



Aproveitamento do calor residual da incineração de biomassa de um sistema híbrido PTC-RSU para geração de hidrogênio e processos térmicos auxiliares
Utilization of residual heat from biomass incineration in a hybrid PTC-RSU system for hydrogen generation and auxiliary thermal processes

Brunella Bermudes Prati Sant'Ana^{1*}, Francisco Mello Fonseca², Carlos Roberto Coutinho³, Jussara Farias Fardin⁴, Helder Roberto de Oliveira Rocha⁴

¹ Aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus Goiabeiras, ES, Brasil

² Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus Goiabeiras, ES, Brasil

³ Professor do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, campus São Mateus, ES, Brasil; Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus Goiabeiras, ES, Brasil

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus Goiabeiras, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: brunella.santana@edu.ufes.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise teórica do aproveitamento do calor residual gerado em uma planta híbrida de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e energia termossolar concentrada (PTC). O sistema estudado opera 24/7, com um fluxo de 27,04 kg/s de RSU e produção contínua de 77 MW, sem armazenamento. A temperatura do calor residual varia entre 220°C e 788°C ao longo do dia. Avalia-se a viabilidade de produção de hidrogênio através de reforma termoquímica e SOEC durante as horas de alta temperatura e a utilização do calor residual noturno para secagem da biomassa ou processos térmicos auxiliares. O estudo considera parâmetros médios de eficiência da literatura sendo o rendimento da reforma de 35% e rendimento do SOEC de 30%. Os resultados indicam que o calor residual pode gerar entre 12 e 18 kg de H₂ por tonelada de RSU durante o dia, pelas rotas tecnológica de SOEC e de reforma termoquímica respectivamente, enquanto o calor noturno pode ser aproveitado para processos de secagem, aumentando a eficiência global do sistema e reduzindo desperdícios energéticos. O trabalho fornece uma base teórica para futuras implementações e otimizações em plantas híbridas urbanas de geração de energia.

Palavras-chave: Usinas Híbridas; Reforma Termoquímica; SOEC; Descarbonização; Energia Limpa.

Abstract: This work presents a theoretical analysis of the utilization of waste heat generated in a hybrid plant combining municipal solid waste (MSW) incineration and concentrated solar power (PTC). The studied system operates 24/7, with an MSW flow rate of 27.04 kg/s and a continuous output of 77 MW, without storage. The waste heat temperature varies between 220°C and 788°C throughout the day. The feasibility of producing hydrogen through thermochemical reforming and SOEC during high-temperature hours is evaluated, as is the use of nocturnal waste heat for biomass drying or auxiliary thermal processes. The study considers average efficiency parameters from the literature, with the reforming efficiency at 35% and the SOEC efficiency at 30%. The results indicate that the waste heat can generate between 12 and 18 kg of H₂ per ton of MSW during the day, via the SOEC and thermochemical reforming routes, respectively, while the nocturnal heat can be utilized for drying processes, increasing the overall system efficiency and reducing energy losses. This work provides a theoretical basis for future implementations and optimizations in urban hybrid power generation plants.

Keywords: Hybrid Power Plants; Thermochemical Reform; SOEC; Decarbonization; Clean Energy.

1 Introdução

A crescente demanda por energia e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis e integradas para geração elétrica. No contexto latino-americano, a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a diversificação da matriz energética figuram entre os principais desafios ambientais e tecnológicos (IEA, 2024). Nesse cenário, as usinas híbridas termossolar-biomassa surgem como alternativas promissoras, combinando fontes renováveis de natureza complementar e aproveitando fluxos energéticos residuais que, em geral, permanecem subutilizados (Behar et al., 2023; Saavedra et al., 2021).

A incineração controlada de RSU é uma rota tecnológica consolidada para recuperação energética, capaz de reduzir o volume de resíduos enviados a aterros sanitários e mitigar a emissão de metano (CHEN et al., 2020). Entretanto, a maior parte da energia térmica liberada nesse processo é dissipada com os gases de exaustão, cujas temperaturas frequentemente ultrapassam 700 °C em períodos de maior demanda térmica. O aproveitamento desse calor residual pode elevar significativamente a eficiência global do sistema (Qu et al. 2022), permitindo aplicações complementares, como geração termoquímica de hidrogênio ou secagem de biomassa combustível (Hrabovszky, Sze-id e Horváth, 2021).

A produção de hidrogênio a partir de energia térmica renovável tem recebido crescente atenção nos últimos anos, especialmente por meio de processos de reforma termoquímica e eletrólise de alta temperatura (SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cell) (Ebbesen e Mogensen, 2022). Ambos os métodos apresentam potencial para integração com sistemas de geração híbrida, possibilitando uma conversão flexível de energia térmica excedente em vetores energéticos de alto valor (Bellan e Tizzoni, 2023).

Considerando que a operação de uma usina termossolar-biomassa pode ser contínua (24/7), e que o perfil térmico dos gases varia significativamente ao longo do dia, a análise do aproveitamento dinâmico do calor residual torna-se fundamental para identificar oportunidades de uso racional da energia. Assim, a temperatura diurna pode viabilizar a produção de hidrogênio via reforma termoquímica, enquanto o calor noturno pode ser direcionado a processos auxiliares de secagem da biomassa, reduzindo sua umidade e aumentando o poder calorífico do combustível para o ciclo seguinte.

