO_x, temperatura, O_2 e CO, que foram determinadas usando quimioluminescência, termopar, análise do tipo de pressão magnética e infravermelho não dispersivo análise, respectivamente. No entanto, a análise energética e financeira não foi explorada.

Rokke (2006) sugere que uma taxa de EGR de 50% reduz o custo de capital em 21%. Além disso, trabalhos considerando gás natural na mesma proporção encontraram aumento de 0,4% na eficiência (LI *et al.*, 2011; ROKKE, 2006). Assim, o EGR melhora a eficiência no ciclo, o que reduz ainda mais o custo de capital, o custo da energia elétrica e o custo de evitação de CO_2 no curto, médio e longo prazo (PEETERS; FAAIJ; TURKENBURG, 2007).

O processo de regeneração pode ser empregado para pré-aquecer a água que sai da bomba, a chamada água de alimentação, antes de entrar na caldeira. O próprio vapor da turbina extraído em alta temperatura é usado para aquecer a água de alimentação em um trocador de calor chamado regenerador ou aquecedor elétrico de água (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2000; SMITH; SANCHEZ, 2003). O uso da regeneração de água condensada é uma variação importante do ciclo Rankine, sendo um processo consolidado e amplamente utilizado em caldeiras (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2000; SMITH; SANCHEZ, 2003).

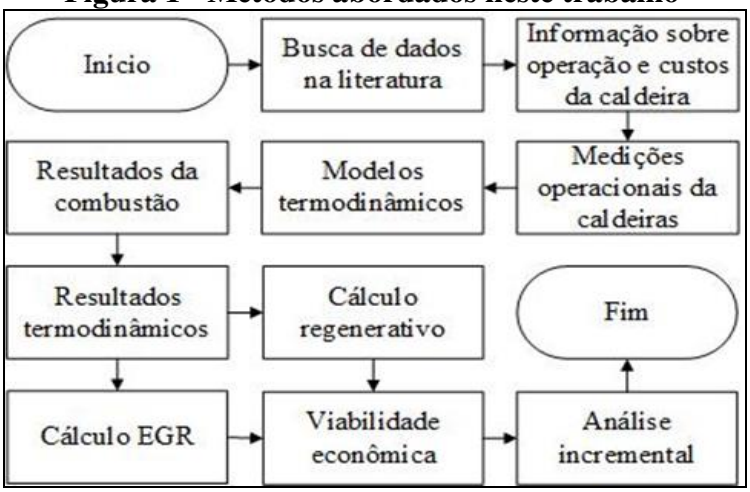
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento deste trabalho é brevemente descrito no diagrama de fluxo apresentado na Figura 1, disposta na página seguinte.

A caldeira considerada nesta obra está localizada na 6ª Brigada de Infantaria Blindada da cidade de Santa Maria, RS, Brasil, instalada na guarnição no ano de 2017. Esta caldeira é classificada como

mista, tubo de fogo e tubo de água, que possui uma capacidade variando em torno de 100 kW. Basicamente, as caldeiras mistas são caldeiras de tubo de fogo com antecâmara de combustão com paredes revestidas de dutos de água. Na antecâmara ocorre a combustão de sólidos por meio de grades de diversos tipos. O volume da câmara foi projetado para permitir a adição de combustíveis sólidos, como madeira em toras, briquetes, pellets, cavacos, etc. As paredes frontal e posterior não são forradas com tubos, devido à dificuldade construtiva do pequeno tamanho da caldeira. Também apresentam a possibilidade de queima de combustível líquido ou gasoso, quanto à instalação de queimadores adequados (TREVELIM, 2013).

Figura 1 - Métodos abordados neste trabalho



Fonte: Elaboração própria.

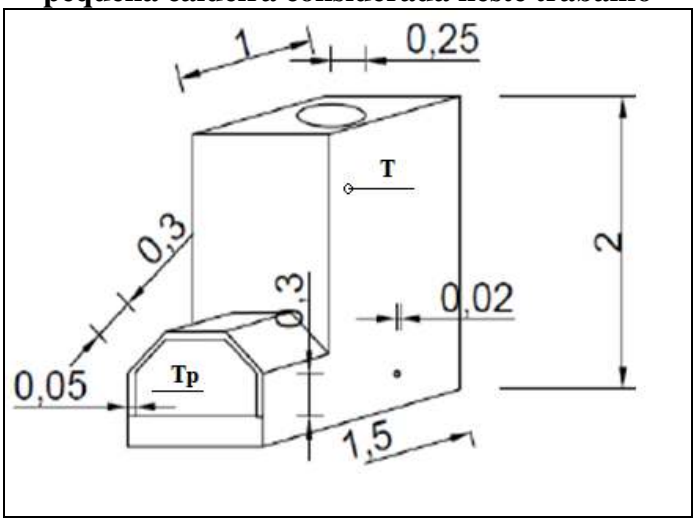
Caldeiras de tubo de água são uma solução prática e eficiente quando combustíveis sólidos de baixo custo estão disponíveis (JUNGA; CHUDY; POSPOLITA, 2017). Porém, a eficiência térmica dessas caldeiras é menor que a do tubo de fogo, devido à perda de calor na antecâmara (TREVELIM, 2013).

A geometria e as dimensões da caldeira são apresentadas na Figura 2. Um termopar foi empregado para medir a temperatura dos gases de exaustão, na chaminé. Além disso, um termômetro infravermelho foi usado para medir a temperatura da parede interna da câmara de combustão pela média de vários pontos internos.

A saída dos gases de escape ocorre no topo da caldeira e o tubo tem raio de 0,25 m, a entrada de água é mostrada no lado direito da caldeira e o tubo tem raio de 0,02 m. O fluxo de funcionamento na caldeira começa quando o sensor aciona o nível baixo de água, ligando a bomba. Assim, a água entra na caldeira em temperatura ambiente, em torno de 293 K, e entra em contato com o calor da combustão

aumentando sua temperatura até a mudança de fase. A água condensada retorna para o tanque, reiniciando o ciclo.

Figura 2- Diagrama esquemático da pequena caldeira considerada neste trabalho



Fonte: Elaboração própria.

O combustível utilizado foi a lenha (eucalipto), que consumiu em média 0,5 m³ por dia de operação. A entrada de massa do fluxo de combustível era controlada pelo operador, que inseria uma tora de madeira na câmara de combustão da caldeira para manter a pressão do fluido de trabalho em um valor constante, em torno de 50 kPa.

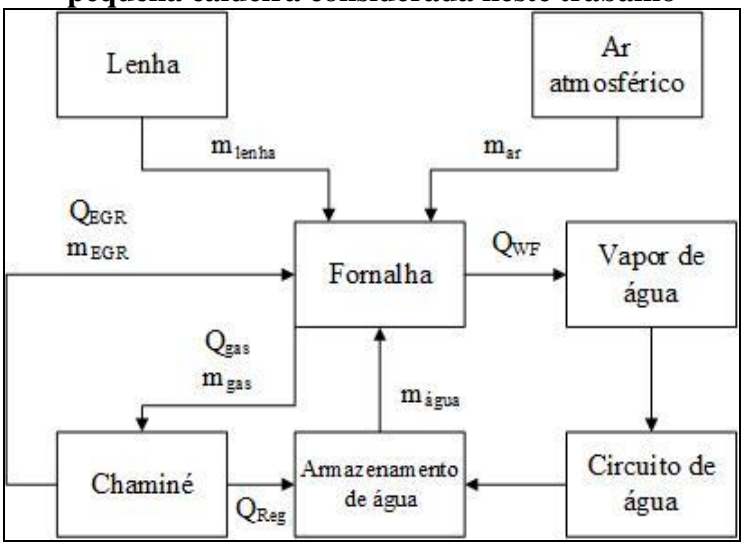
Termodinâmica

Nesta seção são apresentados o cálculo da reação de combustão, análise econômica dos casos propostos, análise e quantificação das incertezas das medições.

Os parâmetros básicos para o cálculo das radiações dos gases foram retirados das medidas aplicadas na caldeira, que produziram os resultados de calor retornados no processo EGR.

