



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA

COMPARATIVE SYSTEMATIC REVIEW OF COMBINED ENERGY GENERATION CYCLES BASED ON BIOMASS GASIFICATION AND NATURAL GAS/BIOMASS

REVISIÓN SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA COMBINADA BASADOS EN GASIFICACIÓN DE BIOMASA Y GAS NATURAL/BIOMASA

Isabele Oliveira de Paula¹, Alex Pereira da Cunha¹, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares¹, Masoud Ghanbari Kashani¹, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos¹

e524874

<https://doi.org/10.47820/recima21.v5i2.4874>

PUBLICADO: 02/2024

RESUMO

Nos últimos anos, a necessidade e busca global por alternativas aos combustíveis fósseis e o desenvolvimento da utilização de biocombustíveis tornou-se crucial. Dentro das fontes renováveis disponíveis, a biomassa se destaca pela sua abundância e baixo custo. Este estudo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre os ciclos combinados de geração de energia, explorando tanto a ciclos movidos somente a gaseificação de biomassa quanto os ciclos combinados convencionais a gás natural, integrados com sistemas de gaseificação. Uma metodologia específica foi empregada, utilizando o *software Start* para abranger uma ampla gama de artigos disponíveis nas plataformas de busca. Os principais *insights* desses artigos foram sintetizados para destacar as recentes contribuições a respeito do tema, visando facilitar o acesso às informações e fomentar o desenvolvimento de futuras pesquisas nesse campo.

PALAVRAS-CHAVE: Gaseificação. Ciclo Combinado. Gás Natural. Biomassa. Energia Renovável.

ABSTRACT

In recent years, the global need and pursuit for alternatives to fossil fuels, along with the development of biofuel utilization, have become crucial. Among the available renewable sources, biomass stands out due to its abundance and low cost. This study presents a systematic literature review on combined cycles of power generation, exploring both cycles only powered by biomass gasification and conventional combined cycles using natural gas, integrated with gasification systems. A specific methodology was employed, utilizing the Start software to encompass a wide range of articles available on search platforms. The main insights from these articles were synthesized to highlight recent contributions on the subject, aiming to facilitate access to information and foster the development of future research in this field.

KEYWORDS: Gasification. Combined Cycle. Natural Gas. Biomass. Renewable Energy.

RESUMEN

En los últimos años, la necesidad y la búsqueda global de alternativas a los combustibles fósiles y el desarrollo de la utilización de biocombustibles se ha vuelto crucial. Dentro de las fuentes renovables disponibles, la biomasa se destaca por su abundancia y bajo costo. Este estudio presenta una revisión sistemática de la literatura sobre los ciclos combinados de generación de energía, explorando tanto los ciclos impulsados únicamente por la gasificación de biomasa como los ciclos combinados convencionales con gas natural, integrados con sistemas de gasificación. Se empleó una metodología específica utilizando el software Start para abarcar una amplia gama de artículos disponibles en plataformas de búsqueda. Los principales hallazgos de estos artículos se sintetizaron para resaltar las contribuciones recientes sobre el tema, con el objetivo de facilitar el acceso a la información y promover el desarrollo de futuras investigaciones en este campo.

PALABRAS CLAVE: Gasificación. Ciclo Combinado. Gas Natural. Biomasa. Energía Renovable.

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido um crescimento significativo na preocupação com o abastecimento de combustíveis e a crise ambiental, levando a uma busca por sistemas com menores emissões de dióxido de carbono, conhecidos como sistemas de geração alternativa (Wang *et al.*, 2023). Esse aumento de interesse é motivado, em grande parte, pelas preocupações com o aquecimento global, predominantemente causado pela queima de combustíveis fósseis. Como resultado, os estudos no campo dos sistemas de geração de energia têm se concentrado em tecnologias inovadoras que maximizem a eficiência e minimizem o impacto ambiental, frequentemente explorando o potencial das energias renováveis (Li; Zhong; Feng, 2023).

Dentre as alternativas de combustíveis consideradas para sistemas de geração de energia, a biomassa se destaca por várias razões vantajosas. Sua ampla disponibilidade, baixo teor de enxofre e a consideração como um combustível de emissão neutra de carbono são alguns dos fatores mencionados na literatura (Ghiami; Khallaghi; Borhani, 2021). Além disso, a biomassa oferece uma maior segurança energética e confiabilidade quando comparada às fontes renováveis mais conhecidas, como a energia solar e eólica, devido à sua independência em relação às condições climáticas (Chang; Wu; Ghadimi, 2023).

Os principais processos de conversão da biomassa incluem a combustão direta, a gaseificação e a pirólise. Entre eles, a gaseificação se destaca devido às suas temperaturas de operação mais baixas em comparação com a combustão e uma maior eficiência quando comparada à pirólise. Esse processo termoquímico produz um gás combustível composto principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio, que pode ser utilizado em sistemas de turbinas a gás (Ge *et al.*, 2019)(Beheshti; Ghassemi; Shahsavan-Markadeh, 2015).

A geração de energia por meio da gaseificação é mais adequada para usinas de pequeno porte devido à sua baixa densidade energética e eficiência quando comparada com usinas a gás natural. Entre as estratégias para melhorar essa eficiência, que tipicamente variam de 15% a 30%, incluem a integração dessas usinas com sistemas baseados em combustíveis fósseis, como carvão ou gás natural (Ren; Feng; Wang, 2021; Morrone *et al.*, 2022).

Existem diversas possibilidades no âmbito dos sistemas de geração de energia, considerando as diferentes formas de energia geradas, tais como eletricidade, calor, aquecimento e resfriamento. Esses sistemas são estudados sob diferentes perspectivas, incluindo aspectos termodinâmicos, econômicos e ambientais (Zhang *et al.*, 2018).

A pesquisa a respeito de sistemas energéticos a base de gaseificação de biomassa alinha-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). A biomassa é considerada uma fonte de energia limpa e acessível (ODS-7), cujo emprego representa uma medida em prol do combate às mudanças climáticas globais (ODS-13), visto que substitui os combustíveis fósseis.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

A divulgação do conhecimento gerado por esta revisão visa contribuir para a promoção da educação de alta qualidade (ODS-4), proporcionando acesso a informações de relevância social e econômica. Adicionalmente, esta revisão busca estabelecer-se como uma referência técnico-científica para orientar pesquisas futuras e o desenvolvimento contínuo nesse campo de estudo.

Este estudo se propõe a realizar uma revisão sistemática dos estudos referentes aos sistemas de geração de energia por ciclos combinados que empregam a tecnologia de gaseificação de biomassa, seja como fonte primária de energia ou em coexistência com o Gás Natural. A pesquisa será conduzida por meio da análise de artigos publicados nos últimos anos em bases de dados científicos de acesso restrito e público, com o intuito de mapear as mais recentes contribuições sobre esse tema, que emergiu com relevância a partir dos anos 2000 e tem apresentado um crescimento significativo até os dias atuais.

2 MÉTODO

2.1 Revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática da literatura representa um método estruturado e meticuloso que busca identificar, selecionar e analisar as evidências disponíveis sobre um tópico específico. O processo de desenvolvimento segue uma metodologia que envolve a definição de critérios de busca, incluindo palavras-chave, fontes de informação relevantes e dados sobre as recentes pesquisas sobre o assunto (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Os estudos identificados passam por um minucioso processo de seleção e extração, onde as informações mais relevantes são compiladas e sintetizadas. Estas são então analisadas e interpretadas para a produção de resultados consolidados, oferecendo uma visão do estado atual da arte sobre o tema em questão (Webster; Watson, 2002).

As revisões sistemáticas são recursos de papel crucial em trabalhos acadêmicos, sendo utilizadas como fonte inicial de informação e ponto de partida para futuras pesquisas. Além disso, as revisões contribuem para a identificação de lacunas em determinada área de conhecimento, auxiliando na promoção de originalidade e inovação durante a condução de novos estudos (Webster; Watson, 2002).

2.2 *Software Start*

O *software Start* (*State of the Art through Systematic Review*) é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com o propósito de auxiliar na elaboração de revisões sistemáticas da literatura. Disponível gratuitamente através do website do laboratório, esta ferramenta compreende três etapas distintas: Planejamento, Execução e Sumarização.