Diante desse contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar teoricamente a viabilidade do aproveitamento do calor residual da incineração de RSU em um sistema híbrido termossolar-biomassa, com foco na utilização do excedente térmico diurno para produção de hidrogênio via reforma termoquímica ou SOEC, além do aproveitamento noturno para secagem de biomassa para combustível.

O estudo busca quantificar, com base em dados médios de operação e parâmetros da literatura, o potencial energético disponível em cada faixa horária, discutindo sua integração ao ciclo da usina e suas contribuições para o aumento da eficiência e da sustentabilidade do sistema.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU)

A conversão energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa uma alternativa estratégica para mitigar impactos ambientais e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. De acordo com IEA (2024), a recuperação de energia a partir de RSU pode contribuir de forma significativa para a matriz renovável global, sobretudo em países com alta densidade populacional e limitada disponibilidade de áreas para aterros. Entre as rotas tecnológicas de maior relevância estão a incineração com recuperação de calor, a gaseificação e a pirólise, cada qual com vantagens e limitações associadas à eficiência, emissões e estabilidade operacional (Arena, 2012).

A incineração controlada, ainda que tradicional, tem evoluído consideravelmente em eficiência e controle de emissões. Estudos recentes indicam eficiências globais de conversão de até 28% quando integradas a ciclos de recuperação de calor de alta temperatura (Murer et al., 2019). Por outro lado, a gaseificação e a pirólise oferecem maior flexibilidade para produção de gases combustíveis, particularmente o hidrogênio, porém exigem maior homogeneização do combustível e controle rigoroso da composição do syngas (Kumar, Singh e Murty, 2017; Zhang et al., 2021). A heterogeneidade do RSU — especialmente sua elevada umidade e teor inorgânico — é apontada como um dos principais entraves técnicos para o desempenho térmico e químico desses sistemas (Li et al., 2020; Nathan et al., 2021).

No contexto brasileiro, o potencial de aproveitamento energético de resíduos é expressivo. Segundo EPE (2023), o país gera aproximadamente 82 milhões de toneladas de RSU por ano, dos quais menos de 3% são destinados a processos de recuperação energética. Essa lacuna demonstra a necessidade de estudos

de integração energética, tanto no aproveitamento direto do poder calorífico do resíduo, quanto na recuperação de calor residual dos gases de exaustão, ainda pouco explorada em plantas WtE (*waste-to-energy*).

2.2 Usinas híbridas termossolar–biomassa: sinergia e complementaridade

As usinas híbridas termossolar-biomassa têm se destacado como solução tecnológica capaz de contornar a intermitência solar e ampliar o aproveitamento térmico global. A integração de concentradores parabólicos (PTC) com sistemas de combustão ou gaseificação de biomassa permite operar de forma contínua, 24 horas por dia, utilizando o aporte solar diurno para aquecimento direto do fluido térmico e o combustível renovável (biomassa) como fonte complementar durante períodos sem insolação (Petrollese et al. 2022; Telsnig et al., 2013).

Segundo Kalogirou (2021), essa sinergia não apenas aumenta o fator de capacidade anual, mas também melhora a estabilidade térmica e reduz as emissões específicas de CO₂. Além disso, a complementaridade entre as duas fontes permite que a planta opere sem necessidade de armazenamento térmico, simplificando o projeto e reduzindo custos de capital (Crespi et al., 2022). Estudos experimentais conduzidos por Tian et al. (2023) e Reyes et al. (2022) mostraram que a integração solar pode reduzir em até 20% o consumo de biomassa sem comprometer a potência térmica total, quando o controle de fluxo e a troca térmica são devidamente otimizados.

No entanto, apesar do avanço das plantas híbridas, ainda há subaproveitamento do calor residual proveniente dos processos de combustão ou gaseificação da biomassa, especialmente durante os períodos noturnos, quando as temperaturas dos gases permanecem acima de 200 °C. Esse calor representa um potencial energético significativo para aplicações auxiliares, como secagem de biomassa ou aquecimento de fluidos térmicos, mas permanece frequentemente dissipado por limitações de projeto e ausência de sistemas de recuperação (Qu et al., 2022; Khosravi et al., 2020).

2.3 Produção de hidrogênio a partir de biomassa

A produção de hidrogênio verde vem se consolidando como vetor energético essencial para a transição energética, dada sua versatilidade e capacidade de armazenamento de energia em longo prazo (IEA Hydrogen Outlook, 2024). No contexto da biomassa, o hidrogênio pode ser obtido por vias termoquímicas, como a reforma a vapor, gaseificação catalítica ou reforma de bio-óleo, com eficiências que variam de 35 a 55%, dependendo da temperatura, tipo de catalisador e composição do combustível (Ahmed and Gupta, 2010; Basile e Dalena, 2019).

A reforma termoquímica é considerada a rota mais viável para integração com plantas híbridas de alta temperatura. Segundo Rostrup-Nielsen e Sehested (2021), a reforma de resíduos carbonáceos a temperaturas superiores a 700 °C permite conversão parcial do carbono em CO e H₂, enquanto a reação de deslocamento gás-água (WGS) subsequente aumenta a fração de hidrogênio purificado. A integração térmica com fontes solares ou gases de combustão aumenta a eficiência exergetica do sistema em até 15%, segundo modelagem de Barelli et al. (2021).