Os parâmetros físico-químicos de biomassa, poder calorífico e, emissão de CO e hidrocarbonetos não queimados foram obtidos por meio da queima de amostras de lenha no laboratório de engenharia florestal da Universidade Federal de Santa Maria. Um analisador de gás Chemist 500x foi aplicado para realizar essas medições (SEITRON, 2015). Figura 3 mostra o diagrama do balanço de energia da caldeira utilizado neste trabalho para fornecer as condições de contorno e dimensionamento.

Figura 3 - Diagrama esquemático da pequena caldeira considerada neste trabalho



Fonte: Elaboração própria.

Esses resultados foram obtidos visando gerar dados para alimentar os cálculos do balanço energético. Os valores obtidos na caracterização da lenha utilizada neste estudo são apresentados em Tabela 1, que mostra a composição química da madeira (base seca), seguida da incerteza nas medições.

Tabela 1 - Fatores parâmetros físico-químicos da biomassa usados neste trabalho

Parâmetro	Unidade	Valor
Umidade	%	35 ± 3,05
Densidade	kg/m³	487.8 ± 28,63
Lignina	%	18.9 ± 0,03
Volátil	%	82.8 ± 0,12
Carbono	%	17 ± 0,14
Cinza	%	0.23 ± 0,03
Poder calorífico inferior	kcal/kg	4,310 ± 40

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Welter (2017).

A entrada de energia na caldeira é calculada multiplicando-se a massa do fluxo de combustível pela entalpia de combustão, conforme equação 1.

$$\dot{q} = \dot{m}\Delta H \quad (1)$$

Onde: $\dot{q}$ energia (kJ); $\dot{m}$ é a massa do fluxo de combustível (kg); ΔH variação da entalpia de combustão (J).

A combustão incompleta da lenha produz a formação de CO, hidrocarbonetos e outros gases (FERNÁNDEZ *et al.*, 2012; SAIDUR *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2010). Na reação de combustão do eucalipto, com relação à concentração de carbono nos gases emitidos foram apresentados 94,98% de CO_2, 3,74% de CO e 1,28% de outros hidrocarbonetos (WELTER, 2017), como mostrado na reação.

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right)(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow$$
$$x0{,}94CO_2 + x0{,}037CO + \left(\frac{y}{2}\right)H_2O + 3{,}76\left(x + \frac{y}{4}\right)N_2 + x0{,}012CH_4. \quad \text{(I)}$$

Onde: H é hidrogênio; C é carbono; O_2 é molécula de oxigênio; N2 é dióxido de nitrogênio; CO é monóxido de carbono; H_2O é água; CH_4 metano; O x e y são a quantidade de C e H necessária.

Observe que há combustível saindo com os gases de escapamento, conforme mostrado nos produtos da reação I, na forma de CO e CH4 equivalente. Este combustível não queimado também pode ser oxidado liberando uma quantidade interessante de calor, uma vez que o CO pode oxidar produzindo a reação.

$$CO + 0{,}5O_2 \rightarrow CO_2 \quad \text{(II)}$$

A densidade ρ foi calculada parcialmente para cada gás usando a equação 2,

$$\rho = PM/RT \quad (2)$$

Onde P é a pressão; M é a massa molar; e R é a constante universal dos gases ideais (8,32 J / mol.K).

Processos de uso de energia

Esta seção apresenta dois processos de uso de energia, a fim de fornecer informações para comparação energética e financeira entre EGR e Regeneração.

No processo EGR os gases de exaustão por combustão incompleta produzem compostos como: CO, HC (Hidrocarboneto), NOx e outros gases, que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (CAETANO; CATALUÑA; VIELMO, 2015; ZHANG *et al.*, 2015). Assim, EGR é um método reconhecido para reduzir substâncias poluentes (LI *et al.*, 2014; RECTOR *et al.*, 2017), conforme descrito na seção anterior. Vale ressaltar que caldeiras a gás natural não apresentam vantagem adicional

no uso de EGR, pois essas condições propiciam uma combustão eficaz. A presença de gases CO_2 e H_2O na caldeira, que são meios participantes da radiação, aumenta a energia trocada (CAETANO *et al.*, 2018). Porém, no caso explorado neste trabalho, os combustíveis não queimados, presentes nos gases de exaustão, foram o maior atrativo por recuperarem a maior quantidade de energia, na forma de combustão.

A radiação apresentada nos feixes tubulares implica em uma emissividade efetivamente superior, semelhante à condição do corpo negro devido à presença de fuligem. (CAETANO *et al.*, 2015). Nessas condições, a energia líquida transferida do volume de gás para as paredes vizinhas sob temperaturas uniformes pode ser avaliada, com razoável aproximação pela equação 3

$$\dot{q_g} = \sigma A f(\varepsilon_g T^4 - \alpha_g T_p^4), \quad (3)$$

Onde: $\dot{q_g}$ é o calor trocado pela radiação gasosa (W); σ é a constante de Stefan-Boltzmann; A é a área de troca de calor (m²); f é o fator de correção para invólucro cinza; ε_g é a emissividade do gás (avaliada em T); α_g é a absorção de gás para radiação em temperatura absoluta; Tp é a temperatura da parede interna; e T é a temperatura dos gases de exaustão. A espessura efetiva da camada gasosa, ou comprimento efetivo do feixe, Le, depende principalmente da geometria do invólucro, considerando que as dimensões da área de troca de calor foram baseadas na geometria da caldeira, conforme mostrado na equação 4 (CAETANO *et al.*, 2018):

$$L_e = 0{,}85\frac{4V_g}{A}, \quad (4)$$

Onde: Vg é o total de gás; e A é a área da superfície em contato com o gás.

Os valores de emissividade ε_g e absorbância α_g dos gases foram obtidos seguindo o procedimento simplificado proposto por (ROBERTO CAETANO *et al.*, 2018), equação 5,

$$\varepsilon_g = f_c\varepsilon_c + f_w\varepsilon_w - \Delta_\varepsilon, \quad (5)$$

Onde de acordo com Viskanta e Mengüç (1987) ε_c é a emissividade CO_2, avaliada na temperatura absoluta T e produto PcLe , ε_w é a emissividade de H_2O, avaliada na temperatura absoluta T e produto PwLe, f_c é o fator de correção de CO_2 emissividade para a pressão de trabalho (adimensional), f_w é o fator de correção da emissividade de H_2O na pressão de operação (adimensional),

Δ_ε é a correção devido à presença simultânea de CO_2 e H_2O gases na temperatura absoluta T . Da mesma forma, a equação 6 foi usada para a determinação da absortividade do gás,

$$\alpha_g = f_c\varepsilon_c\left(\frac{T}{T_p}\right)^{0,65} + f_w\varepsilon_w\left(\frac{T}{T_p}\right)^{0,45} - \Delta_\varepsilon\,, \qquad (6)$$

Onde α_g é a absortividade do gás.

No processo regenerativo, o calor q é proporcional à massa m e à variação de temperatura (T_f – T_i), como mostrado na equação 7,

$$q = m\,C_e(T_f - T_i)\,, \qquad (7)$$

Onde: m é a massa; Ce é o calor específico dos gases; T_f é a temperatura final, ou temperatura de equilíbrio; e T_i é a temperatura inicial.

O calor específico da substância em função de sua temperatura é dado pela equação 8,

$$C_e = C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3, \qquad (8)$$

Onde $C_0, C_1, C_2\ and\ C_3$ são valores parciais encontrados em Pierobon *et al.* (2015).

Análise e quantificação das incertezas de medição

A incerteza experimental foi estimada e o nível de confiança atribuído aos resultados, inclusive ao índice financeiro. Os valores de incerteza para os resultados de viabilidade energética e econômica neste trabalho são apresentados nesta seção. No entanto, não se repete na apresentação dos resultados.

Foram declarados os equipamentos para o diagnóstico com as respectivas incertezas, incluindo uma descrição concisa da propagação das incertezas. Portanto, a estimativa da incerteza foi baseada na análise de erros sistemáticos e na quantificação da repetibilidade dos experimentos (CAETANO; FIGUEIRA, 2015).

