



## ESTUDO NUMÉRICO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ATRAVÉS DA REFORMA DE VAPOR NO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA NA INDÚSTRIA DE CAL NA REGIÃO CENTRO OESTE DE MINAS GERAIS

Dione da Silva Melo <sup>1</sup>; Lorena Cremonin de Lima <sup>2</sup>; Reginaldo Goncalves Leao Junior <sup>3</sup>; Ricardo Carrasco Carpio <sup>4</sup>

1 Dione da Silva Melo, Bolsista, Engenharia Mecânica, IFMG Campus Arcos, Arcos – MG; [dionemelo700@gmail.com](mailto:dionemelo700@gmail.com)

2 Lorena Cremonin de Lima, Engenharia Mecânica, IFMG Campus Arcos, Arcos – MG

3 Reginaldo Goncalves Leao Junior, Engenharia Mecânica, IFMG Campus Arcos, Arcos – MG

4 Orientador: Ricardo Carrasco Carpio, Campus Arcos; [ricardo.carpio@ifmg.edu.br](mailto:ricardo.carpio@ifmg.edu.br)

### RESUMO

A região Centro-Oeste de Minas Gerais é rica em depósitos de calcário, a principal indústria da região são as fábricas de cal. Esse tipo de indústria utiliza fornos verticais tipo Azbe ou rotativos para produzir cal, utilizam combustíveis sólidos, principalmente o eucalipto, que além dos gases gerados no processo, liberam grandes quantidades de gases poluentes na atmosfera, principalmente CO<sub>2</sub>, o que os torna um dos maiores poluidores da região. O controle técnico deficiente da produção de cal, que utiliza gaseificadores muito antigos para produzir o gás combustível, gera perdas na produção e na queima que resultam principalmente na necessidade de maior uso de combustíveis e em consequência maior liberação de gases tóxicos na atmosfera. Com o objetivo de reduzir a poluição gerada e aumentar a eficiência térmica dos gases utilizados nos fornos de cal, este projeto visa estudar o enriquecimento do gás de síntese gerado pelos gaseificadores utilizando o processo de reforma a vapor. Para dar continuidade ao projeto, inicialmente foi feita uma visita a uma indústria da região, onde foram realizadas medições de gás e temperatura em pontos específicos, para que, comparando dados de outros estudos, fosse possível montar uma base de composições para o gás de síntese a ser estudado. Primeiramente, foi realizada uma série de estudos sobre a queima do gás de síntese, como os fatores influenciam a queima e a temperatura máxima atingida pelo gás, que é um importante fator de controle para a correta calcinação da cal. Em seguida, o estudo e as simulações do gaseificador teve início, utilizando o *software* de código aberto Cantera e o sistema de reator de superfície. Um código *Python* foi desenvolvido para modelar as reações de gaseificação da madeira de eucalipto, usando dados do próprio *software* Cantera e a composição das estruturas do eucalipto usado como combustível. Foi realizada uma série de simulações computacionais variando as propriedades que podem influenciar a gaseificação, bem como a adição de vapor de água para enriquecimento de hidrogênio.

**PALAVRAS CHAVES:** Gaseificação, Simulação, Cantera, Hidrogênio.

### INTRODUÇÃO:



A indústria da cal existe há muito tempo. Mesmo antes da invenção do primeiro forno de metal, a cal era produzida de forma rudimentar em fornos feitos em buracos no chão. Com o passar do tempo, com a invenção de fornos mais sofisticados e eficientes, como os fornos verticais e rotativos, o setor começou a produzir cada vez mais. Passou de toneladas por ano para toneladas por dia. Ao mesmo tempo em que a produção evoluiu, o tempo de produção foi reduzido, e o estudo de combustíveis cada vez mais baratos também avançou, chegando à biomassa, o combustível em estudo nesta pesquisa e o mais utilizado na região Centro-Oeste de Minas Gerais para a produção de cal, sendo o eucalipto.

