

GERAÇÃO DE METANO SINTÉTICO POR REATORES SABATIER E RECUPERAÇÃO DE CALOR POR ORC.

Julían Camilo Restrepo Lozano, jcrestrepol@hotmail.com¹

Osvaldo José Venturini, osvaldo@unifei.edu.br¹

Electo Eduardo Silva Lora, silva.electo52@gmail.com¹

Diego Luiz Izidoro, diego.izidoro@unifei.edu.br¹

Laura Andrea Cortabarría Castañeda, cortabarrialaura@gmail.com²

¹ UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá - Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG- Brasil

² CUC - Corporación universidad de la costa- Carrera 55 No 58-66 - Barranquilla, Atlántico, Colombia.

Resumo: Atualmente a humanidade enfrenta vários desafios, sendo um dos principais as mudanças climáticas, principalmente por causa do aumento do consumo de combustíveis fósseis. Portanto é cada vez mais relevante encontrar mecanismos sustentáveis de geração de energia, procurando utilizar a infraestrutura existente na atualidade, bem como fomentando a sua introdução no mercado mundial de energia. A geração de combustíveis sustentáveis se apresenta como uma adequada solução para os problemas apresentados previamente. Um caso de especial interesse é a geração de metano sintético por meio de reação Sabatier, onde os reagentes utilizados são o hidrogênio (gerado por meio de energias renováveis) e o dióxido de carbono. Esta tecnologia permite a redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera, ao mesmo tempo que gera um combustível de grande demanda na indústria, de maneira completamente sustentável. A reação Sabatier é uma reação altamente exotérmica ($\Delta H = -165,0 \text{ kJ/mol}$), apesar da necessidade de catalisadores baseados em Níquel ou Rutênio para desencadeá-la. Devido à alta energia liberada na reação, uma considerável quantidade de calor é liberada no processo, a qual pode ser aproveitada mediante um Ciclo Rankine Orgânico (ORC), o que reduz as perdas de energia no processo. Neste trabalho diferentes variáveis no processo de geração de metano sintético e diferentes fluidos de trabalho para o ORC serão analisados visando uma maior eficiência do processo de produção de energia e a obtenção de um metano sintético com alto grau de pureza.

Palavras-chave: Reação Sabatier, Hidrogênio renovável, Metano Sintético, ORC.

1. INTRODUÇÃO

Em decorrência da atual mudança climática mundial, cuja principal causa são as emissões de gases de efeito estufa, tem-se que procurar fontes de energia renováveis e mecanismos que promovam um melhor aproveitamento dos recursos energéticos, procurando evitar a poluição do meio ambiente. Uma alternativa interessante que permite a geração de energia de maneira sustentável é a utilização da reação Sabatier para a produção de metano sintético a partir do dióxido de carbono e do hidrogênio. O hidrogênio pode ser obtido por fontes renováveis de energia como apresentado na Figura 1, permitindo assim unir diferentes tipos de energias renováveis na geração de combustíveis sustentáveis.

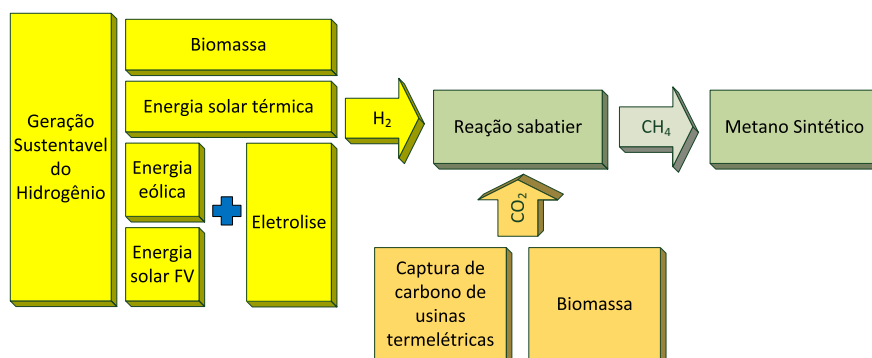


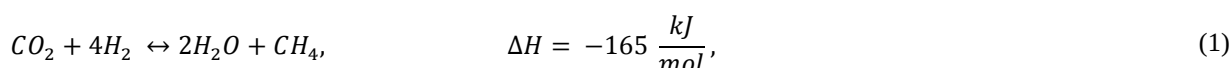
Figura 1. Representação esquemática produção de metano sintético a partir de fontes renováveis.

A principal vantagem da utilização da reação Sabatier é a possibilidade de utilizar dióxido de carbono como reagente, permitindo assim sua captura e posterior processamento junto ao hidrogênio, convertendo-o em um combustível com elevada aplicação na indústria, facilitando a transição para tecnologias mais sustentáveis e simultaneamente diminuindo a poluição ambiental.

Uma das principais características da reação Sabatier é a elevada quantidade de calor liberada na reação ($\Delta H = -165,0$ kJ/mol), sendo que este calor residual pode ser aproveitado para geração de energia elétrica em um ciclo de potência. No presente trabalho será considerado o Ciclo Rankine Orgânico (ORC) para gerar energia elétrica a partir do calor residual do processo de produção de metano, em decorrência de suas boas eficiências para baixas potências e temperaturas, conforme estabelecido por Sandeep *et al.* (2014).