The Kline-McClintock method determina a incerteza propagando as incertezas individuais de cada fonte ao longo dessas medições (KLINE; MCCLINTOCK, 1953; MOFFAT, 1982). A representação da incerteza relativa dos resultados, u_{Total}, assumindo que os fatores determinantes das

incertezas são independentes entre si, o que é expresso na equação 9 (KLINE; MCCLINTOCK, 1953; MOFFAT, 1982),

$$u_{Total} = \pm[\sum_{i=1}^{n}(u_i)^2]^{1/2}\,, \qquad (9)$$

Onde u_i é cada fonte de incertezas, quanto ao parâmetro i medido.

A temperatura dos gases de exaustão foi medida por meio de um termopar, que apresenta uma incerteza de 0,5%. Considerando os erros sistemáticos devidos à radiação emitida pela sonda termopar em alta temperatura, a incerteza experimental foi calculada aplicando o método desenvolvido por Bradley e Matthews (1968). Este erro sistemático foi subtraído dos valores medidos, gerando a incerteza na temperatura apenas em termos da precisão do equipamento. A temperatura na parede da caldeira foi medida usando um termômetro infravermelho (FLUKE CORPORATION, 2007). A emissividade e o índice de refração do meio contribuem para a incerteza nas medidas experimentais realizadas, que apresenta 2% de incerteza de acordo com informações do fabricante (FLUKE CORPORATION, 2007).

Foi realizada uma análise de incerteza para a obtenção dos resultados experimentais da concentração de CO nos gases de exaustão, os quais foram medidos com o analisador de gases de combustão Seitron Chemist 500x. A incerteza deste equipamento é de 5% (SEITRON, 2015).

Os elementos que contribuem para a incerteza da troca de calor são a absortividade, emissividade do gás e a espessura efetiva da camada de gás (VISKANTA, 1987). Absorbância de gás α_g, depende de f_c , f_w, ε_c, ε_w , Δ_ε, Tp e T. A incerteza de Tp e T, foi de 2% e 0,5%, respectivamente, dados pela precisão do equipamento. O f_c está perto de 0,01%, todos os valores em 1 atm estão no mesmo ponto. A incerteza de f_w é de cerca de 5%. O ε_w mostra uma incerteza de 4%. O ε_c tem uma incerteza de 2%. O Δ_ε tem uma incerteza de 4%, que foram estimadas com base na dificuldade em definir os valores dos parâmetros de radiação dos gases (VISKANTA, 1987).

A espessura efetiva da camada de gás, Le, foi obtida utilizando-se os valores do volume do gás de emissão e da área de superfície de contato do gás, devido aos cálculos para a estimativa do volume dos gases foram considerados a densidade e a área de superfície de contato do gás. A incerteza do Le foi estimada da mesma forma do ε_g, rendendo 10%. A radiação de gás em feixes tubulares, q_g, depende da constante de Boltzmann, a área de troca de calor, o fator de correção f para revestimento cinza, a emissividade do gás, ε_g, e a absortividade do gás, α_g. Esses valores também foram estimados com base na dificuldade em definir os valores dos parâmetros de radiação dos gases (VISKANTA, 1987).

Assim, a incerteza em relação a ambos os processos, EGR e Regenerativo, foi estimada pela propagação dessas fontes, que rende cerca de 10%.

Análise econômica

A construção dos fluxos de caixa baseou-se na estimativa das entradas (receitas) e saídas (custos) em cada cenário ao longo do tempo. Foi utilizado como referência o resultado líquido (receita menos custos), no qual todos os valores foram atualizados por meio de fórmulas de acumulação ou descontos de juros. Assim, para o prognóstico econômico das alternativas de investimento foram analisados os custos envolvidos. Para avaliação dos cenários foram utilizados métodos que consideram os valores monetários no tempo, principalmente devido à confiabilidade e eficiência.

A Tabela 2 apresenta os valores utilizados para cálculo da viabilidade econômica considerando o investimento inicial em instalações para implantação dos processos EGR e Regenerativo. Efetivamente, a montagem do sistema de recirculação requer um tubo de escape conectado à saída dos gases de escape, redirecionando os gases para auto-retorno à câmara de combustão. Porém, foi indicado isolar o cachimbo com lã de vidro para minimizar a troca térmica nesse trajeto. Para a instalação do processo regenerativo é indicada a utilização de trocador de calor em contato com o duto dos gases de exaustão e com a água condensada que retorna ao sistema. Assim, o calor dos gases é aproveitado aumentando a temperatura da água.

Tabela 2- Informações de custo e taxa para análise de viabilidade.

Informação	Unidades	Valor
Preço do escapamento	USD	22,22
Cobertor de isolamento de lã de vidro	USD	16,67
Trocador de calor	USD	222,22
Taxa mínima de atratividade	% y.y.	7,00
Preço do escapamento	USD	22,22
Cobertor de isolamento de lã de vidro	USD	16,67
Trocador de calor	USD	222,22

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de BCB (2017); Fdolinski (2017); Leonardo(2017).

As informações sobre o valor e a quantidade de lenha consumida foram fornecidas pelos funcionários do estabelecimento, responsáveis pelas licitações para compra de lenha e funcionamento da caldeira. A Tabela 3 apresenta os custos fixos de operação da caldeira.

O valor pago da lenha de eucalipto foi de 23,00 USD / m³. O gasto anual para aquisição de lenha foi estimado em USD 4.150,00, sendo que 0,5 m³ de lenha foi consumido por dia, 360 dias por ano. O custo da fração do salário do comprador foi de 32,40 USD / ano, estimado com base no salário do comprador e no tempo necessário para fazer a licitação.

Tabela 3 - Custos fixos para a caldeira considerados nesta obra

Informação	Custo (USD/ano)
Aquisição de lenha	4.150,00
Manutenção	2.066,67
Operação	933,33
Salário do comprador	32,40
Operador	5.000,00
Total	12.182,40

Fonte: Elaboração própria.

O custo médio de manutenção para operação da caldeira foi estimado em 2.066,67 USD / ano, que inclui o custo de limpeza da tubulação, câmara de combustão, câmara de coleta de cinzas e o custo do tratamento da água. O custo médio do valor de funcionamento da caldeira foi de 933,33 USD / ano, que corresponde ao custo da energia elétrica necessária para a água da bomba e ao custo da água de reposição, devido à parte da água perdida na linha e escape do vapor no relevo válvulas.

O valor do salário da operadora foi considerado 5.000,00 USD / ano. Este operador supervisiona a manutenção da caldeira na temperatura e pressão de trabalho, adicionando lenha manualmente e verificando o nível da água. O custo total anual para o uso da caldeira foi estimado em US $ 12.182,40, abrangendo a aquisição de lenha, mão de obra, manutenção e operação. O valor de aquisição da caldeira objeto do estudo foi de USD 30.000,00 no ano de 2017, sendo que este equipamento tem vida útil estimada de 10 anos.

Os projetos foram avaliados usando os seguintes critérios: Valor Presente Líquido (VPL) e o Valor Anual Equivalente (VAE), Taxa Interna de Retorno (TIR) e payback (BRADLEY; MATTHEWS, 1968; FLUKE CORPORATION, 2007; LEONARDO, 2017; MOFFAT, 1982). Os critérios de análise econômica para avaliação de projetos são dados pelas seguintes equações. O VPL é basicamente o cálculo de quanto os pagamentos futuros adicionados a um custo inicial valeriam atualmente. Para ser viável, o projeto deve ter VPL≥0, obtido pela equação 10 (FLUKE CORPORATION, 2007; FDOLINSKI, 2017; MOFFAT, 1982),

$$VPL = \sum_{j=0}^{n} R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^{n} C_j(1+i)^{-j}, \qquad (10)$$

Onde Cj são os custos anuais, j é o ano, Rj é o valor da receita anual, i é a taxa de desconto e n é a duração do projeto em anos.O VAE é o método que consiste em encontrar a série uniforme equivalente (A) ao fluxo de caixa do investimento. Se o VPL≥0 o projeto é viável, conforme a equação 11 (BRADLEY; MATTHEWS, 1968),

$$VAE = \frac{NPV[(1+i^t)-1](1+i)^{nt}}{(1+i)^{nt}-1}, \qquad (11)$$

Onde: NPV é o valor presente líquido, i é a taxa de desconto, n é a duração do projeto em anos e t é o número de períodos de capitalização.