A fase de planejamento consiste no protocolo da revisão, detalhado posteriormente. Já a etapa de Execução engloba a identificação, seleção e extração dos estudos relevantes. Por outro

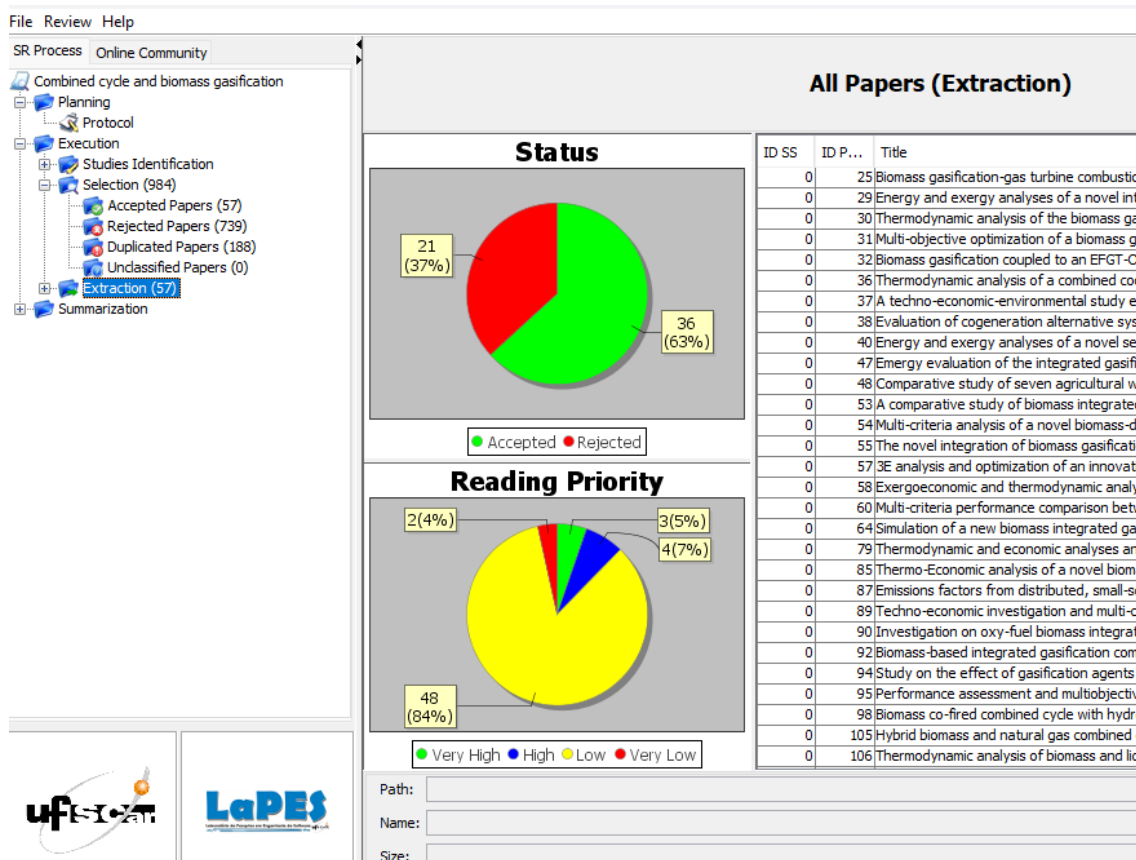


RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOGÁS
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

lado, a etapa de Sumarização oferece uma representação visual das atividades realizadas, por meio de gráficos e recursos similares. A Figura 1 apresenta uma ilustração da interface do *software*.

Figura 1 – Interface do *software* Start



Fonte: Autoria própria

2.2.1 Protocolo da Revisão Sistemática

O protocolo desempenha o papel do planejamento de uma revisão sistemática, constituindo-se na formulação da pergunta de pesquisa, definição dos objetivos, identificação de palavras-chave, elaboração de *strings* de busca e estabelecimento do método de seleção dos artigos pertinentes (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Neste contexto, o objetivo delineado foi a identificação dos estudos existentes e lacunas a serem preenchidas no contexto de plantas de ciclo combinado que operam em conjunto com um sistema de gaseificação de biomassa. Para esse propósito, foi elaborada a *string* de busca '*Combined Cycle and biomass gasification*' juntamente com algumas palavras-chave iniciais.

Adicionalmente, foram estabelecidos critérios de seleção, compreendendo critérios de inclusão e de exclusão. A determinação desses critérios baseou-se na classificação gerada pelo



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

próprio *software* Start, que ordena os artigos com base na recorrência das palavras-chave previamente inseridas (Classificação de Q1 até Q4).

Os principais elementos do protocolo implementado no *software* Start estão detalhados no Quadro 1.

Quadro 1 – Protocolo do *software* Start

Objetivo	Revisão sistemática a respeito de plantas de ciclo combinado a base de gaseificação de biomassa.
Pergunta principal	O Que já foi estudado e quais as lacunas a serem preenchidas em relação a plantas de ciclo combinado que operam em conjunto com um sistema de gaseificação?
Palavras-Chave	BIGCC; <i>Biomass</i> ; <i>Biomass Gasification</i> ; <i>Combined Cycle</i> ; <i>Combustion</i> ; <i>Efficiency</i> ; <i>Energy</i> ; <i>Energy Analysis</i> ; <i>Exergy</i> ; <i>Exergy Analysis</i> ; <i>Gas Turbine</i> ; <i>Gasification</i> ; <i>Hybrid</i> ; <i>Hybrid Energy</i> ; <i>Multi-Objective Optimization</i> ; <i>Multigeneration</i> ; <i>Natural Gas</i> ; <i>Optimization</i> ; <i>Power Generation</i> ; <i>Rankine Cycle</i> ; <i>Renewable Energy</i> ; <i>Sensitivity Analysis</i> ; <i>Simulation</i> ; <i>Sugarcane Bagasse</i> ; <i>Supplementary Firing</i> ; <i>Syngas</i> ; <i>Thermodynamic Analysis</i> ; <i>Thermodynamic Modelling</i> ; <i>Waste Heat Recovery</i> ;
Definição de Critérios de Seleção de Fontes	Artigos de Pesquisa
Lista de Fontes	<i>Science Direct</i> ; <i>Scopus</i> ; <i>Web of Science</i>
Critério de seleção do estudo	Artigos classificados como Q1, Q2 e Q3 (Inclusão) Artigos classificados como Q4 (Exclusão)
Campos do Formulário de Extração de Dados	O que foi feito? Como foi feito? Quais os principais resultados obtidos?

Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Processamento dos artigos

Após a definição do protocolo, é realizada a busca e seleção dos estudos relevantes, conduzidas por meio da aplicação da *string* de busca especificada em diversas bases de dados. As plataformas consultadas que apresentaram resultados significativos foram: *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*.

A funcionalidade da Frequência de Palavras-chave, disponível no Start, oferece aos pesquisadores a capacidade de complementar os termos e palavras-chave ausentes nas análises iniciais. Esta ferramenta identifica as palavras-chave presentes nos artigos e registra sua frequência de ocorrência, organizando-as em ordem de predominância. Ademais, oferece a possibilidade de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

verificar a frequência das palavras-chave específicas nos estudos aceitos ou rejeitados durante a etapa inicial de seleção (Fabbri *et al.*, 2016).

Esta frequência de palavras-chave também é empregada pelo *software* para categorizar os artigos em Q1, Q2, Q3 e Q4. Em seguida, as palavras-chave mais frequentes e pertinentes aos objetivos da revisão foram incorporadas ao protocolo, seguidas por uma nova categorização dos artigos pelo *software*. Os artigos designados à categoria Q4, uma classificação estabelecida como critério de exclusão, foram rejeitados por meio de uma análise manual.

Por outro lado, os demais artigos avançaram para a fase subsequente de seleção, a qual implicou na avaliação dos títulos e resumos pelo autor. Através dessa avaliação, os artigos foram incluídos ou excluídos de acordo com a qualidade metodológica e relevância para a questão em análise. Os artigos aceitos prosseguiram para a etapa subsequente, denominada extração.

A representação da interface que mostra a análise de frequência das palavras-chave e a janela que apresenta as principais informações do artigo, extraídas pelo *software*, são exibidas na Figura 2.

Figura 2 – Interface do Start (Etapa Execução)

Fonte: Autoria própria

Os artigos selecionados foram acessados por meio de um link fornecido pelo *software*, direcionando diretamente para o respectivo site da base de dados onde foram disponibilizados. Posteriormente, cada artigo foi examinado, e suas informações essenciais foram extraídas, incluindo o escopo do estudo, a metodologia empregada e os principais resultados alcançados. Esses dados foram sintetizados de maneira concisa e sistemática, visando facilitar a resposta da pergunta central da pesquisa.