2. REAÇÃO SABATIER

Trata-se de uma reação proposta pelo químico francês Paul Sabatier, no ano de 1910, que mostra a reação do hidrogênio com dióxido de carbono, ou monóxido do carbono, visando a obtenção metano sintético, como descrito na Eq. (1) (Hoekman *et al.*, 2010):



Para a ocorrência desta reação é necessária a utilização de catalisadores, os quais permitem ainda obter um melhor rendimento, sendo que o níquel e o rutênio são dois dos mais efetivos (Yaccato *et al.*, 2005). Aplicações comuns para esta reação são: a limpeza do hidrogênio com traços de monóxido ou dióxido do carbono para uso em células de combustível (Takenaka, 2004), a purificação do hidrogênio para a fabricação de amônia (Du *et al.*, 2007), e a remoção do dióxido do carbono de espaços confinados como submarinos ou naves espaciais (Hu *et al.*, 2007). Alguns pesquisadores trabalham ainda com a possibilidade de usar a reação Sabatier para capturar o monóxido do carbono emitido pelas usinas termoeletricas (Hashimoto *et al.*, 2001). Nas energias renováveis pode-se destacar sua utilização como processo intermediário de armazenagem de energia na tecnologia conhecida como “Power to Gas”, como descrito por Sterner (2009), ou também na conversão do dióxido de carbono e do hidrogênio, presentes no gás de síntese, em metano sintético (Agerborg *et al.*, 2013).

O critério mais importante para avaliar a efetividade da reação Sabatier é a eficiência da conversão de dióxido de carbono, conforme definido pela Eq. (2).

$$\eta_{CO_2} = \frac{\text{moles } CO_2 \text{ entram} - \text{moles } CO_2 \text{ saem}}{\text{moles } CO_2 \text{ entram}}. \quad (2)$$

Na Tabela 1 são apresentadas as eficiências de conversão de dióxido, considerando diferentes catalisadores. Considerou-se somente eficiências maiores do que 85%, para uma relação de H_2/CO_2 de 4, sendo esta a relação estequiométrica da Eq (1). Note-se que na Tabela 1 as faixas de temperatura para a ocorrência da reação estão entre os 300 °C e os 400 °C, já que sob temperaturas maiores acontece a dissociação do metano em monóxido de carbono, diminuindo a eficiência da conversão.

Tabela 1. Eficiências de conversão de CO_2 para diferentes catalizadores como uma relação de H_2/CO_2 de 4, adaptada de Jacob. (2013).

Catalisador	Temperatura °C	Eficiência conversão CO_2
10% Ni/La2O3	380	100%
69.1% Ni5Al-R	400	92%
LaNi4Al	400	92%
Ni-40Mm	300	91%
10% Ni/CeO2	350	90%
Raney Ni-60	300	87%

Para melhorar a geração de metano colocam-se vários reatores de metanação em série, aumentando a eficiência da conversão de dióxido de carbono, o que permite eficiências de até 99% (Schlereth, 2015). Atualmente, o processo mais representativo da produção de metano via reação de Sabatier é o patenteado pela companhia *Solar Fuels*. Este processo começa com a mistura e a compressão do hidrogênio e do dióxido de carbono, os quais, em seguida, são aquecidos até uma temperatura de 300 °C antes de entrar no primeiro reator. Dentro do reator adiabático acontece a reação Sabatier e, por sua natureza altamente exotérmica, aumenta-se a temperatura dos produtos até 600 °C. Logo, é necessário que o fluxo passe por um trocador de calor e um condensador, para retirar a água e, assim, diminuir o fluxo mássico. O processo no segundo reator é idêntico ao já explicado, no entanto a sua utilização permite converter o hidrogênio e o dióxido de

carbono, presentes na saída do primeiro reator, em metano sob uma eficiência de conversão de dióxido de carbono de até 99%.

Como a reação de metanação é altamente exotérmica é necessário um cuidado especial nos mecanismos de controle de temperatura no reator, para o qual tem-se desenvolvido dois sistemas, conforme explicado a seguir:

- Reatores com resfriamento: neste processo a temperatura do reator é reduzida por meio da troca de calor com água, conforme mostrado na Figura 2. Graças a elevada quantidade de calor liberada pela reação de Sabatier, a água de resfriamento é convertida em vapor.

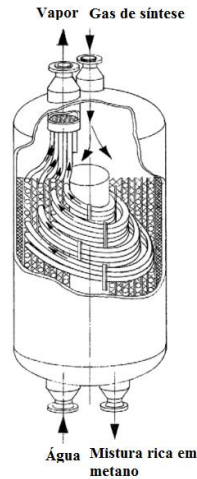


Figura 2. Resfriamento de um reator isotérmico, adaptado de Kopyscinski *et al.* (2010).

- Reatores resfriados por recirculação dos produtos: para controlar a temperatura e evitar danos aos catalisadores, pode-se utilizar um arranjo com recirculação parcial dos produtos do reator, obtendo uma menor proporção de hidrogênio e dióxido de carbono na mistura e diminuindo o calor liberado pela reação. Adicionalmente à recirculação dos produtos, pode-se injetar vapor de água para aumentar o efeito da diluição, como se apresenta na Figura 3.

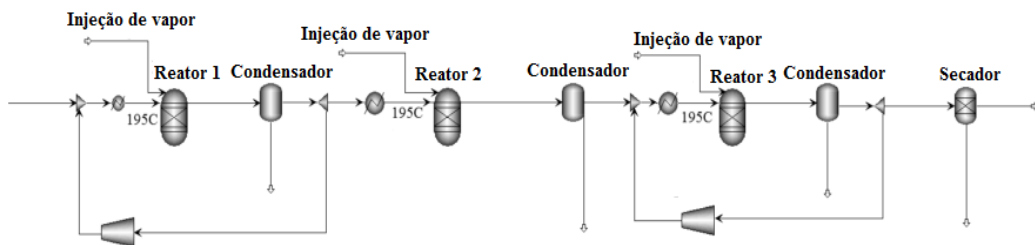


Figura 3. Arranjo de reatores com recirculação e diluição por vapor, adaptada de Agerborg *et al.* (2013)

2.1 Modelagem Reator Sabatier.

Neste trabalho, será utilizado um arranjo de reatores em série, o que permite obter altas eficiências de conversão de dióxido de carbono. Os reatores serão analisados em equilíbrio químico, conhecendo-se assim a composição do gás na saída do reator.