A TIR é a taxa interna de retorno, sendo a taxa que iguala os recebimentos futuros com os investimentos feitos no projeto. É a taxa de desconto para a qual VPL = 0, então a TIR é a taxa i na equação 12 (BRADLEY; MATTHEWS, 1968; FDOLINSKI, 2017; MOFFAT, 1982),

$$\sum_{j=0}^{n} R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^{n} C_j(1+i)^{-j} = 0, \qquad (12)$$

Onde Cj é o custo no final do ano j, Rj é a receita em um ano j ei é a taxa de desconto.

O payback é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar o risco pelo tempo que leva para recuperar o capital investido. O payback foi dado pela equação 13 (BRADLEY; MATTHEWS, 1968),

$$Payback = \frac{C_{j=0}}{R_j}, \qquad (13)$$

Onde $C_{j=0}$ é o capital inicial investido e R_j é a renda em um ano j e.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Termodinâmica da caldeira

Os valores de composição de massa do Eucalipto foram utilizados para calcular reações de combustão. A teoria da radiação gasosa e o calor trocado na caldeira foram considerados na análise teórica, a fim de propor melhorias no processo de uso de energia.

A reação completa de combustão é representada na reação III, em base molar, calculadas com base no equilíbrio químico da reação,

$$10015{,}62\ C + 14716{,}83\ H + 6745{,}21\ O + 10322{,}22(O2 + 3{,}76N_2) \rightarrow 10015{,}62CO_2 + 7358{,}41\ H_2O + 38811{,}55N_2 \qquad (III)$$

As combustões incompletas foram ponderadas conforme os valores empíricos alcançados pelo analisador de gases de combustão empregado nas medições de amostras de lenha na queima. Além disso, os valores de hidrocarbonetos equivalentes de gases não queimados, que foram produzidos por

combustão incompleta, são expressos em uma determinada quantidade de metano, conforme mostrado na reação IV.

$$10015{,}62\ C + 14716{,}83\ H + 6745{,}20\ O + 10002{,}42\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow$$
$$9508{,}83\ CO_2 + 373{,}98\ CO + 7358{,}41 H_2O + 37609{,}10\ N_2 + 132{,}81\ CH_4, \quad \text{(IV)}$$

A combustão incompleta possui CO_2, H_2O e N_2 nos produtos, por outro lado, também apresenta CO e CH_4 equivalente, que colaboram para o aumento da quantidade de combustível disponível.

Tabela 4 e 5 (COELHO; COSTA, 2007) mostra a composição dos gases de escape em termos de massa, densidade e fração de massa de cada elemento. As reações III e IV foram utilizadas para calcular a massa, e a densidade foi obtida aplicando a equação 2. A fração de massa é a razão da massa de cada componente pela massa total.

Tabela 4 - Composição de gases de escape: Combustão completa

	Massa (kg)	Densidade (kg/m³)	Fração de massa (%)
CO_2	440,69	1,12	26,55
H_2O	132,45	0,46	7,98
N_2	1.086,72	0,71	65,47

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Coelho e Costa (2007).

Tabela 5 - Composição de gases de escape: Combustão incompleta

	Massa (kg)	Densidade (kg/m³)	Fração de massa (%)
CO_2	425.48	1.11	26.32
H_2O	129.02	0.45	7.98
N_2	1053.48	0.70	65.17
CO	7.01	0.70	0.43
CH_4	1.53	0.40	0.09

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Coelho e Costa (2007).

Avaliação dos processos

Este trabalho avaliou analiticamente o processo de recirculação e regeneração, a fim de produzir informações sobre a viabilidade de implantação desses métodos.

O processo EGR consiste basicamente na recirculação dos gases de exaustão de volta para a caldeira, um fim de transmitir energia dos gases quentes pelo mecanismo de radiação para o interior da câmara de combustão e, também, queimar os hidrocarbonetos presentes nos gases de exaustão. Processo regenerativo, é o aproveitamento da energia dos gases de exaustão para pré-aquecer o condensado,

utilizando um trocador de calor para aproveitar a entalpia do sistema. Note que, cada caso foi analisado separadamente neste trabalho. Em ambos os casos, o consumo de biomassa foi verificado conforme a rotina diária. O volume de lenha utilizado como combustível durante uma hora de uso da caldeira é da ordem de 0,5 m³. O combustível é necessário para a retomada do processo a fim de manter constante a pressão do fluido de trabalho, em torno de 50 kPa. Desta forma, a entrada de combustível não é contínua. O operador abre a porta da caldeira e insere toras de lenha conforme necessário. Então, os valores de temperatura mostram alta intermitência.

Os resultados para a recirculação dos gases de escape (EGR) foram obtidos usando os cálculos para radiação em feixes tubulares (LEONARDO, 2017) e também da reação de combustão, conforme as reações II e IV.

Os gases de escape de uma combustão completa são compostos por CO_2, H_2O e N_2, nas proporções de massa de 26,5%, 8,0% e 65,5%, respectivamente (BCB, 2017). No entanto, considerando a combustão incompleta, a composição do gás é CO_2, H_2O, N_2, CO e CH_4, o que corresponde a 26,3%, 8,0%, 65,2%, 0,4% e 0,1%, respectivamente.

A solução das equações de radiação em feixes tubulares requer uma estimativa da área de emissão de radiação dentro da câmara de combustão, as medições de temperatura do gás e da parede e o fluxo de geração de calor devido à combustão. A área foi considerada um jato de forma cilíndrica com raio de 0,05 me comprimento de 1,5 m, rendendo 0,47 m². A média da temperatura medida dos gases de escape, T, foi 483 K, e a temperatura média medida na parede interna, Tp, foi 531 K.

O consumo de lenha em um dia de funcionamento da caldeira foi de 0,5 m3, o que corresponde a 0,05 m3 / h. Portanto, a taxa de fluxo de calor calculada neste estudo foi em torno de 120 kJ / s. Este valor de fluxo de combustível foi obtido a partir do cálculo da razão de entrada de massa da lenha vezes o poder calorífico e o período de queima (equação 1). A relação de entrada de massa foi determinada pela soma de todo o volume inserido durante o tempo decorrido em um dia de trabalho de operação da caldeira. Os parâmetros utilizados para calcular a radiação dos gases CO_2 e H_2O em feixes tubulares, e também, para o processo EGR, considerando a configuração de temperatura e pressão, são apresentados na Tabela 6.

A combustão incompleta considera o calor de CO_2 e H_2O irradiado e o calor de combustão de CO e CH_4 equivalente. Em seguida, a combustão incompleta considera o calor de CO_2 e H_2O irradiado e o calor de combustão de CO e CH4 equivalente. Então, CO e CH4 fornecem calor de combustão de 282,5 kJ / mol e 888,6 kJ / mol (CAETANO; FIGUEIRA, 2015), respectivamente, que ponderados pelos valores apresentados nas Tabela 4 e 5 resultam em q_{CO} e q_{CH_4}. Portanto, a recuperação dos gases de

exaustão é vantajosa em termos de energia, e também, pela redução na emissão de gases poluentes para a atmosfera.

Para a combustão completa, a espessura efetiva da camada de gás, Le, é 0,05 m, com área de superfície estimada em contato com o gás e volume de gás de 0,50 m² e 0,01m³, respectivamente. A emissividade do CO_2, εw, é 0,18 Wm-2K-4, a emissividade da água, εw, é 0.15 Wm-2K-4, o fator de correção para a emissividade de CO_2, f_c, 1,00, fator de correção para a emissividade da água, f_w, é 1,10 e o fator de correção devido à presença simultânea dos gases CO_2 e H_2O, Δε, é 0,004 (CAETANO *et al.*, 2018).