No caso dos RSU, a presença de plásticos, papel e matéria orgânica fornece uma mistura rica em compostos carbonáceos com poder calorífico inferior (PCI) médio de 10–12 MJ/kg, o que permite sua utilização direta em processos de reforma ou gaseificação sem necessidade de pré-tratamento complexo (Li et al., 2020). Ainda assim, a umidade e a variação composicional ao longo do dia podem afetar a cinética da reação e a estabilidade térmica, tornando o controle da curva de temperatura um fator essencial no projeto de integração.

2.4 Eletrólise de alta temperatura (SOEC) como alternativa tecnológica

A eletrólise de óxido sólido (SOEC) tem ganhado destaque como tecnologia complementar à produção termoquímica, permitindo a conversão simultânea de energia térmica e elétrica em hidrogênio. A operação em altas temperaturas (600–900 °C) reduz a energia elétrica requerida para dissociar a molécula de água, aumentando a eficiência global do processo (Buttler e Spliethoff, 2018; Zhang et al., 2021).

Segundo Ghaib e Ben-Fares (2018), a integração de SOECs com fontes de calor residual industrial ou de biomassa pode elevar a eficiência global de conversão para 45–55%, dependendo do regime de temperatura e da estabilidade dos materiais do eletrodo. Estudos recentes demonstram que o uso de calor

residual proveniente de gases de exaustão a 700–800 °C pode reduzir em até 30% o consumo elétrico por mol de H_2 produzido (Guerra et al., 2023; Saba et al., 2022).

Apesar do potencial promissor, a viabilidade técnica da SOEC ainda é limitada por problemas de durabilidade, degradação de eletrólitos e alto custo de fabricação. Mesmo assim, sua aplicação em cenários híbridos, especialmente quando o calor está disponível em temperaturas elevadas, é amplamente discutida como caminho para integração térmica inteligente em plantas renováveis (Behar et al., 2023).

2.5 Recuperação e aproveitamento do calor residual

A recuperação de calor residual é uma das estratégias mais eficazes para aumentar a eficiência global de plantas térmicas. Conforme Açikkalp et al. (2021), o reaproveitamento do calor dos gases de exaustão pode melhorar em até 10–15% o rendimento energético total de uma planta de incineração. A escolha da aplicação depende da qualidade térmica do calor — isto é, sua temperatura e exergia disponível.

O calor residual em faixas médias (200–500 °C) é especialmente adequado para secagem de biomassa, pré-aquecimento de ar de combustão ou regeneração de calor em trocadores térmicos (Sarker et al., 2021). Em contrapartida, faixas acima de 700 °C podem ser aproveitadas em processos de reforma ou eletrólise de alta temperatura, representando uma valiosa oportunidade de cogeração avançada.

Estudos de Khosravi et al. (2020) e Qu et al. (2022) destacam que a recuperação de calor residual não apenas aumenta a eficiência exergética, mas também contribui para a redução de emissões indiretas de GEE, uma vez que substitui o uso de fontes primárias para processos auxiliares (como secagem e aquecimento). Contudo, a literatura ainda carece de avaliações dinâmicas, capazes de correlacionar o perfil térmico horário dos gases com as possíveis aplicações integradas ao longo do dia — o que é essencial para plantas operando sem armazenamento térmico.

3 Metodologia

O presente estudo avalia a utilização do calor residual do sistema apresentado na Figura 1, após a troca de calor com o fluido de trabalho. O sistema híbrido é composto de duas partes: a incineração do RSU e um *array* de coletores solares do tipo calha parabólica, gerando energia continuamente sem necessidade de sistemas de armazenamento térmico. A fonte do calor residual está marcada em vermelho na figura. Para mais detalhes técnicos sobre o funcionamento do sistema, o trabalho de Sant'Ana (2024) pode ser consultado.