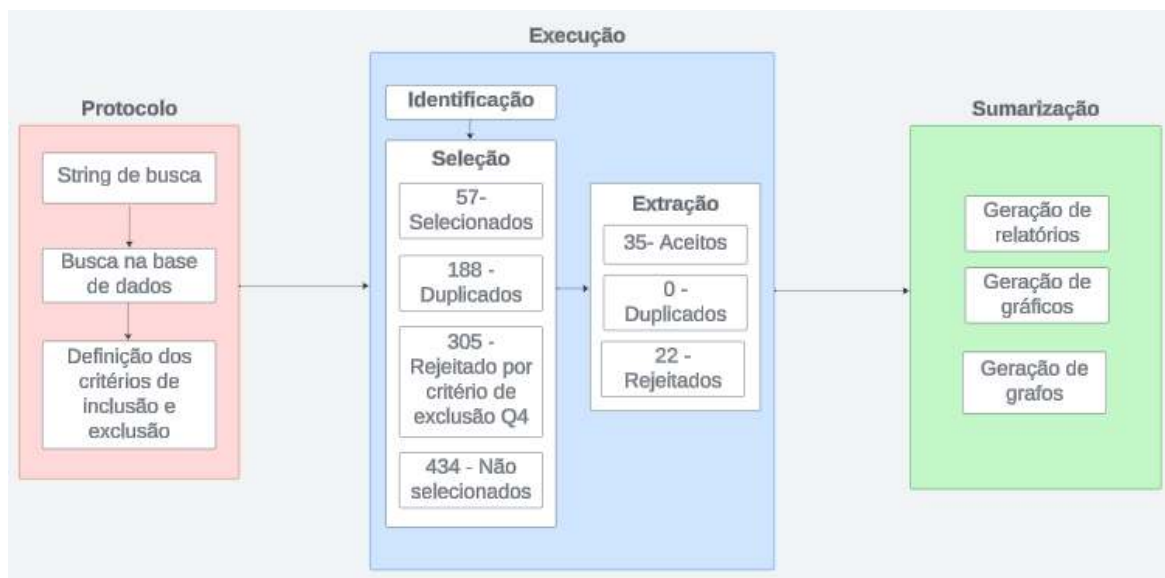


RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

A Figura 3 apresenta um organograma em que as principais funções e etapas do *software* são apresentadas em ordem sequencial, com o quantitativo de artigos classificados em cada parte do trabalho.

Figura 3 – Organograma da pesquisa feita no *software* Start

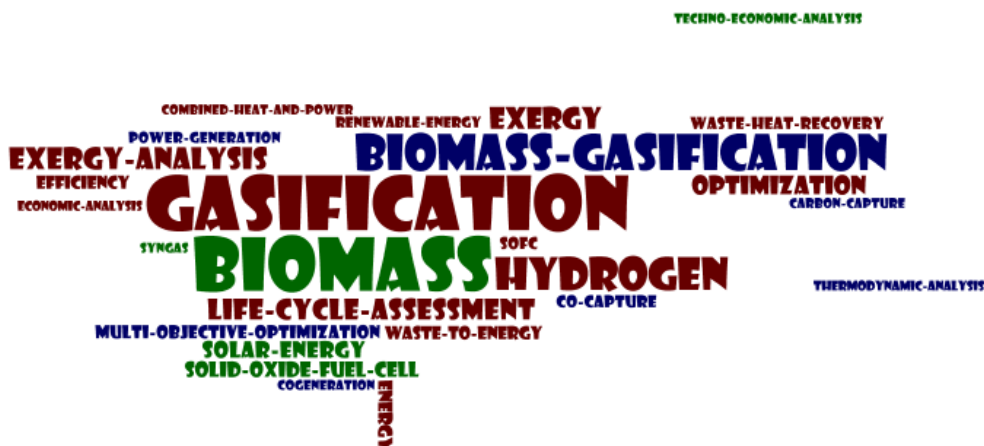


Fonte: Autoria própria

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta a nuvem de palavras-chave gerada pelo *software*, em que as palavras-chave com maior recorrência nos artigos são destacadas, mostrando quais os assuntos de maior relevância relacionados ao tema.

Figura 4 – Nuvem de palavras-chave



Fonte: Autoria própria



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

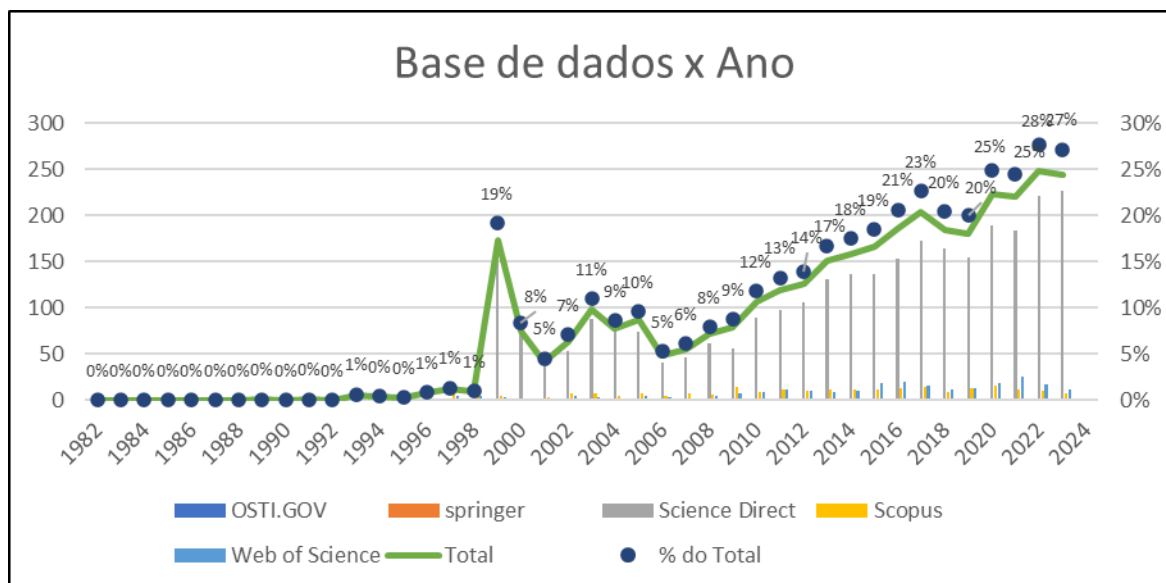
REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

É possível observar que as palavras eficiência, análise exergética, otimização e avaliação do ciclo de vida aparecem, sendo essas as principais metodologias utilizadas pelos artigos pesquisados nas análises dos sistemas de energia. Além disso, elementos como hidrogênio, captura de carbono e célula de combustível de óxido sólido (SOFC, em inglês) também aparecem, mostrando que esses componentes estão presentes em grande parte das plantas propostas nas pesquisas desenvolvidas sobre o assunto.

A Figura 5 ilustra a distribuição dos artigos de acordo com as bases de dados consultadas ao longo dos anos de 1980 a 2022. No gráfico são apresentados também as porcentagens de cada ano em relação ao total. A base *Science Direct* retornou a maior quantidade de artigos, seguido pela *Scopus* e *Web of Science*. É possível verificar que a publicação de artigos sobre o assunto foi crescente principalmente a partir de 1998, mostrando que o assunto tratado tem aumentado sua relevância atualmente.

Para essa pesquisa, os artigos selecionados foram os artigos originais publicados de 2018 até 2023, totalizando 984 artigos.

Figura 5 – Distribuição dos artigos nas bases de dados ao longo dos anos



Fonte: Autoria própria

3.1 Ciclos combinados a base de gaseificação

Os ciclos combinados baseados em gaseificação são sistemas que empregam um ciclo *Brayton* alimentado pelo gás de síntese gerado a partir de um processo de gaseificação de biomassa, diretamente inserido na turbina a gás. Complementarmente, o restante do ciclo é constituído por um ou mais ciclos secundários (*bottoming*), os quais aproveitam a energia residual proveniente dos



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

gases de exaustão da turbina a gás. Estes ciclos podem ainda integrar outros componentes, como sistemas de captura de carbono e armazenamento de ar comprimido.

Neste estudo de revisão, os artigos foram categorizados de acordo com a configuração do ciclo secundário adotado ou a inclusão desses elementos adicionais. Os trabalhos iniciais analisados descrevem um ciclo composto por uma configuração de turbina a gás combinada com um ciclo *Rankine* como sistema secundário.