Os fornos de calcinação, onde a cal é produzida, usam gases da decomposição térmica do eucalipto como combustível. Esse gás, também chamado de gás de síntese, é produzido no gasogênio, ou gaseificador, quando a biomassa é aquecida a altas temperaturas e suas estruturas de hidrocarbonetos são quebradas em pequenas moléculas de gás (Dai et al., 2015). O processo de gaseificação é realizado com uma baixa quantidade de oxigênio, promovendo a queima incompleta dos componentes e gerando gás de síntese (Zhang et al., 2020). Esse gás é então levado para os queimadores, onde o ar atmosférico é adicionado como agente oxidante para que possa ser queimado dentro dos fornos. Entretanto, tanto a queima do gás de síntese quanto a sua produção são empíricas, com baixa eficiência e enormes perdas, pois o processo envolve a queima de calcário com lenha nativa ou derivados de petróleo, o que coloca essa indústria como uma das vilãs da devastação no estado.

A falta de conhecimento técnico e o controle ineficiente dos processos de produção de cal geram prejuízos para a indústria e para a região, como a baixa eficiência dos fornos, a calcinação parcial do calcário, o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e CO acima dos padrões permitidos pela legislação, as altas temperaturas e até mesmo a queima tardia dos gases de exaustão, prejudicando os equipamentos e o meio ambiente. Além dessas dificuldades, há também a falta de segurança para os funcionários e operadores do forno, que muitas vezes ficam expostos ao calor do forno e do gaseificador, em torno de 1.000 °C. Muitas indústrias ainda utilizam mão de obra semimecânica para alimentar os gaseificadores, expondo os trabalhadores aos gases nocivos gerados no interior dos equipamentos, o que é agravado pela alimentação frequente dos fornos devido ao mau controle técnico da queima.

Embora a biomassa seja um combustível barato, seu uso não é o mais vantajoso devido ao seu baixo poder calorífico, comprometendo a qualidade do produto e a economia esperada, exigindo maiores quantidades do material para atingir os padrões industriais necessários, onde a temperatura média de calcinação do minério é de aproximadamente 900 °C, que deve ser atingida para a correta calcinação da cal (Moropoulou et al., 2001). Essa biomassa geralmente é adicionada ao gaseificador na forma de um tronco cortado, com variações muito grandes de árvore para árvore, o que dificulta ainda mais o processo de controle da produção de gás de síntese.

Diante das dificuldades mencionadas acima, a justificativa deste projeto é otimizar os processos de calcinação em fornos da região Centro-Oeste de Minas Gerais, por meio do estudo dos processos de produção de gás de síntese com dados reais, permitindo que a indústria trabalhe de forma a obter uma alta taxa de produção com alta qualidade. Para isso, é necessário conhecer o processo de produção por meio de visitas in loco, a fim de entender as possíveis limitações e/ou dificuldades a



que essas empresas estão sujeitas e, por meio de estudos direcionados, propor possíveis soluções e/ou melhorias no processo, aumentando sua viabilidade técnica e econômica, bem como reduzindo possíveis danos ambientais decorrentes do processo de produção de cal. A fim de verificar quais dados devem ser obtidos para a elaboração do modelo, que tem como objetivo melhorar a produção atual das indústrias da região.

O foco principal deste projeto de pesquisa é o gaseificador, onde é gerado o gás que alimentará os queimadores do forno. O estudo se baseia na tentativa de aumentar o poder calorífico do gás, enriquecendo a mistura final com o aumento de hidrogênio na composição do gás, por meio da reforma a vapor, utilizando métodos computacionais, estudos e simulações de bancos de dados de reações químicas e térmicas. Se o resultado for positivo, permitirá que as indústrias implementem o sistema, possibilitando maior rendimento de combustível, menos poluição, maior eficiência de queima e um processo mais estável. Os principais parâmetros a serem analisados serão a variação de vapor por biomassa (SB) e a razão de equivalência (ER), que é a razão entre o ar que entra no gaseificador e o ar teórico necessário para a queima completa da biomassa. Os resultados de determinados parâmetros devem ser comparados com outros estudos para confirmar a assertividade das simulações (CHANG et al., 2011),).