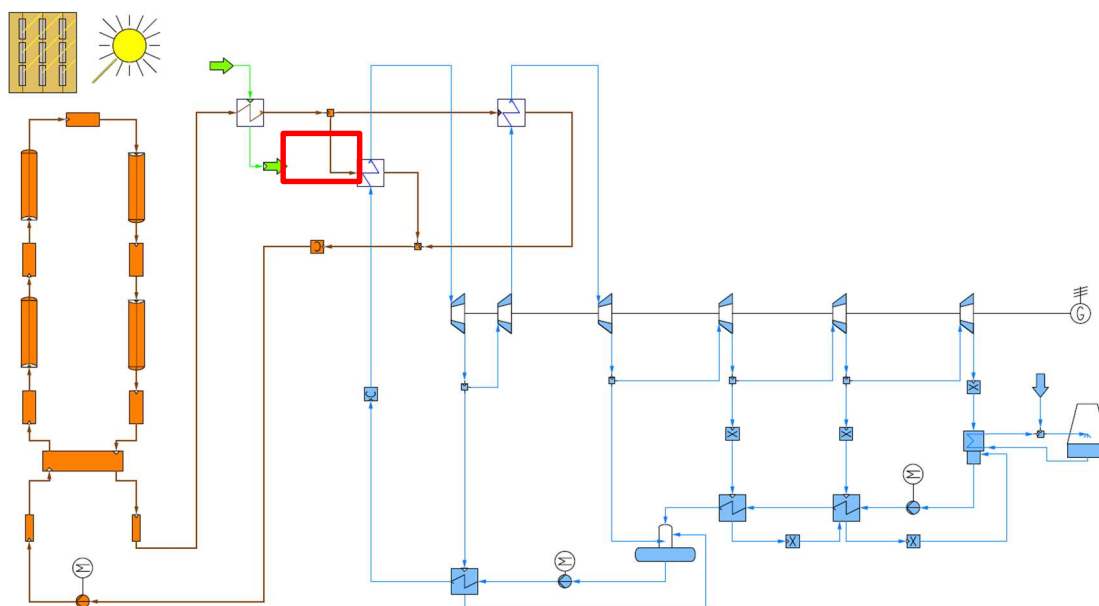


Figura 1. Detalhamento da usina híbrida estudada. Em vermelho, destaca-se a fonte do calor residual. Fonte: Sant'Ana (2024).

A operação da usina se dá a partir de um circuito onde um fluido de trabalho recebe calor nos coletores solares e no trocador de calor dos gases de combustão do RSU, e transfere esta energia térmica para trocadores de calor que produzem vapor em um ciclo rankine convencional. Neste ciclo ocorre a geração de energia elétrica por meio de um gerador acionado por turbinas a vapor. Após a expansão do vapor

ocorrida na turbina, o vapor é condensado e pré-aquecido antes de retornar ao trocador de calor para que evapore novamente.

A intermitência solar das 18:00 às 06:00 é compensada pelo gás de combustão da biomassa, permitindo que a usina opere inteiramente com biomassa durante esse horário para manter a produção contínua de eletricidade, com um calor residual de aproximadamente 220°C. Essa estratégia permite o fornecimento eficiente e confiável de eletricidade, mesmo durante períodos de baixa irradiação solar. O uso combinado de energia solar e biomassa permite o gerenciamento flexível da produção de eletricidade. Durante os horários de pico de luz solar, a geração é principalmente solar, reduzindo ou eliminando o uso de biomassa, fazendo com que o calor residual chegue em aproximadamente 788°C.

O estudo apresentado utiliza uma abordagem teórica baseada em balanços energéticos e aproveitamento de calor residual da planta híbrida apresentada, considerando seus fatores principais:

- Fluxo de RSU: 27,04 kg/s;
- PCI do RSU: 10.505 kJ/kg;
- Vazão de gases de exaustão: 318,75 kg/s;
- Temperaturas do calor residual, variando em passos de uma hora;
- Operação contínua 24/7, sem armazenamento.

A metodologia foi estruturada em dois cenários para avaliar diferentes estratégias de aproveitamento do calor residual, sendo eles reforma termoquímica diurna e SOEC diurno, ambos considerando o calor noturno para secagem da biomassa. Um cenário comparativo sem aproveitamento também foi apresentado.

Nos cenários estudados, assume-se uma estratégia de aproveitamento do calor residual em dois períodos distintos, utilizando um balanço energético simplificado. Para o primeiro cenário, durante o dia, quando a temperatura deste calor excede 500°C, ele é direcionado para a reforma termoquímica da biomassa, visando a produção de hidrogênio com uma eficiência média de 35%, conforme dados encontrados em estudos anteriores. Para o segundo cenário são consideradas apenas as horas com temperatura maior que 600°C, pois o SOEC exige temperaturas mais altas. A eficiência média considerada para esse cenário foi de 30%, conforme estudos apresentados anteriormente.

Já no período noturno, para os dois cenários, com as temperaturas reduzidas para aproximadamente 220°C, estima-se que 90% do calor residual disponível seja utilizado para a secagem da biomassa, minimizando a demanda por energia elétrica nesse processo, e considerando uma eficiência de 28% na transferência de calor por incineração, também baseada nos estudos apresentados anteriormente.

A energia térmica disponível do calor residual em cada hora ($\dot{Q}$) (Eq. 1) é dada pelo produto entre o fluxo mássico ($\dot{m}_g$) e o calor específico médio (C_p) dos gases de exaustão, e a variação de temperatura (ΔT) entre a temperatura ambiente e a temperatura do calor residual registrada a cada hora.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \times C_p \times \Delta T, \quad (1)$$

A energia útil convertida em H₂ (Eq. 2) é obtida pela multiplicação da energia térmica calculada anteriormente pela eficiência do processo utilizado ($\eta_{processo}$). Essa eficiência representa a fração da energia térmica de entrada que é efetivamente armazenada como energia química nas moléculas de hidrogênio produzidas.

$$E_{H_2} = \dot{Q} \times \eta_{processo}, \quad (2)$$

A produção de hidrogênio (Eq. 3) é obtida dividindo a energia útil pela energia por kg de H₂. A lógica aqui é converter uma quantidade de energia em uma quantidade de massa. O Poder Calorífico Inferior (PCI) do hidrogênio (~120 MJ/kg) é a quantidade de energia contida em cada quilograma de H₂. Ao dividir a energia total que foi convertida em hidrogênio pela densidade energética do hidrogênio, o resultado é o fluxo mássico total de hidrogênio produzida (em kg/h).

$$\dot{m}_{H_2} = \left(\frac{E_{H_2}}{120.000} \right) \times 3600, \quad (3)$$

Para a energia do calor residual noturno ($ER_{noturno}$), considera-se a energia térmica disponível multiplicada pela fração aproveitável ($F_{noturno}$) desse calor (Eq. 4). Esse valor de fração aproveitável é uma limitação termodinâmica: Ele quantifica que, da energia térmica total disponível nos gases a 220°C, apenas uma parte pode ser realisticamente convertida em uma forma de energia mais nobre.

$$ER_{noturno} = \dot{Q} \times F_{noturno} , \quad (4)$$

4 Resultados

Os resultados preliminares obtidos a partir do sistema base são apresentados a seguir. A Figura 2 apresenta a relação entre a porcentagem de utilização de RSU na planta e o calor residual liberado.