3.1.1 Ciclos de turbina a gás e vapor para a geração de energia elétrica

O Quadro 2 apresenta um resumo dos artigos que estudaram ciclos combinados tradicionais de geração de energia a partir de um gaseificador de biomassa.

Quadro 2 – Síntese dos trabalhos com ciclos combinados de turbina a gás e vapor a partir da gaseificação

Trabalho	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Vera <i>et al.</i> (2018)	Ciclo combinado a base de gaseificação com Ciclo Rankine Orgânico.	Análise termodinâmica diante de diferentes condições de operação e fluidos de trabalho do ciclo <i>Rankine</i> para maximizar a geração de eletricidade.	A vazão mássica de biomassa de 217 kg/s resultou em uma produção superior a 200 kWe e eficiência elétrica de 20,7%. O melhor fluido de trabalho foi o isopentano.
Ge <i>et al.</i> (2019)	Ciclo combinado a base de gaseificação.	Realização de simulação do sistema com o software Aspen Plus e verificação experimental do sistema de gaseificação; Análise de sensibilidade sobre os efeitos da temperatura de gaseificação e da relação vapor-biomassa; Proposição e investigação de cinco esquemas de otimização.	A simulação e os experimentos do reator resultaram em um sistema com eficiência energética de 33,51%, identificando uma temperatura ótima de gaseificação de 860°C e razão vapor/biomassa de 1,0 por meio da análise de sensibilidade.
Niu <i>et al.</i> (2021).	Ciclo combinado a base de gaseificação.	Avaliação do desempenho sob diversas condições operacionais; Estudo de parâmetros para otimização do sistema.	A razão de ar em excesso para a turbina a gás deve ser inferior a 3,5 para manter a temperatura de entrada projetada. Além disso, a razão de equivalência do processo de gaseificação pode ser diminuída e a qualidade do gás de síntese pode ser melhorada por meio do ajuste da porcentagem de oxigênio do ar enriquecido.
Cao <i>et al.</i> (2021)	Ciclo combinado a base de gaseificação com	Avaliação termoeconômica; Otimização Numérica.	As razões de pressão do compressor foram identificadas como as principais variáveis de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

	Ciclo Rankine Orgânico.		projeto que afetam o desempenho do ciclo; O hélio foi considerado o melhor fluido do ponto de vista econômico, enquanto o CO ₂ foi considerado o melhor fluido do ponto de vista termodinâmico.
Hai <i>et al.</i> (2023)	Ciclo combinado a base de gaseificação.	Análise de energia, exergia e modelagem econômica; Efeito das variáveis de decisão no sistema; Otimização multiobjetivo.	O aumento da temperatura de gaseificação e da umidade da biomassa resultou em maior potência produzida, eficiência exergética e taxa de custo total do sistema; O aumento na temperatura de entrada da turbina levou a um incremento na potência do ciclo a gás, mas reduziu a do ciclo de vapor.
Kartal e Özveren (2023)	Ciclo combinado a base de gaseificação com Ciclo Kalina.	Análise energética e exergética; Avaliação do efeito de diferentes condições de operação do processo de gaseificação;	A maior destruição de exergia ocorre no gaseificador; A relação de equivalência que gerou maiores eficiências variou de 0,23 a 0,25, e o teor de CO ₂ no agente gaseificante ficou na faixa de 5 a 7%; Maiores teores de amônia no fluido de trabalho melhoram a eficiência.

Fonte: Autoria própria

A maioria dos estudos focalizou a análise termodinâmica e o impacto dos principais parâmetros operacionais da planta e do sistema de gaseificação. Os ciclos que utilizaram um ciclo orgânico Rankine e o ciclo Kalina também examinaram o desempenho de diferentes fluidos de trabalho. A principal meta dos estudos foi a otimização numérica e a investigação das condições ideais de operação dos sistemas.

3.1.2 Ciclos de turbina a gás e vapor com captura de carbono

Sistemas que utilizam captura de carbono têm ganhado destaque ao longo das últimas décadas, representando uma alternativa viável para reduzir as emissões de carbono provenientes das usinas de geração de energia. A relevância desses sistemas se torna ainda maior diante da crescente necessidade de utilização de energias renováveis (Ghiami; Khallaghi; Borhani, 2021). A tecnologia de captura de carbono pode levar a emissões quase zero em sistemas alimentados por combustíveis fósseis, e até mesmo alcançar emissões negativas em sistemas que utilizam biomassa como fonte energética (Mohamed *et al.*, 2021).

O Quadro 3 apresenta as principais informações dos artigos revisados que estudaram o acoplamento das plantas com um sistema de captura de carbono.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

Quadro 3 – Síntese dos artigos com ciclos combinados a base de gaseificação e captura de carbono

Trabalho	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Zang <i>et al.</i> (2018)	Ciclos combinado de gaseificação integrado com captura de carbono.	Análise exérgica para examinar o impacto dos avanços recentes no desempenho dos ciclos combinados de gaseificação integrada.	A análise exérgica revelou eficiências que variaram de 22,3% a 37,1%, destacando a sensibilidade desses sistemas à temperatura inicial e à razão de pressão na turbina a gás, com menos influência da temperatura e pressão na turbina a vapor.
Xiang <i>et al.</i> (2019)	Ciclo combinado de gaseificação integrado com combustão em atmosfera de oxigênio e captura de carbono.	Investigação dos efeitos da temperatura e pressão de gaseificação na composição do gás de síntese e no desempenho do sistema e identificação dos parâmetros operacionais ótimos; Análise energética e exérgica.	O aumento da pressão e da temperatura leva a uma menor produção de H ₂ e CO. O aumento da pressão causa um aumento na eficiência do sistema, que flutua com a variação da temperatura. A temperatura e pressão ótimas de gaseificação foram encontradas como sendo de 1000°C e 3,5 Mpa, com eficiências energéticas e exérgicas de 35,41% e 31,21%, respectivamente.
Ghiat <i>et al.</i> (2020)	Ciclo combinado a base de gaseificação integrado com captura e armazenamento de carbono.	Análises termodinâmicas, termoeconômicas e ambientais; Avaliação da captura de carbono baseada em carbonato de potássio como solvente.	O sistema proposto, com 80% de captura de carbono, tem emissões negativas de CO ₂ e eficiências energética e exérgica globais de 43,8% e 57,2%, respectivamente.
Ebrahimi e Ziabasharhagh (2020)	Ciclo combinado de gaseificação integrada com captura de CO ₂ pré-combustão e um sistema de refrigeração por absorção.	Análise exérgica; Efeitos da taxa de captura de carbono e da injeção de N ₂ na câmara de combustão da turbina a gás.	A captura de CO ₂ no gás de síntese resultou na redução da taxa de fluxo e na temperatura de entrada da turbina a gás, ao mesmo tempo que aumentou o consumo dos compressores. Os principais produtos obtidos foram o gás natural liquefeito e o CO ₂ comprimido, alcançando uma eficiência do sistema de 48% com o aumento da taxa de vapor. As maiores perdas exérgicas foram observadas no gaseificador, na caldeira de recuperação, na câmara de combustão e nos trocadores de calor.
Mohamed <i>et al.</i> (2021)	Ciclo combinado de gaseificação com e sem captura e armazenamento de CO ₂ .	Análises da avaliação do uso de energia, emissões de CO ₂ e custos ao longo do ciclo de vida; Análise de sensibilidade para determinar as variáveis que têm o maior	As usinas a biomassa e armazenamento de CO ₂ resultam em emissões negativas, apesar de apresentar custos mais altos quando comparadas com os sistemas que operam somente a carvão. Os parâmetros que tiveram os maiores efeitos sobre



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

		impacto no ciclo de vida.	o impacto ambiental e o custo do ciclo de vida são o processamento de madeira, mineração e lavagem de carvão, captura de CO ₂ e transporte de biomassa.
Ren, Feng e Wang (2021)	Sistemas ciclo combinado a base de gaseificação baseados em carvão e biomassa com e sem captura e armazenamento de carbono.	Avaliação da eficiência da utilização de recursos e o impacto ambiental, em que a sustentabilidade sob diferentes valores de taxa de CO ₂ é comparada.	Em termos de sustentabilidade, todos os sistemas baseados em gaseificação são superiores aos sistemas de combustão direta de carvão e biomassa, sendo os sistemas a base de biomassa com captura e armazenamento de carbono ainda mais superiores.
Tan <i>et al.</i> (2022)	Ciclo combinado de gaseificação integrado com oxidação e um sistema de captura de carbono.	Investigação dos efeitos das condições de gasificação no desempenho por meio de avaliações termodinâmicas, econômicas e ambientais.	O aumento inicial na quantidade de gás carbônico resultou em um aumento na concentração de monóxido de carbono (CO) nos produtos de gaseificação e depois essa concentração diminuiu. A eficiência máxima de potência alcançada foi de 29,1% sob condições específicas de vazão de gás carbônico, razão de pressão e temperatura de entrada da turbina.