2.1.1 Cálculo da constante de equilíbrio.

Uma das considerações mais importante relacionadas à composição do gás em equilíbrio químico é a constante de equilíbrio, que é calculada a partir da Eq. (3). Para esse cálculo também é necessário conhecer a variação de energia de Gibbs, que é calculada a partir da equação Eq. (4).

$$K_e = e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (3)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

Por sua vez, para o cálculo da variação de energia de Gibbs tem que se conhecer a variação de entalpia e da entropia, calculadas a partir das equações Eq. (5) e (6), respectivamente.

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} (n_{H_2O} \bar{C}_{PH_2O} + n_{CH_4} \bar{C}_{PCH_4} - n_{H_2} \bar{C}_{PH_2} - n_{CO_2} \bar{C}_{PCO_2}) dT \quad (5)$$

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{(n_{H_2O} \bar{C}_{PH_2O} + n_{CH_4} \bar{C}_{PCH_4} - n_{H_2} \bar{C}_{PH_2} - n_{CO_2} \bar{C}_{PCO_2})}{T} dT \quad (6)$$

Para calcular o calor específico molar de cada substância foi utilizada um polinômio de terceiro grau. Após a realização desses cálculos para cada temperatura de interesse, pode-se obter a curva da variação logarítmica da constante de equilíbrio em função da temperatura, a qual é apresentada na Figura 4. É interessante observar o alto valor da constante de equilíbrio para baixas temperaturas, indicando a boa geração de produtos nessa região. Após atingir a temperatura de 900 K (626,85 °C) e temperaturas superiores, a formação de reagentes é favorecida.

2.1.2 Reações simultâneas.

Na reação Sabatier, além da Eq. (1), em determinadas temperaturas, pode acontecer a reação de mudança (*shift*) de vapor de água, conforme Eq. (7), a qual favorece a geração de monóxido de carbono, afetando assim a eficiência de geração do metano sintético.



Na Figura 4 pode-se observar ainda que a partir de 900 K, a reação de mudança de vapor de água ganha mais importância, e se começa a favorecer a geração de monóxido de carbono, diminuindo assim a geração de metano sintético.

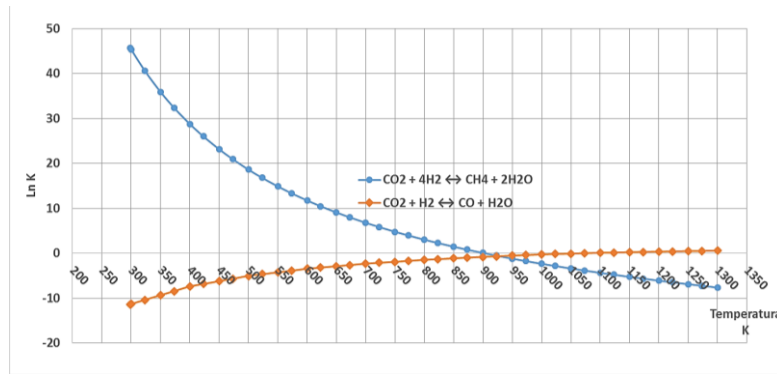


Figura 4. Constantes de equilíbrio para a reação Sabatier e a reação de mudança de vapor de água.

Para conhecer a composição de equilíbrio na saída do reator Sabatier, é necessário formular um sistema de equações envolvendo a reação Sabatier e a reação de mudança de vapor de água. A Eq. (8) representa o balanço molar geral da reação, a Eq. (9) o balanço molar de carbono, a equação (10) o balanço molar de oxigênio, a Eq. (11) o balanço molar de hidrogênio, e as Eq. (12) e Eq. (13) são as equações de equilíbrio químico para a reação Sabatier e reação de mudança de vapor de água respectivamente.



$$x + z + w - 1 = 0 \quad (9)$$

$$y + 2z + w - 2 = 0 \quad (10)$$

$$4x + 2y + 2v - 8 = 0 \quad (11)$$

$$k_1 = \frac{xy^2}{zv^4} \left(\frac{P}{x + y + z + v + w} \right)^{-2} \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{wy}{zv} \quad (13)$$

O sistema de equações não lineares foi solucionado no Excel® com o auxílio do complemento SOLVER, o qual permitiu encontrar a composição na saída do reator para várias temperaturas e pressões, apresentadas na Figura 5. Nesta figura, apresenta-se a fração molar na saída do reator para diferentes pressões a) 1 bar, b) 10 bar, c) 50 bar e d) 100 bar. É interessante observar que a medida que se incrementa a temperatura, o metano gerado começa a diminuir, influenciado pelo aumento na fração molar do dióxido de carbono na mistura e pelo decaimento da constante de equilíbrio, podendo concluir-se que a melhor faixa de temperatura para a operação do reator é até 673 K para uma pressão de 1 bar. Após desse ponto a fração de metano cai rapidamente, correspondendo assim com a temperatura máxima de operação encontrada para os catalizadores na Tabela 1.