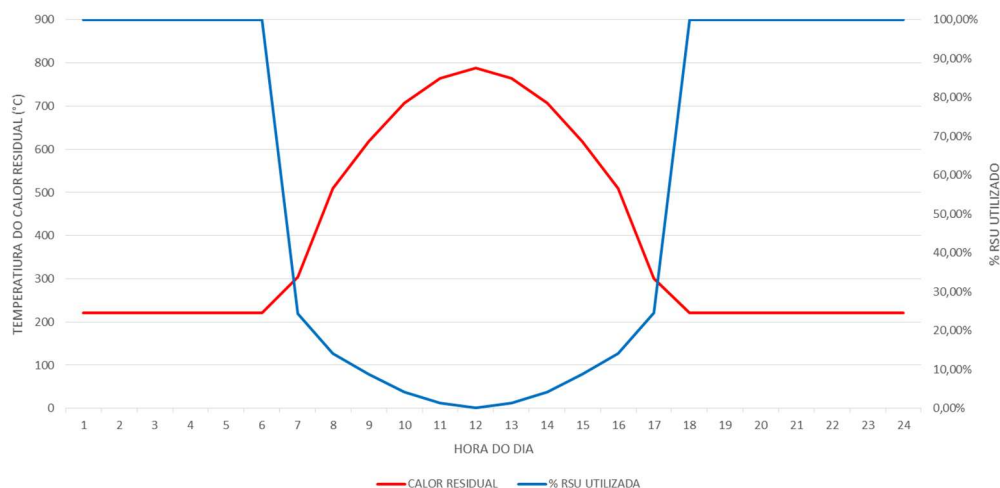


Figura 2. Utilização do RSU x calor residual da incineração.

Pode-se notar que a relação apresentada é inversamente proporcional, como esperado. Durante a noite, quando a utilização de RSU é de 100%, o calor residual se mantém em seu nível mais baixo, aproximadamente 220°C, pois somente o calor do gás de exaustão está sendo transferido para o fluido de trabalho. À medida que a utilização dos coletores solares aumenta durante o dia, a demanda por RSU diminui até chegar próxima de zero (cerca de 0,21%). Nesse período, menos calor é extraído do sistema de incineração, fazendo com que a temperatura do calor residual se eleve, atingindo um pico de cerca de 788°C ao meio-dia. A Tabela 1 mostra os resultados dos cálculos para cada cenário, que serão comentados nos itens subsequentes.

Tabela 1. Resumos dos resultados obtidos.

Hora do dia (h)	Calor residual (°C)	δt (K)	Q (MW)	Reforma termoquímica		SOEC	
				Energia útil (MW)	H ₂ gerado (kg/h)	Energia útil (MW)	H ₂ gerado (kg/h)
18:00 - 06:00	220,81	195,81	71,78	-	-	-	-
07:00	304,54	279,54	102,47	-	-	-	-
08:00	509,89	484,89	177,74	-	-	-	-
09:00	617,95	592,95	217,35	76,07	2,28	-	-
10:00	706,41	681,41	249,78	87,42	2,62	74,93	2,25
11:00	764,77	739,77	271,17	94,91	2,85	81,35	2,44
12:00	788,26	763,26	279,78	97,92	2,94	83,93	2,52
13:00	764,77	739,77	271,17	94,91	2,85	81,35	2,44
14:00	706,41	681,41	249,78	87,42	2,62	74,93	2,25
15:00	617,95	592,95	217,35	76,07	2,28	-	-
16:00	509,90	484,90	177,75	-	-	-	-
17:00	300,69	275,69	101,06	-	-	-	-

Pela simulação da combustão, foi verificado que o valor da vazão mássica do gás de exaustão é de 318,15kg/s. Considerando a temperatura ambiente como 25°C e o C_p dos gases de exaustão como 1,15kJ/kg·K, foi possível calcular as energias úteis disponíveis para cada rota tecnológica estudada.

Durante o período noturno, das 18:00 às 06:00, a temperatura do calor residual é constante e baixa, em 220,81°C, gerando uma potência térmica de 71,78 MW, que é insuficiente para a produção de hidrogênio,

portanto os valores permanecem nulos em ambos os processos. Nesse caso, essa energia é encaminhada para processos auxiliares, como secagem do RSU ou aquecimento de água.

A geração de hidrogênio inicia-se durante o dia, quando a temperatura ultrapassa um limiar operacional. A produção de ambos os sistemas acompanha a curva de temperatura, atingindo seu pico ao meio-dia, quando a temperatura máxima de 788,26°C permite gerar 2,94 kg/h por reforma termoquímica ou 2,52 kg/h por SOEC.