Fonte: Autoria própria

Além das análises convencionais de energia e exergia, os estudos sobre os impactos ambientais foram predominantes nas metodologias analisadas. Isso decorre da importância da captura de carbono como método de redução desses impactos. Além disso, aspectos específicos do processo de captura de carbono foram avaliados por Ghiat *et al.* (2020), enquanto o efeito da taxa de captura no ciclo foi investigado por Ebrahimi e Ziabasharhagh (2020).

3.1.3 Sistemas de geração de energia a base de gaseificação com sistemas de produção de água doce

Os sistemas de dessalinização representam uma alternativa viável para a aproveitamento da energia derivada dos processos de geração energética, especialmente diante da crescente demanda observada em várias regiões (Baccioli *et al.* 2018).

No Quadro 4 são sintetizadas as principais informações dos artigos revisados que aproveitaram a energia residual do ciclo a base de gaseificação por meio de um sistema de produção de água doce.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

Quadro 4 - Síntese dos artigos com ciclos a base de gaseificação e produção de água doce

Trabalho	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Hamrang <i>et al.</i> (2020)	Ciclo combinado a base de gaseificação de biomassa com um sistema de dessalinização com unidades de recuperação de calor.	Análise energética, exergética e econômica.	Aumentar a temperatura de gaseificação resulta em menor geração de energia elétrica. Já o aumento da temperatura de combustão promove um aumento da produção de eletricidade e água doce. A planta é viável do ponto de vista econômico com um período de retorno de 6,75 anos
Hai <i>et al.</i> (2022)	Ciclo combinado a base de gaseificação com sistema de dessalinização de múltiplos efeitos, absorvedor de calor e caldeira de recuperação.	Análise 4E (análise de energia, exergia, ambiental e econômica) e uma otimização multiobjetivo.	O teor de umidade da biomassa, a temperatura de entrada da turbina, a taxa de fluxo da biomassa e a razão de pressão do compressor são os fatores que mais influenciam o desempenho global do sistema. No ponto ótimo, a eficiência total de exergia e as emissões de poluentes são de 28,32% e 0,4797 kg/kWh, respectivamente.
Musharavati <i>et al.</i> (2022)	Sistema de geração de energia a partir de gaseificação integrado a uma unidade de produção de água doce.	Análise termodinâmica e termoeconômica; Otimização multiobjetivo.	O aumento da temperatura de entrada da turbina melhora a potência de saída da turbina, porém reduz a taxa de produção de água. A eficiência exergética ótima foi calculada em 15,61%, mostrando que apenas 12% da exergia química da biomassa é convertida em eletricidade. Adicionalmente, identificou-se que tanto o gaseificador quanto a câmara de combustão são os principais pontos de destruição de exergia.

Fonte: Autoria própria

3.1.4 Ciclos combinados a base de gaseificação de biomassa com armazenamento de ar comprimido

O armazenamento de ar comprimido é uma técnica de armazenamento de energia de grande escala que teve um rápido desenvolvimento nos últimos anos e pode ser aplicado para diversos sistemas de energia (Carriveau *et al.*, 2019). Alguns autores estudaram a integração de ciclos combinados a base de gaseificação com esses sistemas. Esses estudos são apresentados no Quadro 5.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

Quadro 5 - Síntese dos artigos com ciclos a base de gaseificação e armazenamento de ar comprimido

Trabalho	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Razmi <i>et al.</i> (2021)	Ciclo combinado a base de gasificação de biomassa, integrado a um sistema de armazenamento de energia por ar comprimido.	Investigação de três diferentes tipos de biomassa, analisando os efeitos primordiais de parâmetros críticos na composição do gás de síntese e no desempenho termodinâmico do sistema.	O aumento do poder calorífico do gás de síntese está diretamente associado à elevação da temperatura do gaseificador, mas apresenta uma relação inversa com a proporção de vapor em relação à biomassa; A eficiência máxima do gaseificador é obtida a uma temperatura de 960 °C e uma razão de vapor para biomassa de 1.; A variação de temperatura do vapor e do ar não afetou significativamente a composição do gás de síntese.
Lashgari <i>et al.</i> (2022)	Ciclo combinado a base de gasificação de biomassa, integrado a um sistema de armazenamento de energia por ar comprimido.	Avaliação energética, exérgica, econômica, exergoeconômica e ambiental.	O sistema é mais eficiente do que uma usina a biomassa autônoma, sendo que o investimento de implantação é recuperado em um período de 2 anos; O sistema demonstrou a emissão de carbono negativa.
Chang, Wu e Ghadimi (2023)	Ciclo combinado baseado em gaseificação com dois ciclos a vapor e um a gás, além de um processo de condensação de gases de combustão e um sistema de armazenamento de energia de ar comprimido.	Avaliação termodinâmica, exergoeconômica e ambiental; Otimização do sistema.	A otimização multiobjetivo promoveu um aumento na eficiência exérgica de cerca de 15% e uma diminuição do custo exérgico de 17,3%. Além disso, a usina apresentou um recurso de carbono negativo e viabilidade econômica razoável. O gaseificador tem a maior taxa de destruição exérgica (47%), seguido pela unidade de armazenamento de ar comprimido (35%).

Fonte: Autoria própria

3.1.5 Ciclos de geração de energia a gaseificação com Ciclo de CO₂ supercrítico

Chen *et al.* (2022) e Cao *et al.* (2022) utilizaram ciclos *Brayton* com CO₂ supercrítico como fluido de trabalho como alternativa ao ciclo *Rankine* utilizado na maioria dos trabalhos similares. Esses trabalhos estão sumarizados no Quadro 6.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

Quadro 6 – Síntese dos trabalhos de geração de energia a gaseificação com Ciclo de CO₂ supercrítico

Trabalho	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Chen <i>et al.</i> (2022)	Sistema de geração de energia a base de gaseificação de biomassa integrado com um ciclo de CO ₂ supercrítico e geração de energia a carvão.	Análises termodinâmicas e econômicas.	A biomassa pode contribuir com 3,1% da geração de energia total; A eficiência energética alcançou 41,39% e 1,07 anos são necessários para recuperar o capital de investimento.
Cao <i>et al.</i> (2022)	Ciclo de combustão a gás alimentado por gaseificação de biomassa, composto por uma a turbina a gás convencional combinada com um ciclo <i>Brayton</i> fechado um Ciclo <i>Rankine</i> orgânico. O sistema é integrado com o processo de regaseificação de GNL.	Análise termodinâmica e econômica, com foco na eficiência exergética; Otimização numérica.	As razões de pressão dos compressores exercem grande influência no desempenho do sistema, alcançando uma eficiência exergética ótima de 43,51%.; As razões de pressão do compressor que maximizam a eficiência exergetica não são as mesmas que minimizam o custo nivelado de eletricidade; A câmara de combustão e o gaseificador representam mais de 50% da destruição exergética e custos gerais do sistema, enquanto as turbinas apresentam os custos de investimento mais elevados.

Fonte: Autoria própria

3.2 Ciclos combinados a base de gás natural acoplados com sistema de gaseificação

Atualmente, a transição da utilização de combustíveis fósseis para combustíveis renováveis em sistemas de geração de energia é considerado um processo gradual e a integração de sistemas convencionais com fontes renováveis é considerado uma técnica atrativa nesse processo (Morrone *et al.*, 2022). Sistemas de energia baseados em biomassa tem eficiências gerais baixas, variando de 15 a 30% (Soltani *et al.*, 2013).

A integração de sistemas a base de combustíveis fósseis com a fontes alternativas promove uma produção de energia superior em comparação com sistemas baseados exclusivamente na combustão de biomassa e, paralelamente, possibilitam uma utilização mais eficiente e econômica de combustíveis fósseis nos setores de geração de energia (Ghiami; Khallaghi; Borhani, 2021).