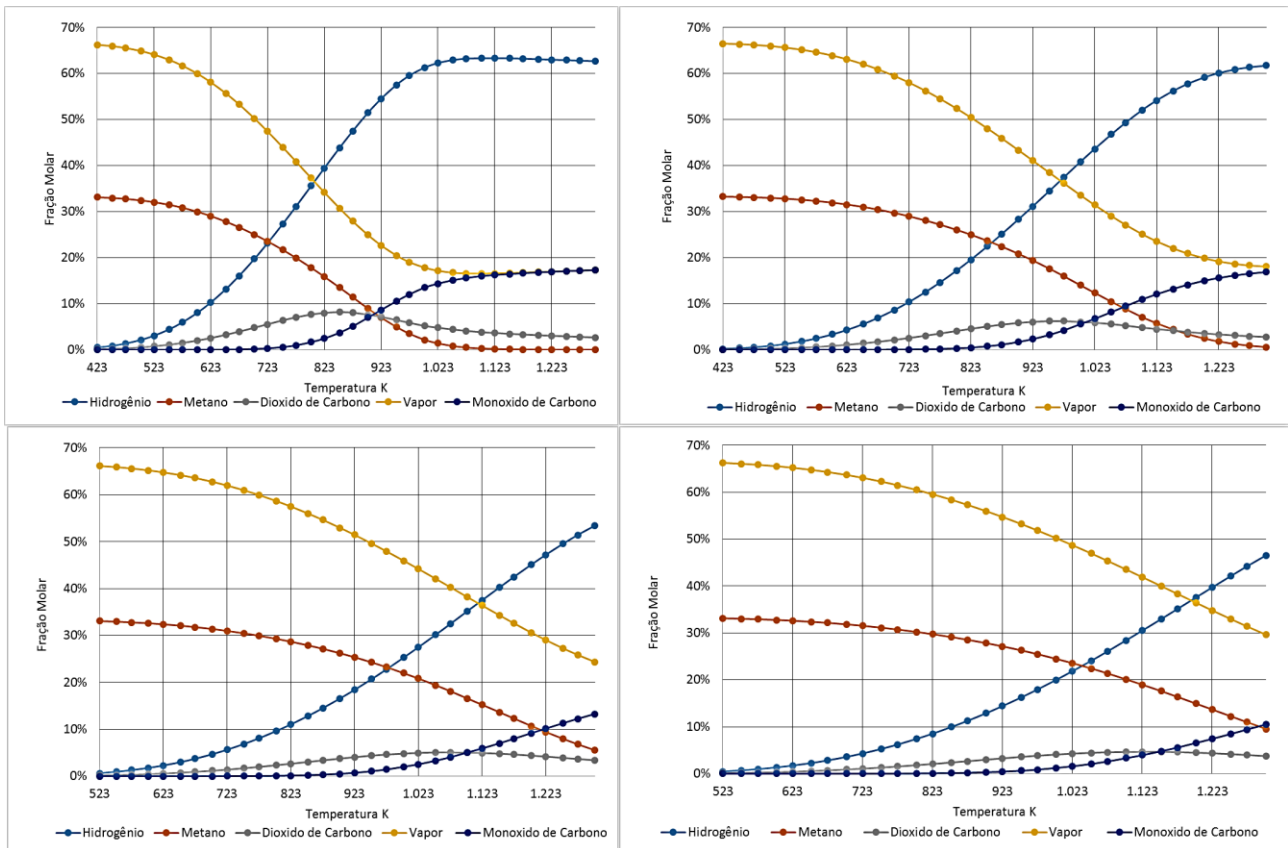


Figura 5. Fração molar na saída do reator para uma pressão de a) 1 bar, b) 10 bar, c) 50 bar, d) 100 bar.

Adicionalmente, pode-se considerar o efeito do incremento de pressão, que tende a conservar as condições de equilíbrio iniciais, deslocando assim para maiores temperaturas a formação de monóxido de carbono e permitindo aumentar a faixa de operação do reator (vide Figura 5). Isto ganha importância em processos que necessitam trabalhar a maiores temperaturas e conservando simultaneamente uma boa geração de metano sintético. Além disto, trabalhar sob elevadas pressões no reator de metanação apresenta a vantagem de não ser necessário comprimir o metano na saída do reator. Portanto, como pode se observar na Figura 6, ao incrementar a pressão, a faixa de alta eficiência de conversão de dióxido de carbono aumenta. Após a determinação da composição da mistura gasosa na saída do reator, pode-se calcular o calor liberado pela reação, utilizando a Eq. (14). Este calor residual liberado pode ser utilizado para acionar um ciclo de potência e, conforme, mencionado, no caso deste trabalho será considerado um ciclo ORC.

$$\dot{Q} = \sum \dot{v}_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o) - \sum \dot{v}_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o) \quad (14)$$

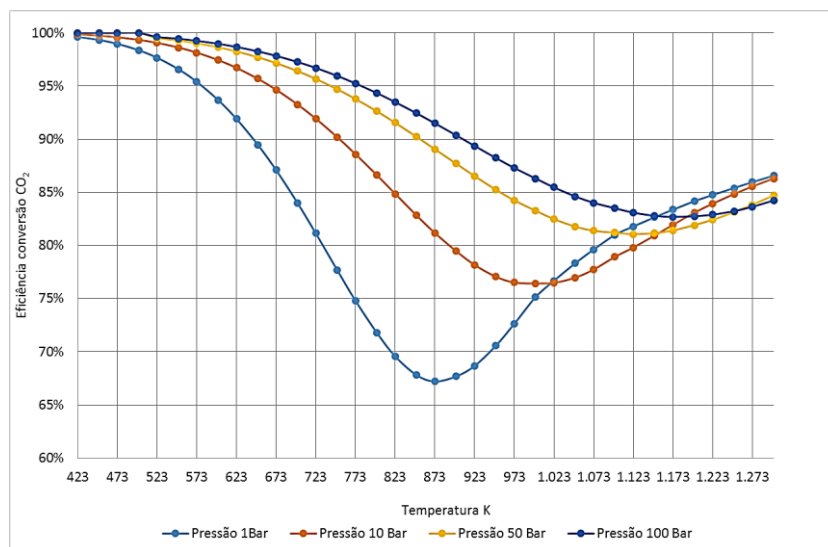


Figura 6. Conversão de CO₂ para diferentes temperaturas e pressões.