Para a reforma termoquímica, foram utilizados apenas os horários em que a temperatura ultrapassa os 500°C, sendo o horário compreendido entre 09:00h e 15:00h. Para o SOEC foram utilizados apenas os horários em que a temperatura era superior à 600°C, sendo o horário compreendido entre 10:00h e 14:00h, sendo um intervalo duas horas menor que o utilizado para a reforma termoquímica.

A Figura 3 mostra a relação entre o calor residual disponível para ambas as rotas analisadas.

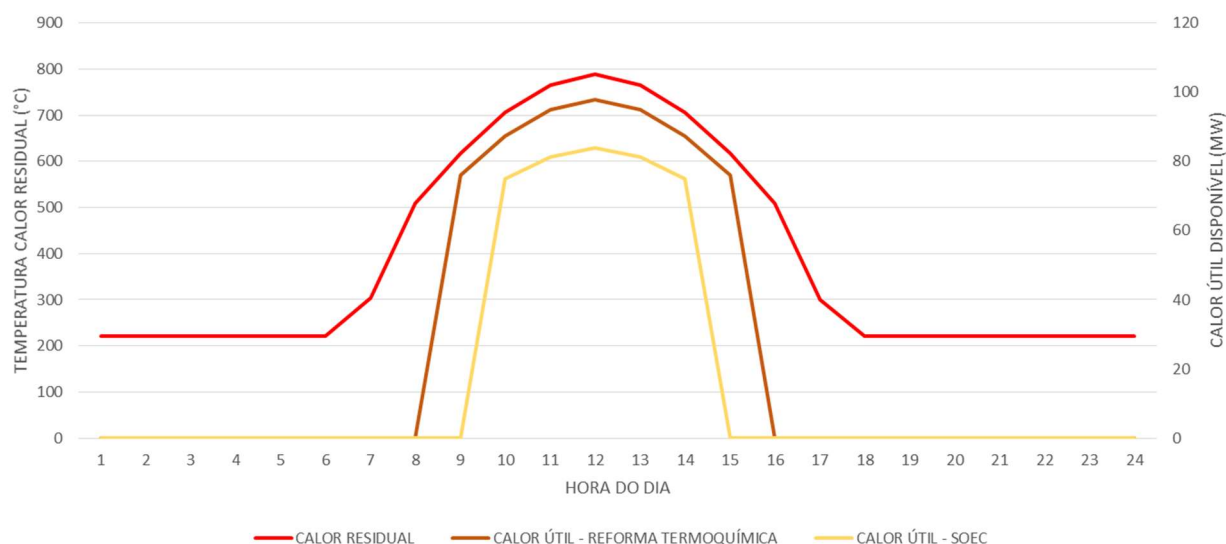


Figura 3. Calor residual x Calor útil disponível.

O gráfico demonstra que a energia útil destinada à reforma termoquímica está diretamente condicionada pela temperatura do calor residual. A curva do "Calor Útil - Reforma Termoquímica" acompanha a tendência da temperatura, iniciando em zero, crescendo rapidamente até atingir um pico de aproximadamente 98 MW ao meio-dia, e depois decrescendo de forma simétrica até zerar novamente no final da tarde, indicando que todo o calor residual acima do limiar de 500°C é aproveitado por este sistema.

Para o sistema de SOEC, o aproveitamento do calor é ainda mais restrito, ocorrendo em uma janela de operação menor. A energia útil disponível para o SOEC também segue o perfil da temperatura residual, mas em um nível inferior ao da reforma, alcançando um valor máximo de aproximadamente 83 MW ao meio-dia. A curva mostra que o calor utilizado pelo SOEC é uma fração da energia aproveitada pela reforma, refletindo suas condições operacionais mais exigentes.

Os cálculos também demonstram a geração de hidrogênio por cada rota estudada. A geração horária média pela reforma termoquímica é de 2,63kg/h, sendo possível gerar aproximadamente 18kg de hidrogênio por dia de operação da usina. Já a geração horária média por SOEC é de 2,38kg/h, sendo cerca de 10% menor que a geração pela reforma, podendo gerar até 12kg de hidrogênio por dia de operação da usina. Considerando que a usina trabalha todos os dias e a vazão dos gases é constante, em um ano é possível gerar até 6,7 toneladas de hidrogênio pela primeira rota e até 4,3 toneladas pela segunda, uma diferença de aproximadamente 35%.

Paralelamente à produção de hidrogênio, a usina continua gerando eletricidade de forma sustentável e constante, com uma potência de aproximadamente 77 MW. A integração da rota do hidrogênio demonstra o potencial para otimizar plantas híbridas, permitindo a execução de processos simultâneos e a cogeração em uma única instalação, maximizando o aproveitamento energético.

Sob a perspectiva ambiental, o projeto apresenta benefícios relevantes. Ao utilizar os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como insumo energético, evita-se sua disposição em aterros sanitários, o que impede o processo de decomposição anaeróbica e a consequente emissão de metano (CH₄), um gás de efeito estufa significativamente mais potente que o dióxido de carbono. Embora a combustão na usina emita cerca de 770 kg de CO₂ por tonelada de RSU incinerado, este método representa uma redução de quase 40% no

impacto de gases de efeito estufa quando comparado à alternativa de disposição em aterro, considerando-se o potencial de aquecimento global do metano que seria liberado (Sant'Ana e Fardin, 2025).