Biomassa pode ser inserido em plantas de ciclo combinado de diversas maneiras diferentes, tanto no ciclo principal quanto no ciclo secundário (Pihl Erik *et al.*, 2010). Morrone *et al.* (2022) comparou e realizou a otimização de dois sistemas de ciclo combinado, em que um dos sistemas utilizou o gás de síntese em um sistema de co-combustão (*cofiring*) com gás natural, enquanto o outro foi alimentado com gás natural na turbina a gás e com combustão direta de biomassa em um



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

sistema de pós-combustão. O autor destacou os efeitos da participação de biomassa nos indicadores de desempenho, como eficiência global, de biomassa e emissões de dióxido de carbono. O sistema de pós-combustão de biomassa demonstrou ser o mais adequado, com uma taxa de alimentação de biomassa de 35,3% e uma eficiência de biomassa de 41,8%.

Exemplos de artigos que empregaram a gaseificação em um ciclo de pós-combustão são Ren *et al.* (2023) e Bai *et al.* (2023) e estão sumarizados no Quadro 7.

Quadro 7 - Ciclos a base de ciclo combinado a gás natural com sistema de gaseificação de pós-queima

Trabalho	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Ren <i>et al.</i> (2023)	Sistema de geração de energia combinado baseado em uma turbina a gás que opera com gás natural, um sistema de gaseificação de pós-combustão, um ciclo <i>Rankine</i> orgânico e um ciclo de refrigeração por absorção.	Análise 4E, estudo paramétrico e otimização multiobjetiva, fundamentada em métricas exergéticas, exergoeconômicas e exergoambientais.	Sob condições de projeto, revelou-se uma eficiência térmica de 68,88%, eficiência exergética de 42,10% e custo nivelado de exergia de 21,16 \$/GJ. A análise identificou a câmara de combustão como o componente com a maior taxa de destruição exergética, enquanto a eficiência térmica e exergética aumentam com certos ajustes nas variáveis de entrada do sistema.
Bai <i>et al.</i> (2023)	Ciclo de turbina a gás, complementado por um processo de gaseificação de biomassa com pós-combustão, dois ciclos orgânicos <i>Rankine</i> e uma unidade de refrigeração.	Análise termodinâmica, exergoambiental e exergoeconômica; Otimização multiobjetivo.	O sistema produziu 13 MW de energia elétrica e 7,6 MW de carga de resfriamento, exibindo eficiências térmica e exergética de 70,1% e 42,85%, respectivamente. Observou-se uma redução potencial de 9,4% no custo nivelado de energia e de 16,8% no impacto ambiental por meio da otimização. Esta otimização também prevê um aumento na produção de energia elétrica e carga de refrigeração.

Fonte: Autoria própria

Outros artigos realizaram a inserção da energia de gaseificação nos ciclos de turbina a gás por meio do ciclo secundário, onde o gás de síntese foi queimado em conjunto com o gás natural na turbina a gás, constituindo um sistema de co-combustão (*cofiring*). Esses artigos são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Síntese dos artigos com sistemas de geração de energia a partir do *cofiring* de gás natural e gás de síntese

Trabalho(s)	Ciclo	O que foi feito	Principais resultados
Zhang <i>et al.</i> (2018) e Zhang <i>et al.</i> (2019)	Ciclo combinado com <i>cofiring</i> de gás natural e gás de síntese, sistema de	Desempenho exergético e exergoeconômico do sistema sob três	A introdução de gás natural melhora a eficiência energética e reduz significativamente o custo nivelado de energia. A eficiência



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

	resfriamento e energia geotérmica.	condições diferentes; Análise da influência de parâmetros-chave sobre o custo unitário de exergia dos produtos.	exergética aumenta inicialmente com o aumento do gás natural e depois se estabiliza. Quando a razão da massa de gás aumenta, os custos unitários de exergia dos produtos diminuem significativamente, exceto a eletricidade gerada pela turbina a vapor.
Asgari, Khoshbakhti Saray e Mirmasoumi (2020)	Sistema de trigerção que inclui um ciclo de turbina a gás, uma unidade de gaseificação, uma unidade de aquecimento e um ciclo de refrigeração por absorção de efeito simples.	Análise termodinâmica; Estudo detalhado do desempenho sazonal do sistema.	No cenário em que a taxa de resíduos foi de 1,5 kg/s, a geração de energia elétrica, aquecimento e resfriamento foi de 27,43 MW, 40 MW e 34,15 MW, respectivamente com uma taxa de utilização de energia anual e a eficiência anual de exergia de 71,25% e 30,79%, respectivamente.
Ghiami, Khallaghi e Borhani (2021)	Sistema de combustão gás natural e gás de síntese em oxigênio puro por estágios.	Desempenho termodinâmico; Análise tecnoeconômica.	O ciclo proposto mostrou alcançar uma eficiência líquida de 42,6% e uma taxa líquida de remoção de CO ₂ de 27 kgCO ₂ /MWh. Além disso, o ciclo atingiu um custo nivelado de energia competitivo, mesmo que este aumente com o incremento da taxa de fluxo de biomassa.
Cao <i>et al.</i> (2023)	Ciclo combinado de gaseificação e gás natural acoplado com armazenamento de energia em ar líquido.	Análise termodinâmica, exergética; Análise de sensibilidade do sistema de armazenamento de energia em ar líquido.	A turbina a gás e o gaseificador foram identificadas como as principais fontes de destruição exergética. À medida que a taxa de queima mista aumenta para 0,9, a eficiência elétrica do sistema com armazenamento aumenta 5,6% em comparação com o sistema sem armazenamento de energia.
Tan <i>et al.</i> (2023)	Ciclo combinado de gás natural integrado à gasificação de biomassa por meio de um sistema de <i>cofiring</i> com oxigênio puro.	Avaliações econômicas e ambientais; Avaliação da proporção de mistura de biomassa e a eficiência energética global sob diferentes condições de gaseificação.	A proporção de mistura de biomassa pode atingir um máximo de 0,33. O aumento da temperatura de gaseificação de 650°C para 950°C causa um aumento significativo na eficiência energética. Além disso, a maior eficiência energética do sistema foi de 0,52 com uma proporção de mistura de biomassa de 0,10.
Yang <i>et al.</i> (2019)	Sistema de geração composto por um gaseificador, unidade de condicionamento de gás, motor de	- Análises de exergia e custo exergoeconômico; Avaliação Sazonal; Análise de	A análise indicou que a ênfase deve ser colocada no Gaseificador e no motor de combustão interna para melhorar seu desempenho. O custo unitário exergoeconômico



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

	combustão interna, absorvedor de calor/resfriador e trocador de calor.	sensibilidade	dos produtos aumenta linearmente com o aumento dos preços dos combustíveis e diminui de forma não linear com o aumento da vida útil e do coeficiente de operação.
Moharamian <i>et al.</i> (2018a)	Ciclo combinado a base de gás natural e gaseificação: sistema de <i>cofiring</i> .	Análises de exergia e exergoeconomia com e sem injeção de hidrogênio.	Redução de 46% na taxa de fluxo de gás natural com a injeção de hidrogênio e uma correspondente diminuição de 36% na eficiência energética da planta e de 37% na eficiência exergética.
(Moharamian <i>et al.</i> (2018b)	Ciclo combinado a base de gás natural e gaseificação: sistema de pós-combustão.	Análises de exergia e exergoeconomia com e sem injeção de hidrogênio.	A injeção de hidrogênio resultou em 67% menos consumo de combustíveis fósseis e 19% menos emissões de CO ₂ , embora também tenha ocorrido uma diminuição da eficiência energética e exergética. Em ambas as plantas, a injeção de hidrogênio reduziu, porém, a destruição total de exergia, a perda total de exergia e os custos econômicos unitários totais.
Laleh <i>et al.</i> (2023)	Ciclo combinado de <i>cofiring</i> de gás natural e gás de síntese e sistema de produção de hidrogênio por meio de eletrólise de membrana de troca de prótons.	Análises de energia e exergia.	A injeção de hidrogênio reduziu o consumo de gás natural em cerca de 33% e as emissões de CO ₂ em cerca de 11%, além de outros benefícios ambientais. A eficiência energética e exergética do sistema foi determinada, atingindo aproximadamente 58% e 52%, respectivamente, para o layout de produção de hidrogênio, e cerca de 51% e 45%, respectivamente, para o layout de produção e injeção de hidrogênio para redução do uso de gás natural.