## **METODOLOGIA:**

Inicialmente, foram realizadas pesquisas e coleta de dados sobre a operação do equipamento em estudo, o gaseificador. Os tipos de gaseificadores, suas limitações, as reações que ocorrem no interior do equipamento e como a variação dos parâmetros influenciava a produção de gás de síntese. Para iniciar os estudos, foi feita uma visita in loco a uma indústria da região, onde todos os participantes do projeto foram conhecer o funcionamento de toda a indústria, desde a equipe de controle, a extração do minério, o tratamento do combustível, o processo de calcinação e o produto final. No local, utilizando um analisador portátil de gases de combustão, foram feitas medições em pontos específicos dos fornos, medindo a composição dos gases que entravam nos queimadores e nas saídas de gases de exaustão, para identificar quais componentes estavam presentes em cada etapa do processo.

As medições forneceram uma análise inicial da composição esperada na entrada e na saída dos fornos, que serviu de conceito para a definição dos parâmetros de simulação. Outro equipamento utilizado foi um termômetro de alta temperatura, que foi usada para coletar dados em pontos específicos, principalmente para medir a temperatura de entrada dos gases de síntese na câmara de combustão, fator que influencia diretamente o poder de queima final dos gases.

Com os dados coletados e os dados de estudos sobre a composição da gaseificação da biomassa de eucalipto, utilizando valores médios dos componentes desses gases, foi realizada uma série de estudos sobre a temperatura adiabática da chama (temperatura máxima atingida na combustão perfeita), observando como os componentes do gás de síntese influenciam a temperatura final da chama nas fornalhas. Esse processo é um passo importante para entender aspectos do gás, como a quantidade de oxigênio e os limites aceitáveis, a temperatura de entrada e os componentes do gás. Para futuras comparações, as simulações foram realizadas com dados coletados na indústria local,



sem qualquer adição de hidrogênio. Esses dados serão usados em trabalhos futuros para uma comparação real de dados sobre a influência do hidrogênio na mistura.

Para estudar a gaseificação, foi necessário primeiro compreender os efeitos que ocorrem no interior do gaseificador. A madeira de eucalipto é adicionada aos gaseificadores na forma de tora, o que torna o processo de gaseificação mais complexo, especialmente quando comparado com a biomassa triturada. A gaseificação tem início na superfície do tronco, deslocando gradualmente para o interior até consumir todo o tronco. Por isso, o tipo de processo a ser utilizado e simulado para estudar a produção do gaseificador é uma reação de gaseificação superficial.

O reator de superfície foi desenvolvido em código Python utilizando o conjunto de ferramentas do *software* Cantera, utilizado para cálculos de sistemas envolvendo cinética química, termodinâmica e processos de transporte (Goodwin et al., 2024). A entrada dos componentes no código é um pouco diferente do usual, normalmente a entrada é feita em especificações de quantidades de componentes, como carbono, hidrogênio, água, entre outros compostos. Os dados de entrada utilizados no reator de superfície são baseados no estudo do eucalipto de acordo com as estruturas presentes na sua composição. Assim, os dados de entrada para a espécie *Eucalyptus Grandis* utilizada como base são: 50% de celulose, 22% de hemicelulose, 28% de lignina, e seus padrões de reação são completamente controlados pelo software, permitindo que as reações sejam estudadas.