5 Conclusão

Este estudo demonstrou com sucesso a viabilidade técnica e os benefícios multifacetados da integração de um sistema de produção de hidrogênio a uma usina híbrida de energia, que utiliza calor residual da incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e aporte de energia solar. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- a) A estratégia de aproveitamento do calor residual se mostrou altamente eficiente, direcionando a energia de baixa temperatura ($\sim 220^{\circ}\text{C}$) do período noturno para a secagem de biomassa e utilizando o calor de alta temperatura (acima de 500°C e com picos próximos a 800°C) do período diurno para alimentar os processos de reforma termoquímica ou eletrólise de óxido sólido (SOEC) para gerar hidrogênio.
- b) A análise quantitativa revelou que a produção de hidrogênio ocorre exclusivamente durante o dia, atingindo um pico ao meio-dia de 2,94 kg/h por reforma termoquímica ou 2,52 kg/h por SOEC, sem comprometer a geração de eletricidade base da planta, que se mantém constante em aproximadamente 77 MW.
- c) A reforma termoquímica demonstrou maior potencial de produção de hidrogênio em comparação ao SOEC, com capacidade de geração anual de até 6,7 toneladas contra 4,3 toneladas, representando uma diferença de aproximadamente 35%. Essa diferença decorre da maior janela operacional da reforma (7 horas/dia) em relação ao SOEC (5 horas/dia) e da temperatura mínima de operação mais baixa (500°C versus 600°C).
- d) O modelo proposto representa uma solução avançada de economia circular. Ao valorizar energeticamente os RSU, o sistema evita sua disposição em aterros sanitários, mitigando significativamente as emissões de metano e resultando em uma redução de quase 40% no impacto de gases de efeito estufa em comparação com a alternativa do aterro.
- e) A pesquisa valida o potencial desta configuração híbrida como uma plataforma robusta para a poligeração de energia e combustíveis limpos, apontando um caminho promissor para a gestão sustentável de resíduos urbanos e para a transição energética.

5.1 Limitações e perspectivas

Apesar dos resultados promissores obtidos neste estudo teórico, algumas limitações devem ser reconhecidas e consideradas em trabalhos futuros:

- a) As análises apresentadas baseiam-se em parâmetros médios de eficiência e em balanços energéticos simplificados, sem considerar perdas térmicas reais, transientes operacionais ou degradação de equipamentos. A validação experimental dos dados teóricos é recomendada como trabalho futuro por ser parte fundamental para confirmar a viabilidade prática da integração proposta e ajustar os modelos às condições reais de operação, incluindo o desenvolvimento de protótipos e a investigação da durabilidade dos materiais do SOEC em condições com gases de combustão de RSU, considerando a presença de contaminantes e a ciclagem térmica diária.
- b) Trabalhos futuros também devem investigar o investimento inicial (CAPEX), custos operacionais (OPEX), tempo de retorno do investimento e precificação do hidrogênio produzido, incluindo estudos de sensibilidade para diferentes cenários de mercado e políticas de incentivo governamental.
- c) Como perspectivas adicionais, recomenda-se a otimização termodinâmica e exergética do sistema considerando diferentes configurações de recuperação de calor e a avaliação do ciclo de vida (LCA) completo para quantificação detalhada dos impactos ambientais e comparação com outras rotas tecnológicas de produção de hidrogênio e geração de energia.

Agradecimentos

O(s) autor(es) agradece(m) à CAPES pelo suporte financeiro através de bolsa de doutorado, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através dos projetos FAPES 2022-BWBR2, FAPES 2024-GP4XW, FAPES 2024-1FNPM, CNPq 301349/2025-8 e CNPq 311894/2025-9.