Tabela 6 - Parâmetros usados para calcular a radiação de gás emitida por CO_2 E H_2O em feixes tubulares

Parâmetro	Unidade	Recirculação	
		Combustão completa	Combustão Incompleta
A	m²	0.50	0.50
v_t	m³/s	0.06	0.06
v_g	m³	0.01	0.01
L_e	m	0.05	0.05
ε_c	-	0.18	0.18
ε_w	-	0.15	0.15
Δε	-	0.004	0.004
ε_g	-	0.34	0.34
α_g	-	0.32	0.32
$\dot{q_g}$	kJ/s	0.16	0.16
$\dot{q_{CO}}$	kJ/s	-	0.36
$\dot{q_{CH4}}$	kJ/s	-	0.43
f_c	-	1.00	1.00
f_w	-	1.10	1.10

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de Bazzo (1995).

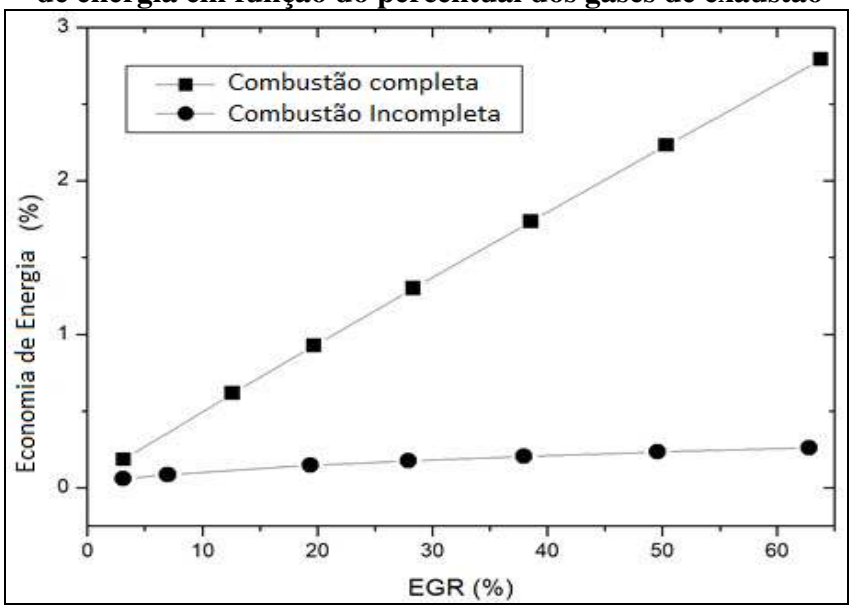
O valor da emissividade do gás, εg, encontrado neste estudo foi de 0,34 Wm-2K-4 e a absorbância do gás, αg, foi 0,32 Wm-2K-4. Assim, considerando o fator de correção para revestimento cinza, f, é 0,99, a radiação de gás em feixes tubulares, $\dot{q_g}$, rendimentos calculados 0,28 kJ/s (NEWNAN; ESCHENBACH; LAVELLE, 2004; CAETANO *et al.*, 2018).

A economia relativa gerada pela aplicação de EGR foi calculada pela razão entre a recuperação do fluxo de calor da porção dos gases de exaustão recirculados (equação 14) e a entrada do fluxo de calor total na caldeira (equação 1). Assim, a economia foi obtida multiplicando-se o percentual de economia de energia pelo custo da lenha.

$$q_{EGR} = q_g + q_{CO} + q_{CH_4}. \quad (14)$$

O gráfico 1 mostra a porcentagem de economia de energia em função das porcentagens de gás recirculado. Apresentando diferença entre a recirculação dos gases de exaustão que possuem combustíveis não queimados em sua composição. Essas comparações foram realizadas para permitir estimar a diferença de aplicação da razão EGR neste trabalho e em caldeiras a gás e líquido ou mesmo sólido pulverizado. Nessas caldeiras, que utilizam alta tecnologia, a combustão é eficaz e quase completa. Assim, os resultados mostram a importância do EGR em caldeiras simples e pequenas, onde são consideradas toras, madeira ou pedaços de biomassa de forma rudimentar, produzindo combustíveis não queimados diluídos nos gases de exaustão.

Gráfico 1 - Comportamento do percentual de economia de energia em função do percentual dos gases de exaustão



Fonte: Elaboração própria.

A economia de energia em função da relação EGR apresentou comportamento linear, ou seja, observou-se redução no consumo de lenha diretamente proporcional ao retorno dos gases de exaustão. Além disso, o processo de combustão incompleta apresentou uma economia de aproximadamente cinco vezes, para a relação EGR de 20%, em relação à combustão completa. Observe que esta condição de combustão completa foi considerada um caso ideal apenas em termos de fornecer um valor de referência para comparação.

A relação EGR foi fixada em 20% para criar um cenário de comparação com o resultado obtido no caso regenerativo. Esta relação EGR foi proposta considerando a aplicação deste processo na caldeira, sem a utilização de sistema de ventilação para redirecionar esta parte dos gases de exaustão.

A caldeira considerada neste trabalho aspira o ar direto devido apenas pela flutuabilidade. Portanto, não há ventilador para empurrar o ar para dentro. Assim, o ar circundante é inserido na câmara

de combustão apenas pelo diferencial de pressão causado pela diferença de temperatura, o que cria um fluxo de convecção natural.

Na prática, foi sugerido o fechamento parcial da chaminé para obstruir parcialmente o fluxo dos gases de escape. Essa obstrução aumenta a pressão ao longo da tubulação, permitindo assim o retorno parcial dos gases, por meio de uma tubulação, diretamente para a câmara de combustão sem desperdício de energia (WALEKHWA; LARS; MUGISHA, 2014). Uma ligeira pressurização na saída da chaminé pode alterar apenas as fontes de energia, mas não o equilíbrio. Esta etapa do trabalho é exclusivamente para estimar a economia gerada pela recirculação dos gases. Portanto, nenhuma análise detalhada foi conduzida para determinar o limite máximo de recirculação obstruindo a chaminé.

Na Regeneração os resultados foram baseados no balanço térmico, considerando como hipótese que 100% do calor nos gases de exaustão é convertido em aquecimento de água, ou seja, a eficiência do trocador de calor é 1, apenas para referência de comparação (SHEPHERD, 2013). Assim, a economia trazida pela regeneração foi baseada nas equações 7 e 8 para calcular o valor de qe dividido pela entrada total de energia na caldeira. O parâmetro economia financeira foi obtido multiplicando-se a economia de energia pelo custo da lenha.

Tabela 7 lista os parâmetros termodinâmicos fundamentais para a análise de energia no caso regenerativo, considerando a combustão completa e incompleta.

Na combustão completa e incompleta, o calor específico do gás de exaustão foi de 1,29 kJ / kgK e 1,11 kJ / kgK, e a massa dos reagentes foi de 1.659,86 kg e 1.614,37 kg, respectivamente. A energia dos gases de exaustão, considerando as temperaturas medidas neste trabalho, foi de 349.016,39 kJ e 293.119,44 kJ, na combustão completa e incompleta, respectivamente. Assim, a redução do consumo de energia para a combustão incompleta foi de 7,46%, o que representa 309,96 USD / ano.

Análise Econômica

A análise econômica dos processos de uso de energia proposta neste estudo foi feita num horizonte de planejamento de 10 anos. O investimento estimado na EGR foi de USD 55,56 com tubagens, isolamento e mão de obra. Para o caso regenerativo o investimento foi de USD 277,78, considerando um trocador de calor e o trabalhador. As informações foram obtidas nos relatórios financeiros do estabelecimento.