Fonte: Autoria própria

Entre os trabalhos que apresentaram um ciclo combinado a base de gás natural acoplado com um sistema de gaseificação, poucos avaliaram diferentes configurações do aproveitamento de biomassa, focando somente em uma configuração. A configuração mais utilizada foi a de co-combustão de gás natural e gás de síntese, sendo a maioria com análises termodinâmicas e exergéticas. Além disso, alguns trabalhos produziram exclusivamente ou focaram mais seus esforços em análises termoeconômicas.

4 CONSIDERAÇÕES

A revisão bibliográfica mostra que o campo de estudo ainda é muito recente, sendo o maior volume de trabalhos produzido nos últimos 10 anos. Entre os trabalhos de ciclo combinado a base de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

gaseificação, muitos artigos realizaram análises energéticas e exergéticas, além de análises paramétricas para avaliar o desempenho do ciclo diante de diferentes condições de operação. Adicionalmente, a captura de carbono foi uma tecnologia presente em diversos trabalhos, mostrando-se um tópico em relevância nos últimos anos.

Entre os trabalhos que estudaram ciclos combinados a base de gás natural acoplados com um sistema de gaseificação, a configuração de co-combustão de gás natural e gás de síntese predominou, com a maioria dos resultados focados em análises termodinâmicas e exergéticas. As pesquisas exploradas indicam um campo de estudo promissor, mas muitas delas ainda carecem de otimização numérica, método que consiste em algoritmos cuja função é maximizar ou minimizar uma função. Nesse caso, a otimização poderia ser utilizada para identificar configurações ideais e proporções de biomassa que maximizem a eficiência e a economia do sistema.

Em conclusão, o artigo apresentou uma análise das recentes contribuições a respeito do tema, analisando quais foram as principais configurações de ciclos estudadas e as principais análises realizadas pelos autores. É possível identificar por meio de uma análise mais profunda quais são as lacunas existentes no campo de pesquisa e quais as possíveis contribuições que poderiam ser realizadas.

REFERÊNCIAS

ASGARI, N.; KHOSHBAKHTI SARAY, R.; MIRMASOUMI, S. Energy and exergy analyses of a novel seasonal CCHP system driven by a gas turbine integrated with a biomass gasification unit and a LiBr-water absorption chiller. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 220, n. January, p. 113096, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113096. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113096>.

BACCIOLI, A.; ANTONELLI, M.; DESIDERI, U.; GROSSI, A. Thermodynamic and economic analysis of the integration of Organic Rankine Cycle and Multi-Effect Distillation in waste-heat recovery applications. **Energy**, [S. l.], v. 161, p. 456–469, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.150. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.150>.

BAI, Li; ASADOLLAHZADEH, Muhammad; CHAUHAN, Bhupendra Singh; ABDRABOH, Mostafa; FAYED, Mohamed; AYED, Hamdi; MOULDI, Abir; MAREFATI, Mohammad. A new biomass-natural gas dual fuel hybrid cooling and power process integrated with waste heat recovery process: Exergoenvironmental and exergoeconomic assessments. **Process Safety and Environmental Protection**, [S. l.], v. 176, n. February, p. 867–888, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.06.037. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.037>.

BEHESHTI, S. M.; GHASSEMI, H.; SHAHSAVAN-MARCADEH, R. Process simulation of biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 94, p. 345–352, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.01.060. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.060>.

CAO, Yan; DHAHAD, Hayder A.; HUSSEN, Hasanen M.; ATTIA, El Awady; RASHIDI, Shima; SHAMSELDIN, Mohamed A.; FAHAD ALMOJIL, Sattam; IBRAHIM ALMOHANA, Abdulaziz; FAHMI ALALI, Abdulrhman. Techno-economic investigation and multi-criteria optimization of a novel combined cycle based on biomass gasifier, S-CO₂ cycle, and liquefied natural gas for cold exergy usage. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 52, n. PB, p. 102187, 2022.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

DOI: 10.1016/j.seta.2022.102187. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102187>.

CAO, Yan; DHAHAD, Hayder A.; TOGUN, Hussein; ANQI, Ali E.; FAROUK, Naeim; FARHANG, Babak. Proposal and thermo-economic optimization of using LNG cold exergy for compressor inlet cooling in an integrated biomass fueled triple combined power cycle. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 46, n. 29, p. 15351–15366, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.111. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.111>.

CAO, Yihuai; WANG, Jiangjiang; LI, Yiming; FU, Wenfeng; LIU, Boxiang. Thermodynamic analysis of biomass and liquefied natural gas complementary CCHP system with liquid air energy storage. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 283, n. February, p. 116925, 2023. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116925. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116925>.

CARRIVEAU, Rupp; EBRAHIMI, Mehdi; TING, David S. K.; MCGILLIS, Andrew. Transient thermodynamic modeling of an underwater compressed air energy storage plant: Conventional versus advanced exergy analysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 31, n. December 2018, p. 146–154, 2019. DOI: 10.1016/j.seta.2018.12.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.003>.

CHANG, Le; WU, Zhixin; GHADIMI, Noradin. A new biomass-based hybrid energy system integrated with a flue gas condensation process and energy storage option: An effort to mitigate environmental hazards. **Process Safety and Environmental Protection**, [S. l.], v. 177, n. June, p. 959–975, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.07.045. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.045>.

CHEN, Heng; LU, Di; AN, Jizhen; QIAO, Shichao; DONG, Yuehong; JIANG, Xue; XU, Gang; LIU, Tong. Thermo-Economic analysis of a novel biomass Gasification-Based power system integrated with a supercritical CO₂ cycle and a Coal-Fired power plant. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 266, n. June, p. 1–18, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115860.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, Sérgio Luis Da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: **8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto - CNGDP 2011**, [S. l.], n. 1998, p. 1–12, 2011. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cbgdp2011/downloads/9149.pdf>.

EBRAHIMI, Armin; ZIABASHARHAGH, Masoud. Energy and exergy analyses of a novel integrated process configuration for tri-generation heat, power and liquefied natural gas based on biomass gasification. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 209, n. February, p. 112624, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112624. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112624>.

FABBRI, Sandra; SILVA, Cleiton; HERNANDES, Elis; OCTAVIANO, Fábio; DI THOMMAZO, André; BELGAMO, Anderson. Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process. **ACM International Conference Proceeding Series**, [S. l.], v. 01-03-June, 2016. DOI: 10.1145/2915970.2916013.

GE, Huijun; ZHANG, Haifeng; GUO, Wanjun; SONG, Tao; SHEN, Laihong. System simulation and experimental verification: Biomass-based integrated gasification combined cycle (BIGCC) coupling with chemical looping gasification (CLG) for power generation. **Fuel**, [S. l.], v. 241, n. August 2018, p. 118–128, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.11.091. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.091>.

GHIAMI, Shamsoddin; KHALLAGHI, Navid; BORHANI, Tohid N. Techno-economic and environmental assessment of staged oxy-co-firing of biomass-derived syngas and natural gas. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 243, n. June, p. 114410, 2021. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114410. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114410>.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

GHIAT, Ikhlas; ALNOUSS, Ahmed; MCKAY, Gordon; AL-ANSARI, Tareq. Biomass-based integrated gasification combined cycle with post-combustion CO₂ recovery by potassium carbonate: Techno-economic and environmental analysis. **Computers and Chemical Engineering**, [S. l.], v. 135, p. 106758, 2020. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.106758. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106758>.

HAI, Tao; ALSHAHRI, Abdullah H.; MOHAMMED, Amin Salih; SHARMA, Aman; ALMUJIBAH, Hamad R.; MOHAMMED METWALLY, Ahmed Sayed; ULLAH, Mirzat. Performance assessment and multiobjective optimization of a biomass waste-fired gasification combined cycle for emission reduction. **Chemosphere**, [S. l.], v. 334, n. May, p. 138980, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138980. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138980>.

HAI, Tao; DHAHAD, Hayder A.; ZHOU, Jincheng; ATTIA, El Awady; KH, Teeba Ismail; SHAMSELDIN, Mohamed A.; ALMOJIL, Sattam Fahad; ALMOHANA, Abdulaziz Ibrahim; ALALI, Abdulrhman Fahmi. The novel integration of biomass gasification plant to generate efficient power, and the waste recovery to generate cooling and freshwater: A demonstration of 4E analysis and multi-criteria optimization. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 53, n. PC, p. 102588, 2022. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102588. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102588>.