2.1.3 Arranjo dos reatores.

Como não é possível converter grandes quantidades de dióxido de carbono em metano sintético utilizando somente um reator, pode-se usar reatores em série, o que permite atingir maiores eficiências de conversão. Para o desenvolvimento deste trabalho serão usados reatores com resfriamento, permitindo uma diferença de temperatura entre a saída e a entrada do reator de 50 °C, conforme indicado por Kopyscinski *et al.* (2010). Uma das principais razões de se optar por um reator com resfriamento é a possibilidade da integração energética, que pode ser obtida a partir da recuperação do calor residual, liberado pela reação de Sabatier, em um ciclo ORC. Outra razão é a diminuição de custos dos equipamentos em relação aos reatores com recirculação, já que geralmente estes últimos são maiores e, portanto, mais caros, além de necessitarem de sopradores e equipamentos auxiliares.

O reator irá operar a pressão atmosférica, para evitar o alto consumo de energia para a compressão do hidrogênio e por se optar por trabalhar com uma baixa temperatura de reação no processo de metanação. A temperatura de reação de 300 °C foi escolhida para permitir a utilização dos catalisadores indicados na Tabela 1. Além disto, ao operar com temperaturas baixas, mais calor é gerado no reator permitindo um maior aproveitamento energético no ciclo ORC.

Na Figura 7 é apresentado o arranjo proposto para a produção de metano sintético. Os condensadores retiram o vapor de água gerado no processo, diminuindo assim a temperatura. Em cada reator a composição da mistura gasosa corresponde ao equilíbrio químico para uma dada temperatura, pressão e quantidade de espécies presentes. Assim, no terceiro reator o calor gerado na reação é bem menor em comparação ao calor liberado no primeiro reator, como consequência da pequena fração de hidrogênio e dióxido de carbono presentes na mistura, como pode ser observado na Tabela 2.

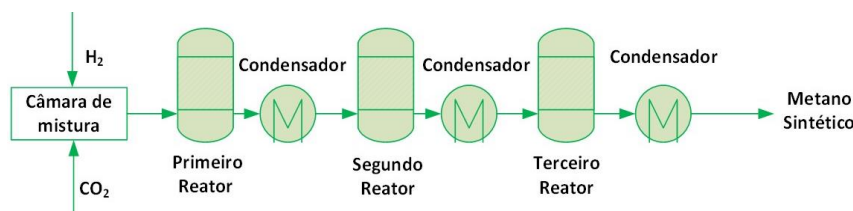


Figura 7. Arranjo reatores Sabatier.

Tabela 2. Propriedades do arranjo de reatores, obtendo a composição e o calor gerado em cada reator para uma temperatura de entrada de 300 °C e 1 bar.

Elemento		1º Reator	1º Condensador	2º Reator	2º Condensador	3º Reator	3º Condensador	Efic. de Conversão
Fração molar	CH ₄	95,4%		97,89%		98,93%		99,90%
	H ₂ O	1,0%		0,99%		0,99%		
	CO ₂	4,6%		0,22%		0,01%		
	H ₂	18,4%		0,89%		0,07%		
	CO	0,01%		0,01%		0,00%		
Calor kJ/mol CO ₂		156,6	4,76	0,333	4,37	0,017	4,36	

Na Figura 8 é possível observar como o incremento da conversão de dióxido de carbono através dos reatores presentes no sistema, justificando assim o uso de vários reatores em série.

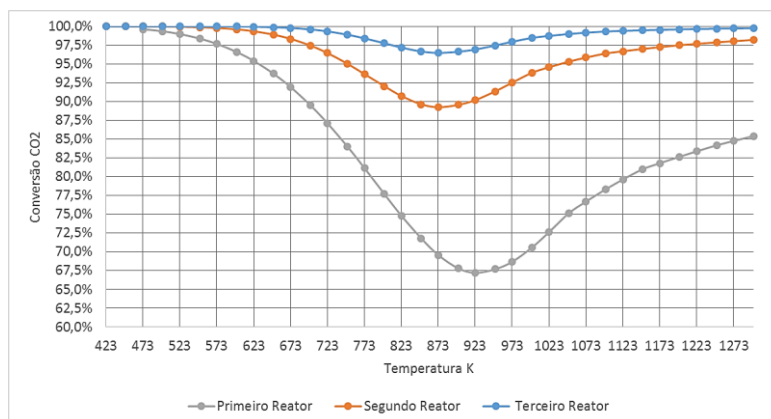


Figura 8. Variação da eficiência de conversão de CO₂ por cada reator.

3. CICLO RANKINE ORGÂNICO

O Ciclo Rankine Orgânico (ORC) é usado como uma variação do ciclo Rankine tradicional, sendo a principal diferença a mudança do fluido de trabalho. Os fluidos utilizados neste ciclo normalmente permitem a sua operação com fontes de energia de menor temperatura e numa menor faixa de potência. A queda de entalpia no processo de expansão na turbina normalmente é menor para os fluidos orgânicos comparado com o vapor de água, permitindo assim que para se use turbinas de um ou dois estágios, reduzindo os seus custos. Além disso, menores quedas de entalpia levam a menores rotações e velocidades na ponta das pás das turbinas, permitindo acoplamento direto da turbina ao gerador e projetos mais simples dos rotores (Quoilin *et al.*, 2013). Na Figura 9 é apresentado o campo de aplicação típica dos sistemas ORC, onde se observa um bom potencial para temperaturas abaixo dos 320 °C.