Tabela 7 - Parâmetros termodinâmicos e econômicos obtidos para o caso regenerativo

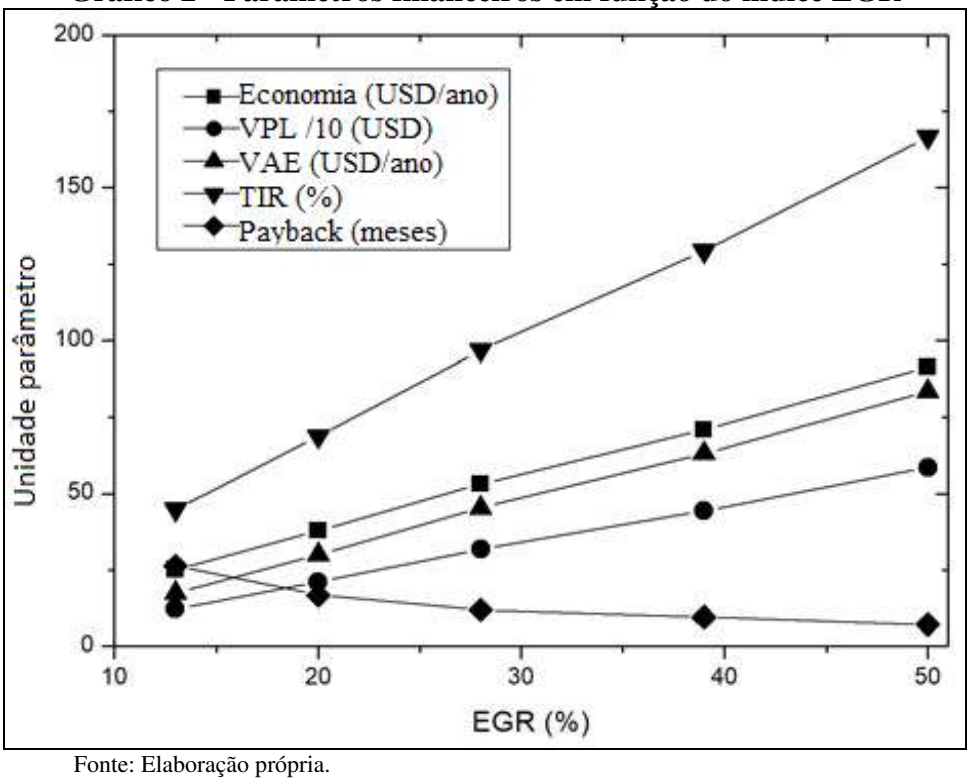
Parâmetro	Unidade	Combustão completa	Combustão incompleta
C_e	kJ/kgK	1,29	1,11
m_{mix}	kg	1.659,86	1.614,37
q_e	kJ	349.016,39	293.119,44
Economia de energia	%	8,89	7,46
Economia	USD/ano	369,07	309,96

Fonte: Elaboração própria.
Nota: m_{mix}= massa dos reagentes, q_e = calor dos gases de exaustão, A economia de energia é a porcentagem de energia dos gases de exaustão convertida em aquecimento de água, a economia é a redução de custo anual.

Processo de recirculação

O Gráfico 2 mostra os parâmetros financeiros padronizados para combustão incompleta. Os parâmetros financeiros indicam a viabilidade econômica do projeto para recirculação de mais de 5% do volume total de gás. Conforme discutido, considerando a recirculação de 20%, o VPL é igual a USD 214,36, o VAE é 30,52 USD / ano, a TIR é de 69% e o retorno é de 1,45 anos.

Gráfico 2 - Parâmetros financeiros em função do índice EGR



Fonte: Elaboração própria.

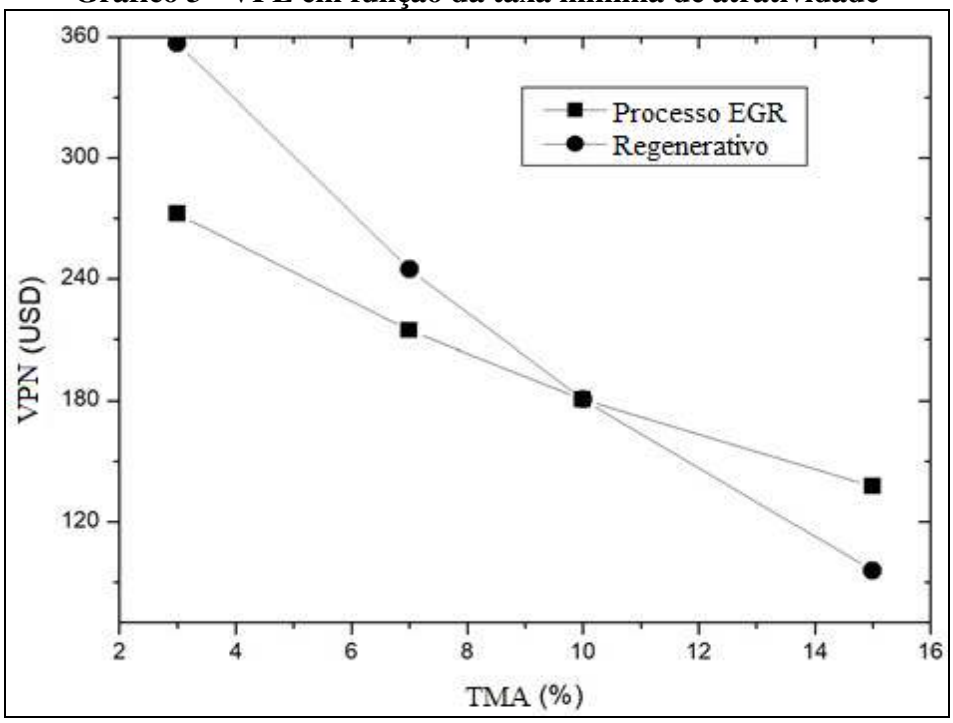
Processo regenerativo

Os parâmetros financeiros indicam a viabilidade econômica do projeto para regenerativa. O VPL é igual a USD 1.899,28, o VAE é 270,41 USD / ano, a TIR é de 112% e o payback é de 0,90 anos.

Análise incremental

A análise incremental foi calculada para comparar o processo de implementação do uso de energia, discutido nas seções anteriores O Gráfico 3 apresenta o VPL em função da taxa mínima de atratividade para ambos os processos, recirculação e regenerativo.

Gráfico 3 - VPL em função da taxa mínima de atratividade



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados apresentados mostram que investir com uma taxa de atratividade menor de 10% a implementação do processo regenerativo rende melhores resultados. Por outro lado, o processo EGR foi superior financeiramente, para investimentos com alíquota superior a 10%.

Neste estudo, a taxa mínima de atratividade foi considerada em 7%, portanto o processo regenerativo foi mais vantajoso. No entanto, ao aumentar o índice EGR supera financeiramente o processo de regeneração. Desta forma, ambos os processos podem ser implementados juntos.

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados mostram que investir com uma taxa de atratividade menor de 10% a implementação do processo regenerativo rende melhores resultados. Por outro lado, o processo EGR foi superior financeiramente, para investimentos com alíquota superior a 10%.

Uma análise da viabilidade econômica de dois processos de uso de energia, EGR e Regeneração, foi realizada em uma caldeira a lenha de pequena escala. A caldeira em estudo é nova, mas muito simples, que possui alto potencial de uploads para aumentar o uso de energia e, consequentemente, reduzir os custos de produção de vapor. Com efeito, o principal aumento da recuperação energética trazido pelo processo EGR deveu-se à presença de combustíveis não queimados nos gases de escape, os quais foram produzidos considerados por combustão incompleta com base na queima ineficaz da lenha, por se apresentarem na forma de tora.

O investimento inicial para implementação do processo regenerativo foi avaliado em USD 280,00 e USD 55,00 para o processo de recirculação. Portanto, o processo de recirculação dos gases de escape, referente a 20% da EGR, apresentou em torno de 69% e 1,45 anos de TIR e payback, respectivamente. Porém, o processo regenerativo apresentou valores de TIR de 112% e payback de 0,90 anos, ambos processos considerados em um horizonte de 10 anos.

Os parâmetros financeiros da análise econômica considerando o processo EGR mostraram que a implantação do projeto é viável para índice EGR superior a 5%. Os parâmetros financeiros eram semelhantes para ambos os processos se o índice EGR fosse de 33%.

Para além da análise financeira, é importante ressaltar que tanto o processo EGR quanto o processo regenerativo têm potencial para melhorar a sustentabilidade da produção de vapor na caldeira de lenha. A recuperação de energia térmica e química dos gases de exaustão reduz a quantidade de combustíveis necessários para produzir a mesma quantidade de vapor, o que pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, a redução no consumo de combustíveis fósseis também pode contribuir para a conservação de recursos naturais finitos. A implementação desses processos pode, portanto, ter um impacto positivo tanto no meio ambiente quanto na economia local.