HAMRANG, Farzad; SHOKRI, Afshar; SEYED MAHMOUDI, S. M.; EHGAGHI, Biuk; ROSEN, Marc A. Performance analysis of a new electricity and freshwater production system based on an integrated gasification combined cycle and multi-effect desalination. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 12, n. 19, p. 1–29, 2020. DOI: 10.3390/su12197996.

KARTAL, Furkan; ÖZVEREN, Uğur. Energy and exergy analysis of entrained bed gasifier/GT/Kalina cycle model for CO₂ co-gasification of waste tyre and biochar. **Fuel**, [S. l.], v. 331, n. September 2022, 2023. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125943.

LASHGARI, Fatemeh; BABAEI, Seyed Mostafa; PEDRAM, Mona Zamani; ARABKOOHSAR, Ahmad. Comprehensive analysis of a novel integration of a biomass-driven combined heat and power plant with a compressed air energy storage (CAES). **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 255, n. January, p. 115333, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115333. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115333>.

LI, Xuhao; ZHONG, Kunyu; FENG, Li. Machine learning-based metaheuristic optimization of an integrated biomass gasification cycle for fuel and cooling production. **Fuel**, [S. l.], v. 332, n. P1, p. 125969, 2023. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125969. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125969>.

MOHAMED, Usama; ZHAO, Ying jie; YI, Qun; SHI, Li juan; WEI, Guo qing; NIMMO, William. Evaluation of life cycle energy, economy and CO₂ emissions for biomass chemical looping gasification topower generation. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 176, p. 366–387, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.067. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.067>.

MOHARAMIAN, Anahita; SOLTANI, Saeed; ROSEN, Marc A.; MAHMOUDI, S. M. S. Advanced exergy and advanced exergoeconomic analyses of biomass and natural gas fired combined cycles with hydrogen production. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 134, n. September 2017, p. 1–11, 2018. a. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.103. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.103>.

MOHARAMIAN, Anahita; SOLTANI, Saeed; ROSEN, Marc A.; MAHMOUDI, S. M. S.; MOROSUK, Tatiana. Exergoeconomic analysis of natural gas fired and biomass post-fired combined cycle with hydrogen injection into the combustion chamber. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 180, p.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares, Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

450–465, 2018. b. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.156. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.156>.

MORRONE, Pietropaolo; AMELIO, Mario; ALGIERI, Angelo; PERRONE, Diego. Hybrid biomass and natural gas combined cycles: Energy analysis and comparison between different plant configurations. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 267, n. June, p. 115874, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115874. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115874>.

MUSHARAVATI, Farayi; KHOSHNEVISAN, Alireza; ALIRAHMI, Seyed Mojtaba; AHMADI, Pouria; KHANMOHAMMADI, Shoaib. Multi-objective optimization of a biomass gasification to generate electricity and desalinated water using Grey Wolf Optimizer and artificial neural network. **Chemosphere**, [S. l.], v. 287, n. P2, p. 131980, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131980. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131980>.

NIU, Miaomiao; XIE, Jun; LIANG, Shaohua; LIU, Liheng; WANG, Liang; PENG, Yu. Simulation of a new biomass integrated gasification combined cycle (BIGCC) power generation system using Aspen Plus: Performance analysis and energetic assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 46, n. 43, p. 22356–22367, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.076. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.076>.

PIHL ERIK, E.; HEYNE, Stefan; THUNMAN, Henrik; JOHNSON, Filip. Highly efficient electricity generation from biomass by integration and hybridization with combined cycle gas turbine (CCGT) plants for natural gas. **Energy**, [S. l.], v. 35, n. 10, p. 4042–4052, 2010. DOI: 10.1016/j.energy.2010.06.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.008>.

RAZMI, Amir Reza; HEYDARI AFSHAR, Hasan; POURAHMADIYAN, Ali; TORABI, M. Investigation of a combined heat and power (CHP) system based on biomass and compressed air energy storage (CAES). **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 46, n. April, 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101253.

REN, Jie; QIAN, Zuoqin; FEI, Chunguang; LU, Ding; ZOU, Yincui; XU, Chen; LIU, Lu. Thermodynamic, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of a combined cooling and power system for natural gas-biomass dual fuel gas turbine waste heat recovery. **Energy**, [S. l.], v. 269, n. May 2022, p. 126676, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126676. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126676>.

REN, Siyue; FENG, Xiao; WANG, Yufei. Energy evaluation of the integrated gasification combined cycle power generation systems with a carbon capture system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 147, n. May, p. 111208, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111208. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111208>.

SHARAFI LALEH, Shayan; ZEINALI, Mohsen; MAHMOUDI, S. M. S.; SOLTANI, Saeed; ROSEN, Marc A. Biomass co-fired combined cycle with hydrogen production via proton exchange membrane electrolysis and waste heat recovery: Thermodynamic assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 48, n. 87, p. 33795–33809, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.137. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.137>.

SOLTANI, S.; MAHMOUDI, S. M. S.; YARI, M.; ROSEN, M. A. Thermodynamic analyses of an externally fired gas turbine combined cycle integrated with a biomass gasification plant. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 70, p. 107–115, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.03.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.002>.

TAN, Liping; CAI, Lei; FU, Yidan; ZHOU, Zining; GUAN, Yanwen. Numerical investigation of biomass and liquefied natural gas driven oxy-fuel combustion power system. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 208, n. February, p. 94–104, 2023. DOI: 10.1016/j.renene.2023.03.014. Disponível em:



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

REVISÃO SISTEMÁTICA COMPARATIVA DE CICLOS COMBINADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA BASEADOS EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E GÁS NATURAL/BIOMASSA
Isabele Oliveira de Paula, Alex Pereira da Cunha, Gabriel Coelho Rodrigues Alvares,
Masoud Ghanbari Kashani, Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.014>.

TAN, Liping; CAI, Lei; XIANG, Yanlei; GUAN, Yanwen; LIU, Wenbin. Investigation on oxy-fuel biomass integrated gasification combined cycle system with flue gas as gasifying agent. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 166, n. December 2021, p. 106621, 2022. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106621. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106621>.

VERA, David; JURADO, Francisco; CARPIO, José; KAMEL, Salah. Biomass gasification coupled to an EFGT-ORC combined system to maximize the electrical energy generation: A case applied to the olive oil industry. **Energy**, [S. l.], v. 144, p. 41–53, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.152.

WANG, Hongliang; SU, Zhanguo; ABED, Azher M.; NAG, Kaushik; DEIFALLA, Ahmed; MAREFATI, Mohammad; MAHARIQ, Ibrahim; WEI, Yanming. Multi-criteria evaluation and optimization of a new multigeneration cycle based on solid oxide fuel cell and biomass fuel integrated with a thermoelectric generator, gas turbine, and methanation cycle. **Process Safety and Environmental Protection**, [S. l.], v. 170, n. December 2022, p. 139–156, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2022.11.087. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.087>.

WEBSTER, Jane; WATSON, Richard. MIS Quarterly. **Analyzing the Past To Prepare for the Future : Writing a Literature Review**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 13–23, 2002.

XIANG, Yanlei; CAI, Lei; GUAN, Yanwen; LIU, Wenbin; HE, Tianzhi; LI, Juan. Study on the biomass-based integrated gasification combined cycle with negative CO₂ emissions under different temperatures and pressures. **Energy**, [S. l.], v. 179, p. 571–580, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.011>.

YANG, Kun; ZHU, Neng; WANG, Daquan; CHANG, Chen. Thermoeconomic analysis of co-firing combined cooling, heating, and power system based on energy level. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 197, n. June, p. 111900, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111900. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111900>.

ZANG, Guiyan; TEJASVI, Sharma; RATNER, Albert; LORA, Electro Silva. A comparative study of biomass integrated gasification combined cycle power systems: Performance analysis. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 255, n. January, p. 246–256, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.01.093. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.093>.

ZHANG, Xiaofeng; LIU, Xiaobo; SUN, Xiaoqin; JIANG, Changwei; LI, Hongqiang; SONG, Quanbin; ZENG, Jing; ZHANG, Guoqiang. Thermodynamic and economic assessment of a novel CCHP integrated system taking biomass, natural gas and geothermal energy as co-feeds. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 172, n. May, p. 105–118, 2018. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.07.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.002>.

ZHANG, Xiaofeng; ZENG, Rong; MU, Kang; LIU, Xiaobo; SUN, Xiaoqin; LI, Hongqiang. Exergetic and exergoeconomic evaluation of co-firing biomass gas with natural gas in CCHP system integrated with ground source heat pump. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 180, n. August 2018, p. 622–640, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.009>.