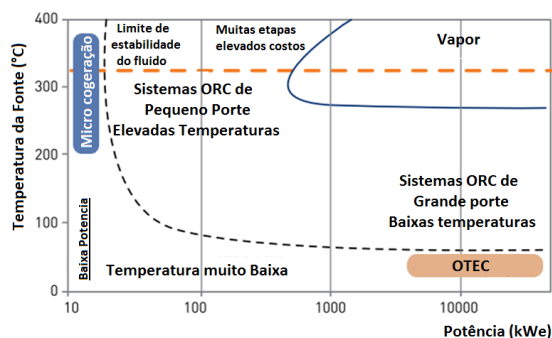


Figura 9. Campo de aplicação do ORC, adaptada de Sandeep *et al.* (2014).

Na Tabela 3 são apresentadas as características consideradas neste trabalho para os principais equipamentos do ciclo ORC, quais sejam: a turbina, a bomba e os trocadores de calor

Tabela 3. Parâmetros característicos dos equipamentos do Ciclo Rankine Orgânico (Algieri *et al.*, 2013; Chacartegui *et al.*, 2009; Hattiangadi, 2013; Lai *et al.* 2011)

Efic. Isentrópica da Turbina	Efic. Mecânica da Turbina	Efic. da Bomba	Efetividade do Regenerador	Efetividade do Evaporado	Pinch Regenerador - Saturação
0,85	0,98	0,75	0,95	0,90	25 °C

Foram escolhidos três fluidos orgânicos para a análise, devido à sua boa eficiência, sendo eles: Tolueno, Ciclopentano e Decano (Algieri *et al.*, 2013; Drescher *et al.*, 2007). Para esta seleção, levou-se em consideração os seguintes critérios: 1) Temperatura máxima do ciclo 300 °C, 2) Temperatura de saturação (condensação) mínima próxima de 50 °C, permitindo assim usar correntes de resfriamento de 25 °C, 3) *Pinch Point* de 10° C. Na Tabela 4 apresenta-se os estados do ciclo que satisfazem os critérios estabelecidos anteriormente.

Tabela 4. Pressões e temperaturas para os fluidos de trabalho.

	Ciclopentano	Tolueno	Decano
P_{max}, kPa	2600	900	120
T_{max}, °C	240	217	220
P_{saturação}, kPa	100	12	1
T_{saturação}, °C	49	49,6	52,4

O ciclo termodinâmico do sistema ORC, pode ser representado em um diagrama temperatura versus entropia, conforme mostrado na Figura 10. Pode-se observar todos os processos que compõem o ciclo, as diferenças entre os processos de expansão para cada fluido de trabalho, e a baixa quantidade de energia necessária para a vaporização do ciclopentano, em comparação com os outros fluidos, graças a proximidade das condições de operação ao do seu ponto crítico. Para o cálculo das propriedades termodinâmicas foi utilizado o software Coolprop (Bell *et al.*, 2014).

4. SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE CALOR E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Para recuperar o calor dos reatores foi utilizado o óleo térmico Downtherm Q devido as suas boas propriedades termodinâmicas e por operar adequadamente até 315 °C. Na Figura 11 se apresenta um esquema geral da planta, com os reatores Sabatier, o sistema de compressão de metano e o ciclo ORC. A recuperação de calor é feita por meio trocadores de calor operando em série, através dos quais circula o óleo térmico. Somente será aproveitado o calor do primeiro reator Sabatier, pois neste acontece a maior parte da liberação de calor.

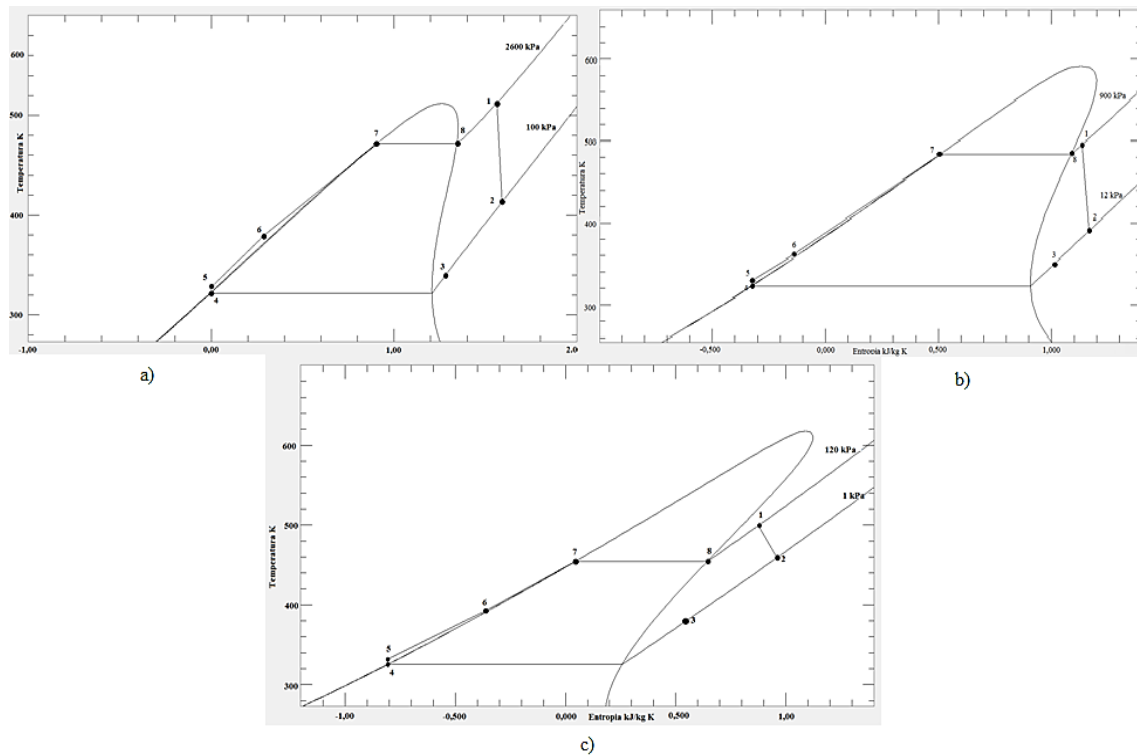


Figura 10. Diagrama $T \times s$, para diferentes fluidos de trabalho. a) Ciclopentano b) Tolueno c) Decano.