Referências bibliográficas

- Açıkkalp, E, Şahin, B, Hepbaşlı, A and Ünal, H (2021) 'Thermodynamic performance assessment of a municipal solid waste-fired power plant', *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123512>
- Ahmed, I and Gupta, AK (2010) 'Hydrogen from biomass gasification', *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 10, p. 4849–4860. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.093>
- Arena, U (2012) 'Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review', *Waste Management*, v. 32, n. 4, p. 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- Barelli, L, Bidini, G, Gallorini, F, Tosti, S and Zuccari, F (2021) 'Solar thermochemical reforming of biogas for hydrogen production: A thermodynamic and exergetic analysis', *Energy Conversion and Management*, v. 236, p. 114060. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114060>
- Basile, A and Dalena, F (eds) (2019) *Catalytic routes for sustainable hydrogen production*. London: Elsevier.
- Behar, O, Khellaf, A and Mohammedi, K (2013) 'A review of studies on central receiver solar thermal power plants', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 12–39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017>
- Bellán, S and Tizzoni, AC (2023) 'Solar thermochemical hydrogen production: A review of the most promising technologies', *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 36, p. 13425–13454. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.259>
- Buttler, A and Spliethoff, H (2018) 'Current status of water electrolysis for hydrogen production – A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.099>
- Chen, C, Yin, X and Ma, L (2020) 'Thermodynamic analysis of solar-biomass hybrid power generation systems: A review', *Energy Conversion and Management*, v. 205, p. 112426. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112426>
- Crespi, F, Barea, M, Rovense, F, Sanchez, D and Montes, MJ (2022) 'A review of hybrid solar-biomass power plants: Technologies, operation, and optimization', *Energy Conversion and Management*, v. 257, p. 115456. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115456>
- Ebbesen, SD and Mogensen, MB (2022) 'Solid oxide electrolysis cells: From fundamentals to demonstration and deployment', *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, v. 13, p. 447–470. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092220-111155>
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2023) *Balanco Energético Nacional 2023: Ano base 2022*. Rio de Janeiro: EPE.
- Ghaib, K and Ben-Fares, F-Z (2018) 'Power-to-Gas: A technological review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 1069–1076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.021>
- Guerra, C, Perna, A, Sglavo, VM and Di Noto, V (2023) 'High-temperature solid oxide electrolysis cells: A comprehensive review on materials, components, and degradation phenomena', *Journal of Power Sources*, v. 564, p. 232822. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232822>
- Hrabovszky, K, Sze-id, A and Horváth, A (2021) 'Investigation of waste heat utilization for biomass drying in a waste-to-energy plant', *Journal of Cleaner Production*, v. 289, p. 125134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125134>
- International Energy Agency (2024a) *Renewables 2024*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (2024b) *Global Hydrogen Review 2024*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (2023) *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA.
- Kalogirou, SA (2021) 'Hybrid renewable energy systems' in *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 3rd edn. Cambridge, MA: Academic Press, p. 783–832.

- Khosravi, M, Mohamed, MH, Jaafar, MNM, Lazim, TM and Mohammed, MA (2020) 'A comprehensive review on the latest advances of waste heat recovery systems in different industrial sectors', *Journal of Cleaner Production*, v. 277, p. 122822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122822>
- Kumar, A, Singh, RK and Murty, YV (2017) 'Gasification of municipal solid waste: A review on syngas composition and its applications', *Journal of the Energy Institute*, v. 90, n. 4, p. 529–546. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.05.004>
- Li, J, Zhang, L, Wu, Z and Xie, Z (2020) 'The challenges and prospects of municipal solid waste gasification in China', *Waste Management & Research*, v. 38, n. 7, p. 721–733. <https://doi.org/10.1177/0734242X20902888>
- Murer, MJ, Skřinský, J, Svoboda, K and Pohořelý, M (2019) 'High-temperature heat recovery from flue gas of waste incineration plants', *Energy*, v. 186, p. 115865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115865>
- Nathan, GK, Hasan, MM, Rahman, MM and Lu, C (2021) 'Challenges and opportunities of municipal solid waste gasification for power generation', *Energy & Fuels*, v. 35, n. 17, p. 13445–13459. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01997>
- Petrollese, M, Bidini, G, Fantozzi, F and Barbanera, M (2022) 'A review of hybrid solar-biomass systems: Design, modeling and applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 154, p. 111818. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111818>
- Qu, Z, Zhang, J, Wang, Y and Li, Y (2022) 'A comprehensive review on waste heat recovery from municipal solid waste incineration', *Energy*, v. 243, p. 123081. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123081>
- Reyes, ME, Rodríguez-García, MM and Posso, F (2022) 'Experimental analysis of a hybrid solar-biomass power plant with parabolic trough collectors', *Solar Energy*, v. 231, p. 696–706. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.016>
- Rostrup-Nielsen, JR and Sehested, J (2021) 'Steam reforming of hydrocarbons: Catalysis and reaction engineering' in *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. 2nd edn. Weinheim: Wiley-VCH, p. 1–46.
- Saavedra, E, Ortega, R and Orozco, R (2018) 'Performance analysis of hybrid solar-biomass power plants: A comparative approach', *Renewable Energy*, v. 122, p. 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.112>
- Saba, SM, Müller, M, Robinius, M and Stolten, D (2022) 'The role of high-temperature electrolysis in the future energy system', *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 45, p. 19447–19463. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.144>
- Sant'Ana, BBP (2024) Estudo da viabilidade técnico-econômica preliminar de um sistema térmico híbrido PTC-RSU para a geração de energia elétrica no Estado do Espírito Santo. Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória.
- Sant'Ana, BBP and Fardin, JF (2025) 'From Waste to Watts: Hybrid MSW-PTC Power Plants for Decarbonization and Sustainable Energy Generation' in *Proceedings of the 18th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP 2025)*, Vitória.
- Sarker, MR, Ash-hab, M, Islam, MS and Alam, MA (2021) 'Waste heat recovery from industrial processes: A comprehensive review', *Energy Conversion and Management: X*, v. 12, p. 100118. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100118>
- Telsnig, T, Fahl, U and Rembold, F (2013) 'Hybrid solar-biomass power plants: A review of the concept, design and technology', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>
- Tian, Y, Zhao, Y, Liu, D and Yan, J (2023) 'Performance optimization of a hybrid concentrated solar power and biomass gasification plant', *Applied Energy*, v. 331, p. 120412. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120412>
- Zhang, Y, Li, A, Cui, G and Zhu, X (2021) 'A review of solid oxide electrolysis cells for hydrogen production from steam and/or carbon dioxide', *Journal of Power Sources*, v. 514, p. 230589. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230589>