Por fim, é importante ressaltar que a escolha da fonte de energia deve considerar não apenas os aspectos financeiros, mas também os impactos ambientais e sociais de longo prazo. A busca por fontes de energia sustentáveis e renováveis é fundamental para garantir um futuro mais limpo e seguro para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS

ADAMS, P. W. R.; MCMANUS, M. C. "Small-scale biomass gasification CHP utilisation in industry: Energy and environmental evaluation". **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 6, 2014.

AGRAWAL, A. K. *et al.* "Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines". **Sadhana**, vol. 29, n. 3, 2004.

AHMADI, L.; KANNANGARA, M.; BENSEBAA, F. "Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective". **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 37, 2020.

ALCARÁZ-CALDERON, A. M. *et al.* "Natural gas combined cycle with exhaust gas recirculation and CO2 capture at part-load operation". **Journal of the Energy Institute**, vol. 92, n. 2, 2019.

ALI, U. *et al.* "Comparative potential of natural gas, coal and biomass fired power plant with post - combustion CO 2 capture and compression". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, vol. 63, 2017.

ALI, U. *et al.* "Process Simulation and Thermodynamic Analysis of a Micro Turbine with Post-combustion CO2 Capture and Exhaust Gas Recirculation". **Energy Procedia**, vol. 63, 2014.

ALI, U. *et al.* "Techno-economic process design of a commercial-scale amine-based CO2 capture system for natural gas combined cycle power plant with exhaust gas recirculation". **Applied Thermal Engineering**, vol. 103, 2016.

ARAHUETES, A.; OLCINA CANTOS, J. "The potential of sustainable urban drainage systems (SuDS) as an adaptive strategy to climate change in the Spanish Mediterranean". **International Journal of Environmental Studies**, vol. 76, n. 5, 2019.

ASIKAINEN, A. *et al.* "Forest energy potential in Europe (EU 27)". **Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 69**. Helsinque: Finnish Forest Research Institute, 2008.

BARAL, A. "Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit". **Biomass and Bioenergy**, vol. 27, n. 1, 2004.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BCB - Banco Central do Brasil. "Selic". **BCB** [2017]. Disponível em: <www.bcb.gov.br>. Acesso em: 05/05/2023.

BRADLEY, D.; MATTHEWS, K. J. "Measurement of High Gas Temperatures with Fine Wire Thermocouples". **Journal of Mechanical Engineering Science**, vol. 10, n. 4, 1968.

CAETANO, N. R. *et al.* "Assessment of mathematical models for prediction of thermal radiation heat loss from laminar and turbulent jet non-premixed flames". **Thermal Science and Engineering Progress**, vol. 7, 2018.

CAETANO, N. R. *et al.* "Diffusion Flame Stability of Low Calorific Fuels". **Defect and Diffusion Forum**, vol. 362, 2015.

CAETANO, N. R.; CATALUÑA, R.; VIELMO, H. A. "Analysis of the Effect on the Mechanical Injection Engine Using Doped Diesel Fuel by Ethanol and Bio-Oil". **International Review of Mechanical Engineering**, vol. 9, n. 2, 2015.

CAETANO, R. R.; FIGUEIRA, L. F. "A comparative experimental study of turbulent non premixed flames stabilized by a bluff-body burner". **Experimental Thermal and Fluid Science**, vol. 63, 2015.

CARAPELLUCCI, R.; GIORDANO, L.; VACCARELLI, M. "The use of biomass to reduce power derating in combined cycle power plants retrofitted with post-combustion CO2 capture". **Energy Conversion and Management**, vol. 107, 2016.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. "Breve retrospecto macroeconômico do agronegócio em 2020". **CEPEA** [2021]. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br>. Acesso em: 08/05/2023.

CHUI, E. H.; GAO, H. "Estimation of NOx emissions from coal-fired utility boilers". **Fuel**, vol. 89, n. 10, 2010.

COELHO, P.; COSTA, M. **Combustão**. Lisboa: Editora Orion, 2007.

DEMESTICHAS, K. *et al.* "Blockchain in Agriculture Traceability Systems: A Review". **Applied Sciences**, vol. 10, n. 12, 2020.

DENG, C. *et al.* "Meeting the challenges of food-energy-water systems in typical mega-urban regions from final demands and supply chains: A case study of the Bohai mega-urban region, China". **Journal of Cleaner Production**, vol. 320, 2021.

DIAMOND-SMITH, N.; SMITH, K. R.; HODOGLUGIL, N. N. S. "Climate change and population in the Muslim world". **International Journal of Environmental Studies**, vol. 68, n. 1, 2011.

DÍEZ, H. E.; GÓMEZ, I. N.; PÉREZ, J. F. "Mass, energy, and exergy analysis of the microgasification process in a top-lit updraft reactor: Effects of firewood type and forced primary airflow". **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 29, 2018.

DITARANTO, M.; HALS, J.; BJORGE, T. "Investigation on the in-flame NO reburning in turbine exhaust gas". **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 32, n. 2, 2009.

DJEKIC, I. *et al.* "Role of the Food Supply Chain Stakeholders in Achieving UN SDGs". **Sustainability**, vol. 13, n. 16, 2021.

ELKADY, A. M. *et al.* "Application of Exhaust Gas Recirculation in a DLN F-Class Combustion System for Postcombustion Carbon Capture". **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, vol. 131, n. 3, 2009.

FDOLINSKI, C. "Trocador de calor de 30 placas em inox". **Mercado Livre** [2017]. Disponível em: <www.mercadolivre.com.br>. Acesso em: 02/05/2023.

FEARNSIDE, P. M.; PUEYO, S. "Greenhouse-gas emissions from tropical dams". **Nature Climate Change**, vol. 2, n. 6, 2012.

FERNÁNDEZ, R. G. *et al.* "Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in

boilers". **Fuel Processing Technology**, vol. 103, 2012.

FLUKE CORPORATION. **Manual Fluke 561**. Göttingen: Fluke Corporation, 2007.

FRAGA, A. de O. *et al.* Soil corrosion of the AISI1020 steel buried near electrical power transmission line towers. **Materials Research**, vol. 17, n. 6, p. 1637–1643, 2014.

GÓMEZ, M. A. *et al.* "Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler". **Fuel**, vol. 184, 2016.

GÓMEZ, M. A. *et al.* "Steady CFD combustion modeling for biomass boilers: An application to the study of the exhaust gas recirculation performance". **Energy Conversion and Management**, vol. 179, 2019.

GUERRA, S. P. S. *et al.* "Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production". **Fuel**, vol. 137, 2014.

HAMID ELSHEIKH, M. *et al.* "A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 30, 2014.

HENRIQUES, M. C. B. F. "Effect of exhaust gas recirculation and air staging on gaseous and particle emissions in a domestic boiler". **MDPI** [2018]. Disponível em: <www.mdpi.com>. Acesso em: 03/05/2023.

HU, Y. *et al.* "Thermodynamic analysis and techno-economic evaluation of an integrated natural gas combined cycle (NGCC) power plant with post-combustion CO2 capture". **Applied Thermal Engineering**, vol. 111, 2017.

JIMÉNEZ-ESPADAFOR, F. J. *et al.* "Experimental analysis of low temperature combustion mode with diesel and biodiesel fuels: A method for reducing NOx and soot emissions". **Fuel Processing Technology**, vol. 103, 2012.

JUNGA, R.; CHUDY, P.; POSPOLITA, J. "Uncertainty estimation of the efficiency of small-scale boilers". **Measurement**, vol. 97, 2017.

KANG, M. S. "Journal of crop improvement and the sustainable development goals". **Journal of Crop Improvement**, vol. 34, n. 5, 2020.

KLINE, S. J.; MCCLINTOCK, F. A. "Describing uncertainties in single-sample experiments". **Mechanical Engineering**, vol. 75, 1953.

KLUNK, M. A. *et al.* "Study of the Corrosion of Buried Steel Grids of Electrical Power Transmission Towers". **ECS Transactions**, vol. 43, n. 1, 2012.

KLUNK, M. A.; DASGUPTA, S.; DAS, M. I. "Influence of fast pyrolysis with temperature on ga, char and bio-oil production". **Southern brazilian Journal of Chemistry**, vol. 26, n. 26, 2017.