Na Tabela 5 é apresentado o balanço de energia para os processos envolvidos, considerando uma pressão de armazenagem de 50 bar para o metano, uma relação de pressão de 3,69 e uma eficiência isentrópica de 0,69 nos compressores (Houaijia *et al.*, 2013). A eficiência geral do reator Sabatier está definido pela Eq. (15), e a eficiência geral do processo pela Eq. (16).

$$\eta_{reatores} = \frac{\dot{v}_{CH_4} \overline{PCI}_{CH_4}}{4 \overline{PCI}_{H_2}} \quad (15)$$

$$\eta_{total} = \frac{\dot{v}_{CH_4} \overline{PCI}_{CH_4} + W_{liquida}}{4 \overline{PCI}_{H_2}} \quad (16)$$

Tabela 5. Potência gerada no sistema por mol/s de dióxido de carbono e eficiência.

Fluido de Trabalho	Potência [kW]			Eficiência %	Potência [kW]			Eficiência	
	Turbina	Bomba	Ciclo		Compressores	Bomba Óleo	Líquida	Sem ORC	Com ORC
Ciclopentano	35,59	1,64	33,95	20,49%	16,41	0,90	16,64	81,29%	83,83%
Tolueno	34,89	0,49	34,40	20,75%			17,09		83,87%
Decano	31,24	0,09	31,15	18,80%			13,84		83,54%

Será escolhido o ciclopentano como fluido de trabalho, por causa de sua boa eficiência e por ser menos tóxico do que o tolueno. É interessante observar como a eficiência do processo é relativamente alta, e é possível gerar uma importante quantidade de energia elétrica por mol/s de dióxido de carbono. Na Tabela 6 apresenta-se a potência líquida gerada pelo sistema para diferentes fluxos mássicos de dióxido de carbono e hidrogênio, considerando a operação do sistema ORC com ciclopentano.

Tabela 6. Potência líquida para diferentes fluxos mássicos de dióxido de carbono.

Fluxo mássico kg CO ₂ /s	0,33	0,66	0,99	1,32	1,65	1,98	2,31	2,64
Fluxo mássico kg H ₂ /s	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48
Fluxo mássico kg CH ₄ /s	0,12	0,23	0,36	0,47	0,58	0,70	0,82	0,94
Potência kW	124,5	249	373,5	498	622,5	747	871,5	996

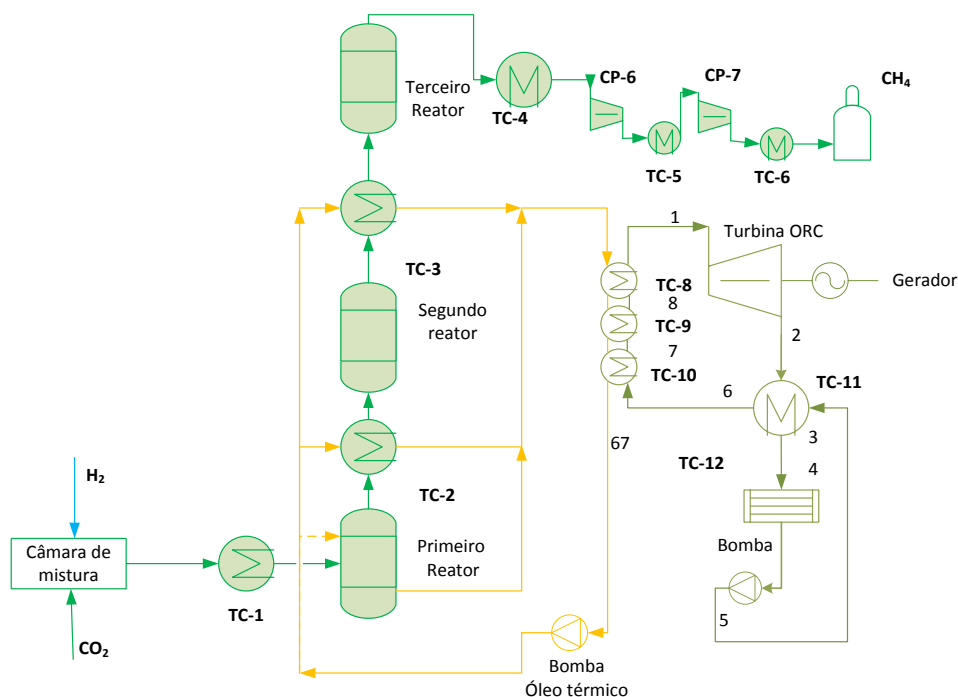


Figura 11. Sistema de produção de metano sintético com ciclo ORC.

5. CONCLUSÕES.

O metano sintético pode ser gerado com várias pressões e temperaturas através da reação Sabatier, sendo a melhor faixa de temperatura para a operação dos reatores a existente entre 300°C e 400°C para uma pressão de 1 bar. Para conseguir operar a temperaturas maiores é necessário aumentar a pressão dos reagentes incrementando assim o trabalho de compressão.

A reação Sabatier pode ser usada como mecanismo de captura de dióxido de carbono e possibilita a geração de combustíveis sustentáveis como é o caso do metano sintético. É possível implementar a recuperação de calor por ORC em reatores Sabatier e assim incrementar a eficiência da conversão da energia. O Ciclopentano é uma opção apropriada para a geração de energia no ciclo ORC, devido à baixa quantidade de energia (calor) necessária para sua evaporação, bem como devido à sua baixa toxicidade.

6. AGRADECIMENTOS.

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS.

- Agerborg, J.; Lingehed, E., 2013, "Integration of Power-to-Gas in Gasendal and GoBiGas". Chalmers University.
- Algieri, A.; Morrone, P., 2013, "Energetic analysis of biomass-fired ORC systems for micro-scale Combined heat and power (CHP) generation. A possible application to the Italian residential sector". Applied Thermal Engineering.
- Bell, I. H. et al., 2014, "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open Source Thermophysical Property Library CoolProp", Ind. & Engineering Chemistry Research, v. 53, n. 6, pp 2498–2508.
- Chacartegui, R. et al., 2009, "Alternative ORC bottoming cycles FOR combined cycle power plants", Applied Energy, v. 86, n. 10, pp 2162–2170.
- Drescher, U.; Brüggemann, D., 2007, "Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants", Applied Thermal Engineering, v. 27, n. 1, pp 223–228.
- DU, G. et al., 2007, "Methanation of carbon dioxide on Ni-incorporated MCM-41 catalysts: The influence of catalyst pretreatment and study of steady-state reaction", Journal of Catalysis, v. 249, n. 2, pp 370–379, 25.
- Hashimoto, K. et al., 2001, "Advanced materials for global carbon dioxide recycling", Materials Science and Engineering, v. 304-306, pp 88–96.
- Hattiangadi, A., 2013, "Working Fluid Design for Organic Rankine Cycle (ORC) Systems", Master Thesis, Delft University. Delft
- Hoekman, S. K. et al. 2010 "CO2 recycling by reaction with renewably-generated hydrogen", International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 4, n. 1, pp 44–50.

- Houaijia, A. et al., 2013, "Analysis and improvement of a high-efficiency solar cavity reactor design for a two-step thermochemical cycle for solar hydrogen production from water", *Solar Energy*, v. 97, pp 26–38.
- Hu, J. et al., 2007, "Catalyst development for microchannel reactors for martian in situ propellant production", *Catalysis Today*, v. 125, n. 1-2, pp 103–110.
- Jacob, D., 2013, "Methanation of Carbon Dioxide". Master thesis, University of California, Los Angeles.
- Kopyscinski, J.; Schildhauer, T. J.; Biollaz, S. M. A. 2010 "Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009", *Fuel*, v. 89, n. 8, pp 1763–1783.
- Lai, N. A.; Wendland, M.; Fischer, J., 2011, "Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles", *Energy*, v. 36, n. 1, pp 199–21.
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., Lemort, V., 2013, "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 22, pp 168-186
- Sandeep Goel, Oliver Herzog, Ankan Datta, 2014, "Market potential study for organic rankine cycle technology in India", *Indo-German Energy Forum*, New Delhi.
- Schlereth, D., 2015, "Kinetic and Reactor Modeling for the Methanation of Carbon Dioxide", PhD Thesis, Technischen Universität München, Munich.
- Sterner, M., 2009, "Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems", PhD Thesis, Kassel University, Kassel.
- Takenaka, S., 2004, "Complete removal of carbon monoxide in hydrogen-rich gas stream through methanation over supported metal catalysts", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 29, n.10, pp 1065-1073.
- Yaccato, K. et al., 2005, "Competitive CO and CO₂ methanation over supported noble metal catalysts in high throughput scanning mass spectrometer", *Applied Catalysis A: General*, v. 296, n. 1, pp 30–48.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho

GENERATION OF SYNTHETIC METHANE THROUGH SABATIER REACTION AND HEAT RECOVERY THROUGH ORC.

Julián Camilo Restrepo Lozano, jcrestrepol@hotmail.com¹

Osvaldo José Venturini, osvaldo@unifei.edu.br¹

Electo Eduardo Silva Lora, silva.electo52@gmail.com¹

Diego Luiz Izidoro, diego.izidoro@unifei.edu.br¹

Laura Andrea Cortabarría Castañeda, cortabarrialaura@gmail.com²

¹ UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá - Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá – MG- Brasil

² CUC – Corporación universidad de la costa- Carrera 55 No 58-66 – Barranquilla, Atlántico, Colombia.

Abstract. *The humanity faces so many challenges, being one of the most important related with the climate change, due principally of the high consumption of fossil fuels and their consequent greenhouse effect. Therefore, nowadays, is too important found sustainable mechanism of energy production, looking for the utilization of the actual infrastructure and consequently facilitating the migration from the current energy resources.*

The production of the sustainable fuels is shown as a good solution for the problems exposed in the last statement. The Sabatier reaction is a very interesting process that allow the production of sustainable fuels, where the feedstocks are renewable hydrogen and carbon dioxide. This technology allows the diminution the emissions of carbon dioxide to the atmosphere and at the same time produce a fuel completely sustainable with high demand in industry.

The Sabatier reaction is a highly exothermic reaction ($\Delta H = -165,0 \text{ kJ/mol}$), instead, the reaction requires the presence of catalyzers based in Nickel or Ruthenium, to start. Due at the high energy released in the reaction, which can be harnessed through an Organic Rankine Cycle (ORC), decreasing the thermal losses in the process, which has a typical efficiency of 80%. Therefore, in this work, different variables of the production of synthetic methane and different working fluids of the ORC will be presented, looking for the best efficiency in this process and finally harnessing a synthetic methane with high purity grade.

Keywords: Sabatier Reaction, Renewable hydrogen, Synthetic Methane, ORC.