O estudo do reator de superfície se baseou na análise do comportamento dos componentes químicos das estruturas acima mencionadas em simulações de gaseificação, variando os dados de entrada em busca da melhor configuração entre eles para obter a maior produção possível de gás de síntese. Inicialmente, foram realizadas três simulações: O primeiro manteve uma concentração de ER de 0,2 equivalente a 20% de ar teórico, variação de vapor (SB) de 0 e variação da temperatura de gaseificação de 600 para 1000 °C. A segunda simulação utilizou a temperatura de interesse da primeira experiência, SB de 0 e variando o ER de 0,2 a 0,4. A terceira experiência diz respeito à adição de água ao gás, pelo que a temperatura e o valor de ER são de interesse mútuo entre a primeira e a segunda simulações e a variação de SB varia de 0 a 1,5. As experiências receberão a variável de interesse das experiências anteriores até atingirem o equilíbrio e as melhores condições para o gás de síntese.

Os gases das simulações podem ser utilizados para analisar o poder calorífico da chama e a sua temperatura máxima utilizando os cálculos de chama adiabática acima referidos. A composição dos gases com composições específicas pode ser comparada e a possível capacidade do processo de reforma a vapor analisada dentro da mistura de gás de síntese. Os componentes gasosos utilizados para definir a melhor composição do gás de síntese são o CO, o CH<sub>4</sub> e o H<sub>2</sub>. A melhor composição de gás é definida no ponto em que estes valores são os mais altos possíveis, permitindo que mais gases combustíveis sejam enviados para o forno.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Inicialmente, o projeto iniciou com o estudo da combustão do gás de síntese, sendo um dos fatores a serem melhorados na indústria local. Foram adquiridas faixas de operação para as atuais configurações de queima de gás de síntese que podem ser utilizadas para aumentar a eficiência e o controle dos fornos. A temperatura de entrada do gás deve ser definida pela própria indústria, pois é



um fator que exige mudanças e melhorias físicas nos fornos. Por outro lado, a composição do gás pode ser enriquecida com uma mistura de 2% a 7% de oxigênio livre, permitindo uma queima segura a uma temperatura suficiente para a calcinação do minério de calcário.

As simulações do reator de superfície se mostraram positivas, mas ainda não foi possível chegar a um resultado preciso que pudesse ser utilizado nas reações e nos cálculos da temperatura adiabática da chama. Embora ainda não concretizado o estudado, as simulações mostraram um aumento significativo da quantidade de hidrogênio durante a gaseificação com reforma a vapor, sem provocar o aumento da produção de gases poluentes.

## CONCLUSÕES:

Embora ainda não concluído, o estudo do gaseificador através de simulações de um reator de superfície se mostrou positivo para o que foi inicialmente proposto. Ainda serão realizadas correções no código de simulação para novos testes, e assim adquirir dados sobre a composição dos gases de síntese criados. Futuramente, serão realizadas simulações de combustão destes gases utilizando o Cantera, a fim de verificar qual a percentagem de hidrogênio que provoca maior ganho de temperatura, bem como analisar a razão de temperatura de entrada, razão de oxigênio para a queima do hidrogênio, entre outros fatores que possam influenciar a eficiência da queima destes gases.

## REFERÊNCIAS:

CHANG, A. C. et al. Biomass gasification for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 21, p. 14252–14260, 2011. 2010 Asian/APEC BioH2. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.105>.

Dai, J., Saayman, J., Grace, J. and Ellis, N., 2015. “Gasification of woody biomass”. *Annu Rev Chem Biomol Eng*, Vol. 6, pp. 77–99. doi:10.1146/annurev-chembioeng-061114-123310.

Goodwin, D.G., Moffat, H.K., Schoegl, I., Speth, R.L. and Weber, B.W., 2024. “Cantera: An object-oriented soft ware toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes”. <https://www.cantera.org>. doi: 10.5281/zenodo.8137090. Version 3.0.0.

Moropoulou, A., Bakolas, A. and Aggelakopoulou, E., 2001. “The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 633–639. ISSN 0008-8846. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00490-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00490-7). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600004907>.

Zhang, Y., Wan, L., Guan, J., Xiong, Q., Zhang, S. and Jin, X., 2020. “A review on biomass gasification: Effect of main parameters on char generation and reaction”. *Energy fuels*, Vol. 34, No. 11, pp. 13438–13455. ISSN 0887-0624.