KLUNK, M. A.; DASGUPTA, S.; DAS, M. "Slow pyrolysis of rice straw: Analysis of biochar, bio-oil and gas". **Southern Brazilian Journal of Chemistry**, vol. 26, n. 26, 2018.

LEONARDO, M.P. **Duto Semi-flexivel Alumi Para Coifa De 150 Mm (rl.c/ 1,5mts)**. 2017.

LI, H. *et al.* "Impacts of exhaust gas recirculation (EGR) on the natural gas combined cycle integrated with chemical absorption CO2 capture technology". **Energy Procedia**, vol. 4, 2011.

LI, J.; DITARANTO, M.; BERSTAD, D. "Technologies for increasing CO2 concentration in exhaust gas from natural gas-fired power production with post-combustion, amine-based CO2 capture". **Energy**, vol. 36, n. 2, 2011.

LI, X. *et al.* "Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load". **Applied Thermal Engineering**, vol. 68, n. 1, 2014.

LINDQVIST, K. *et al.* "Integration aspects of reactive absorption for post-combustion CO 2 capture from NGCC (natural gas combined cycle) power plants". **Energy**, vol. 78, 2014.

LIU, C.; NGUYEN, T. T. "Evaluation of household food waste generation in hanoi and policy implications towards SDGs target 12.3". **Sustainability**, vol. 12, n. 16, 2020.

MALAGÓ, A. *et al.* "An analytical framework to assess SDG targets within the context of WEFE nexus in the Mediterranean region". **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 164, 2021.

MASON-JONES, R.; DAVIES, P. G.; THOMAS, A. "Applying the Theory of Constraints to Explore the UK Renewable-Energy Supply Chain". **Sustainability**, vol. 14, n. 20, 2022.

MOFFAT, R. J. "Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis". **Journal of Fluids Engineering**, vol. 14, 1982.

NEWNAN, D. G.; ESCHENBACH, R. G.; LAVELLE, J. P. **Engineering economic analysis**. Oxford: Oxford University Press, 2004.

OKOKO, A. *et al.* "The carbon footprints of alternative value chains for biomass energy for cooking in Kenya and Tanzania". **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 22, 2017.

PATRONELLI, S. *et al.* "Combustion of wood-chips in a small-scale fixed-bed boiler: Validation of the numerical model through in-flame measurements". **Fuel**, vol. 221, 2018.

PEETERS, A. N. M.; FAAIJ, A. P. C.; TURKENBURG, W. C. "Techno-economic analysis of natural gas combined cycles with post-combustion CO2 absorption, including a detailed evaluation of the development potential". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, vol. 1, n. 4, 2007.

PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. "Estatística econômicas: agricultura e pecuária". **PEVS** [2021]. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 maio 2023.

PIEROBON, F. *et al.* "Life cycle environmental impact of firewood production – A case study in Italy". **Applied Energy**, vol. 150, 2015.

RECTOR, L. *et al.* "Comparative emissions characterization of a small-scale wood chip-fired boiler and an oil-fired boiler in a school setting". **Biomass and Bioenergy**, vol. 107, 2017.

ROKKE, P. E. **Environmental Use of Natural Gas in a Gas Turbine** (Thesis Doctoral). Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2006.

SAGANI, A.; HAGIDIMITRIOU, M.; DEDOUSSIS, V. "Perennial tree pruning biomass waste exploitation for electricity generation: The perspective of Greece". **Sustainable Energy Technologies**

and Assessments, vol. 31, 2019a.

SAGANI, A.; HAGIDIMITRIOU, M.; DEDOUSSIS, V. "Perennial tree pruning biomass waste exploitation for electricity generation: The perspective of Greece". **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 31, 2019b.

SAIDUR, R. *et al.* "A review on biomass as a fuel for boilers". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, n. 5, 2011.

SANTIS, A. *et al.* "CFD analysis of exhaust gas recirculation in a micro gas turbine combustor for CO2 capture". **Fuel**, vol. 173, 2016.

SANTOS, M. A. *et al.* "Estimates of GHG emissions by hydroelectric reservoirs: The Brazilian case". **Energy**, vol. 133, 2017.

SCHUCK, S. "Biomass as an energy source". **International Journal of Environmental Studies**, vol. 63, n. 6, 2006.

SEITRON. "Combustion Analyzer Chemist 500x". **Seitron** [2015]. Disponível em: <www.seitron.com>. Acesso em: 20/05/2023.

SHEPHERD, P. J. Fundamentals of Thermodynamics. *In*: LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. **A course in theoretical physics**. Oxford: John Wiley AND Sons, 2013.

SHINOMORI, K. *et al.* "No emission characteristics and aerodynamic structure of a self-recirculation type burner for small boilers". **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 33, n. 2, 2011.

SILVA, B. P. *et al.* "Technical and Economic Viability for the Briquettes Manufacture". **Defect and Diffusion Forum**, vol. 380, 2017.

SINGH, G.; SINGH, A. P.; AGARWAL, A. K. "Experimental investigations of combustion, performance and emission characterization of biodiesel fuelled HCCI engine using external mixture formation technique". **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 6, 2014.

SIVARAMAN, M. R. "The role of climate change in global economic development". **International Journal of Environmental Studies**, vol. 71, n. 2, 2014.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. São Paulo: LTC, 2000.

SMITH, L. D; SANCHEZ, S. "Assessment of business potential at retail sites: Empirical findings from a us supermarket chain". **International Review of Retail, Distribution and Consumer Research**, vol. 13, n. 1, 2003.

SPINELLI, R.; WARD, S. M.; OWENDE, P. M. "A harvest and transport cost model for Eucalyptus spp. fast-growing short rotation plantations". **Biomass and Bioenergy**, vol. 33, n. 9, 2009.

TANG, E.; PENG, C; XU, Y. "Changes of energy consumption with economic development when an economy becomes more productive". **Journal of Cleaner Production**, vol. 196, 2018.

THAPA, S.; BORQUIST, E.; WEISS, L. "Thermal energy recovery via integrated small scale boiler and superheater". **Energy**, vol. 142, 2018.

TOBOSO-CHAVERO, S. *et al.* "Incorporating user preferences in rooftop food-energy-water production through integrated sustainability assessment". **Environmental Research Communications**, vol. 3, n. 6, 2021.

TREVELIM, W. J. "Caldeiras flamotubulares-reconstituição de prontuários". **Revista Eletrônica da Faculdade de Alta Floresta**, vol. 2, n. 2, 2013.

VISKANTA, R. "Radiation heat transfer in combustion systems". **Progress in Energy and Combustion Science**, vol. 13, n. 2, 1987.

WALEKHWA, P. N.; LARS, D.; MUGISHA, J. "Economic viability of biogas energy production from family-sized digesters in Uganda". **Biomass and Bioenergy**, vol. 70, 2014.

WELTER, C. A. **Uso da biomassa Florestal como estratégia de redução dos gases de efeito estufa**: estudo de caso na fumicultura do sul do Brasil (Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal). Santa Maria: UFSC, 2017.

WHITEMAN, A.; WICKRAMASINGHE, A.; PIÑA, L. "Global trends in forest ownership, public income and expenditure on forestry and forestry employment". **Forest Ecology and Management**, vol. 352, 2015.

YIN, C.; ROSENDAHL, L. A.; KÆR, S. K. "Grate-firing of biomass for heat and power production". **Progress in Energy and Combustion Science**, vol. 34, n. 6, 2008.

YU, B. *et al.* "Study on the combustion characteristics of a premixed combustion system with exhaust gas recirculation". **Energy**, vol. 61, 2013.

ZAHEDI, A. "Maximizing solar PV energy penetration using energy storage technology". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, n. 1, 2011.

ZHANG, X. *et al.* "Approximate ideal multi-objective solution Q(λ) learning for optimal carbon-energy combined-flow in multi-energy power systems". **Energy Conversion and Management**, vol. 106, 2015.

ZHANG, X. *et al.* "Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler". **Fuel Processing Technology**, vol. 91, n. 11, 2010.



BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)

Ano V | Volume 14 | Nº 41| Boa Vista |2023

http://www.ioles.com.br/boca

Editor chefe:

Elói Martins Senhoras

Conselho Editorial

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

Conselho Científico

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima