

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA REFORMA A VAPOR DO METANO A PARTIR DO GÁS NATURAL PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

AUTORES:

Katherine Carrilho de Oliveira¹, Maria Cecília Bezerra Caldas²

INSTITUIÇÃO:

^{1,2} Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA REFORMA A VAPOR DO METANO A PARTIR DO GÁS NATURAL PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Abstract

Industrial processes usually involve a high energy consumption and studies that focus in the reduction of this consumption are becoming increasingly important. One of the ways to optimize the energy consumption of an industrial plant is energy integration being the Pinch method one of the oldest that exists, but still one of the most efficient. In this study, the process of obtaining hydrogen from natural gas was chosen, because it presents water (liquid and vapor) as a utility destined to heat exchange during the process, causing a high cost to supply the demand. In addition, this process is of great importance, since the search for alternatives to fossil fuels has been increasing and natural gas has a vast global reserve and a great potential for application. The use of hydrogen as fuel has been pointed out over the last decades as one of the possible solutions for energy shortages and pollutant emission in the atmosphere. Thus, this work aims to analyze the reduction of energy expenditure of a steam reforming plant of methane from natural gas for the production of hydrogen using the Pinch method for energy integration and an investment analysis necessary for the implementation of the proposed changes to the process. For the simulation of the process was used the ProSim software and then the data were analyzed in the extension Simulis Pinch. After the calculations and discussion of the results, a reduction in energy expenditure of approximately 82% was achieved with the change of the three initial utilities by two others and the addition of three integration heat exchangers. This brought the need for an investment around \$1.2 million, with financial return in about one month of operation of the new plant.

Introdução

A maior parte da energia consumida mundialmente é proveniente de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) sendo, em sua maioria, consumido pelos setores industrial e de transportes. Os combustíveis fósseis são um bem escasso, na posse de apenas alguns países, o que consequentemente provoca uma escalada mundial dos seus preços. Estes combustíveis, além dos seus preços elevados, têm outro aspecto negativo: os elevados níveis de poluição derivados da sua utilização (MAIA, 1976).

De acordo com este panorama, tem-se procurado formas alternativas e competitivas de produzir energia que possa substituir esses combustíveis, tais como o biogás, o gás natural, o óleo vegetal e combustíveis hidrogenados.

Para que o mercado dos combustíveis deixe de ser dominado pelos combustíveis fósseis é necessária a aplicação incessante de esforços para o desenvolvimento de novas tecnologias competitivas economicamente e ambientalmente limpas (MAIA, 1976).

Ao longo das últimas 4 décadas, vêm-se apontando como uma das possíveis soluções para a emissão de poluentes na atmosfera a utilização do hidrogênio como combustível que emite apenas vapor de água durante a sua combustão. A forma mais utilizada para obtenção industrial de hidrogênio é através de combustíveis fósseis por tecnologias de reforma de hidrocarbonetos a partir do gás natural (CHISALITA, D.-A.; CORMOS, C.-C., 2019).

A reforma a vapor é o processo mais utilizado na produção de hidrogênio por ser o mais eficiente do ponto de vista econômico. Esse processo é baseado na reação endotérmica de equilíbrio entre o metano (ou outros hidrocarbonetos) e o vapor na presença de catalisadores metálicos e sob temperaturas elevadas (acima de 800 °C) e na reação de *shift* entre o gás de síntese e o vapor de água.

Nesse processo são utilizados trocadores de calor que utilizam correntes de aquecimento e resfriamento (utilidades) (CESÁRIO, M. R., 2013).

A integração energética ou síntese energética é um estudo do processo focando no uso eficiente da energia através de uma análise das correntes que necessitam ser resfriadas ou aquecidas, ou seja, que precisam de uma troca de calor. Nessa análise, são realizados cálculos que visam cruzar as correntes com o objetivo de diminuir o consumo de energia. Como resultado, é obtida uma rede de trocadores na qual é possível visualizar onde exatamente vai haver intersecção de temperaturas e a temperatura atingida pelo fluido em cada parte do processo. Apesar disso, é possível que as correntes disponíveis não sejam suficientes para as trocas de calor que precisam ser realizadas no processo e, caso isso aconteça, são aplicadas utilidades nas partes que forem necessárias. Esse método de otimização da rede de trocadores de calor é chamado de método do ponto de estrangulamento térmico ou método *Pinch* (TURTON *et al.*, 1998).

Para uma melhor visualização do processo antes e depois da integração energética, a simulação se apresenta como uma etapa extremamente importante. Além disso, é a partir dela que são retirados os dados iniciais que são necessários aos cálculos da integração energética. A simulação de processos industriais é uma área de grande relevância, já que permite a resolução de balanços de massa e de energia altamente complexos.

Com isso, o objetivo desse trabalho foi realizar a integração energética do processo de produção de hidrogênio pelo método de reforma a vapor a partir de gás natural, bem como ver o impacto gerado quanto ao gasto energético do processo e financeiro.

Metodologia

A metodologia desse trabalho consiste nas etapas descritas pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 1.

Figura 1. Descrição da metodologia.



O estudo de caso selecionado consistiu em uma planta de produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás natural cujas condições operacionais foram descritas por Lira, Lima Filho e Lucena, 2018 cuja composição molar do gás natural na entrada e as condições iniciais do processo encontram-se nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Composição molar da corrente de entrada de gás natural.

Componente	Composição molar (%)
Nitrogênio	0,6
Gás carbônico	1,62
Metano	88,68
Etano	5,84
Propano	2,34
Isso Butano	0,33
N-Butano	0,44
Iso Pentano	0,08
N-Pentano	0,05
Hexano	0,03

Fonte: Autor.

Tabela 2. Condições iniciais das correntes do processo.

Condições	Gás Natural	Água
Temperatura (°C)	40,0	25,0
Pressão (Pa)	101325,0	101325,0
Vazão mássica (kg/s)	5,0	12,0

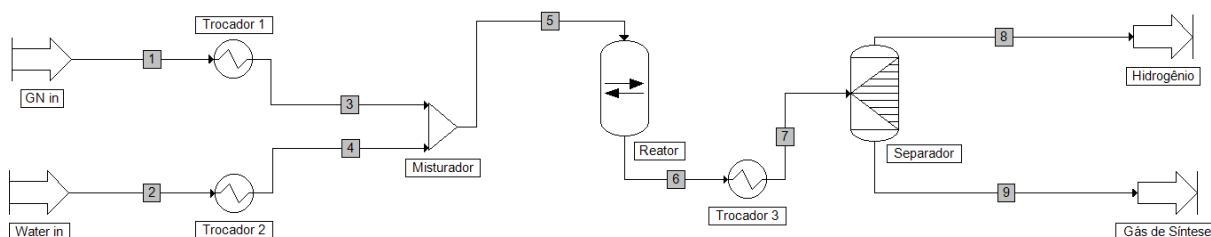
Fonte: Autor.

O processo foi simulado utilizando o *software* ProSim (*Software and Services in Process Simulation*) e a integração energética foi realizada utilizando a ferramenta *Simulis Pinch*, do domínio do ProSim, que funciona como um complemento do Excel.

Resultados e Discussão

A simulação realizada antes da integração energética teve o resultado apresentado na Figura 9.

Figura 2. Simulação do processo antes da integração energética.



Fonte: do autor.

Como esse resultado é antes da integração, têm-se três utilidades no processo que são as correntes de aquecimento ou resfriamento utilizadas nos trocadores de calor. Os dados de temperatura de entrada e saída e calor trocado são apresentados na Tabela 3 de acordo com o seu índice e nome atribuído na Figura 2.

Tabela 3. Dados dos trocadores referentes à simulação antes da integração energética.

Equipamento	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)	Q (kJ/s)
Trocador 1	40,0	100,0	661,791
Trocador 2	25,0	100,0	32146,090
Trocador 3	1000,0	50,0	47062,167

Fonte: Autor.

A quantidade de hidrogênio obtida na corrente “8” após o separador é de aproximadamente 0,93 kg/s. Para o gás de síntese, o importante é a razão H_2/CO , e essa cai, como esperado, após o separador. Antes desse era de cerca de 4,1, resultado, inclusive, muito próximo do obtido por LIRA, FILHO e LUCENA (2018) no trabalho utilizado como referência para esse processo. Após o separador, na corrente “9”, a razão é de cerca de 1,63, tendo em vista que foi selecionada uma recuperação de 60% para o hidrogênio na simulação do separador. Esse valor se torna ideal para a produção de petroquímicos como etanol ou para ser usado para a produção de hidrocarbonetos líquidos.

Com a simulação pronta, foram extraídos com o auxílio da ferramenta do ProSim os dados utilizados na integração energética que se encontram apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados obtidos no ProSim para a integração energética.

Número da Corrente	Tipo de Corrente	Estado Físico	F.c _p (kJ/s.°C)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)	Q (kJ/s)
1	Fria	V	11,028	40,00	100,00	661,791
2	Fria	L	54,363	25,00	101,47	4158,129
2	Fria	LV	2798366,924	101,47	101,47	27989,021
2	Quente	V	0,713	101,47	100,00	1,058
6	Quente	V	49,530	1000,00	50,00	47062,169

Fonte: Autor.

A partir da Tabela 4, é possível perceber que a corrente “2”, que corresponde a de entrada de água no trocador “2”, é dividida em três partes. Essa “quebra” é realizada tendo em vista que a água entra em estado líquido e sai em estado vapor, ou seja, tem mudança de fase no trocador de calor.

Para que a integração dessa corrente seja realizada, serão consideradas as três partes separadamente. Tem-se a primeira parte de aquecimento do líquido; depois, a fase na qual a temperatura é praticamente constante e há apenas troca de calor latente (mudança de fase); e por fim, é necessário um resfriamento na corrente de vapor, pois na mudança de fase ela fica cerca de 1,5 °C mais alta que a desejada.

Esses dados, então, foram inseridos no Simulis *Pinch*. O resultado obtido indicou que seriam necessários três trocadores de integração e duas utilidades. E para cada um desses, foram fornecidas as informações apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Informações dos trocadores de integração.

Corrente Fria		Corrente Quente		Q (kJ/s)
Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)	
101,47	101,48	1000,00	435,01	27989,021
25,00	101,47	133,94	50,00	4158,130
40,00	100,00	147,30	133,94	661,791

Fonte: Autor.

Tabela 6. Informações das utilidades calculadas.

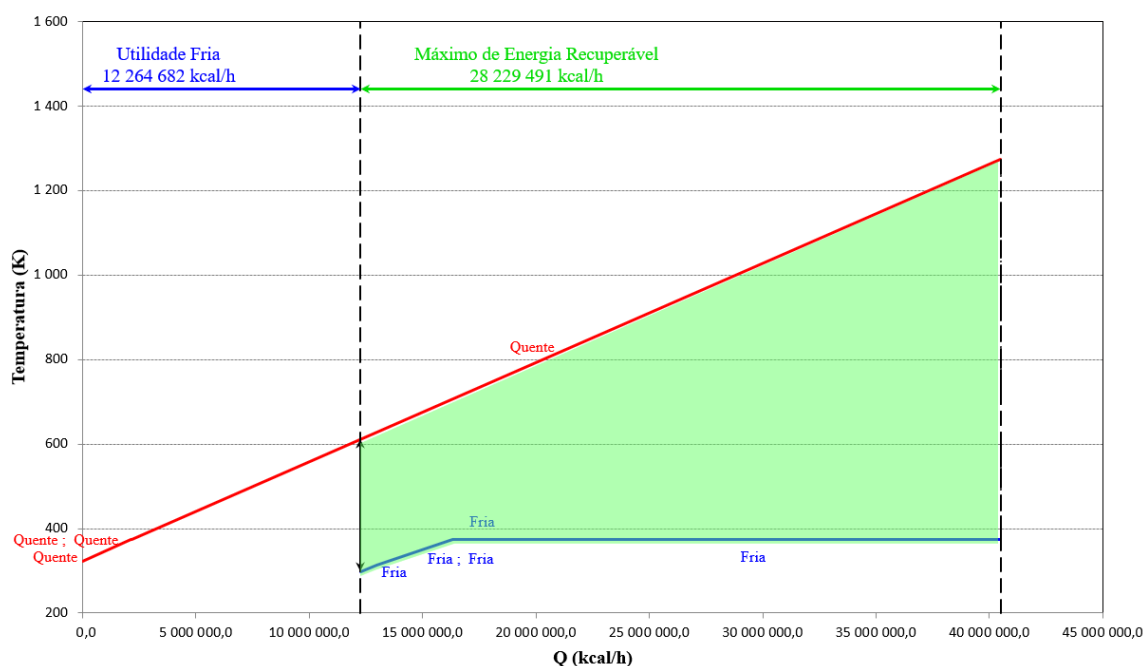
Tipo de	Estado	F.c _p (kJ/s.°C)	Temperatura de	Temperatura	Q (kJ/s)
---------	--------	----------------------------	----------------	-------------	----------

Corrente	Físico		Entrada (°C)	Objetivo (°C)	
Quente	V	0,713	101,48	100,00	1,060
Quente	V	49,530	435,01	147,30	14253,228

Fonte: Autor.

Foi obtida a curva composta referente às correntes frias e quentes do processo (Figura 11). Este diagrama permite determinar a quantidade máxima de calor que pode ser integrado no processo, através da transferência direta de uma corrente para a outra. Este valor pode ser lido no gráfico na zona destacada em verde, correspondendo ao comprimento, projetado no eixo horizontal, da zona onde ocorre a sobreposição das duas curvas individuais (32808,942 kJ/s). A zona não sobreposta pode ser identificada com o consumo necessário da utilidade (14251,962 kJ/s de arrefecimento), zona essa localizada do lado esquerdo do diagrama para esse caso.

Figura 3. Curva composta.

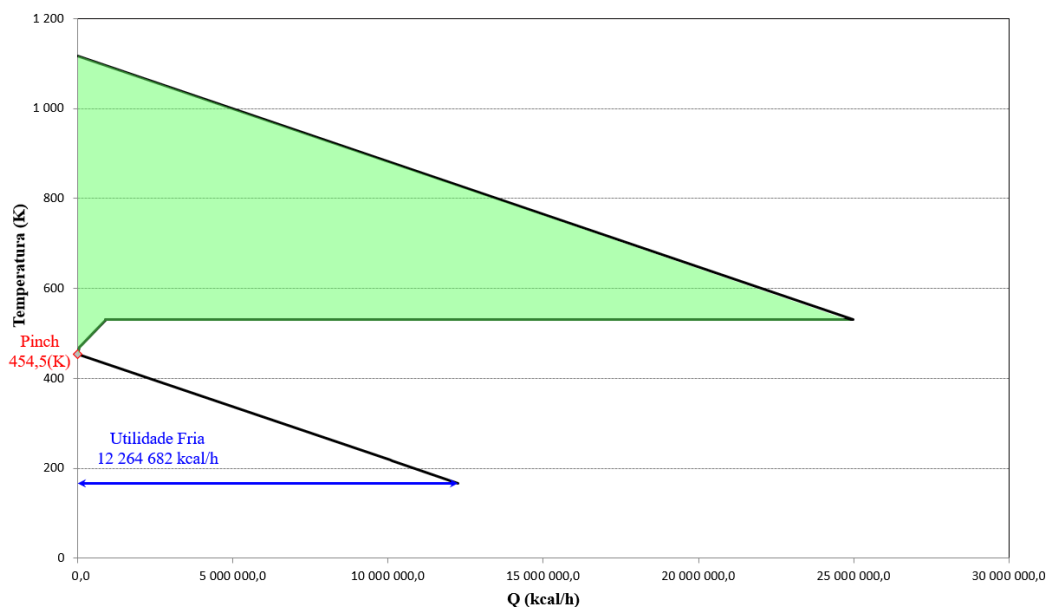


Fonte: Autor.

É importante destacar ainda a grande curva composta (Figura 4). Essa, é construída a partir das curvas compostas, podendo ser usada como uma ferramenta de projeto para especificar as utilidades.

Esta curva indica de modo claro quanta energia tem que ser suprida pelos vários níveis de utilidades. Aqui são plotadas as disponibilidades (acima do *Pinch point*) e as necessidades (abaixo do *Pinch point*) de energia do processo, como função da temperatura. Os diversos níveis de temperaturas das utilidades disponíveis estão diretamente ligados aos seus custos. Normalmente, as utilidades quentes de maior temperatura e as utilidades frias de menor temperatura possuem um custo maior, ou seja, quanto mais afastada da temperatura ambiente, mais cara é a utilidade, sendo então preferível maximizar o uso de utilidades com temperaturas mais próximas à ambiente.

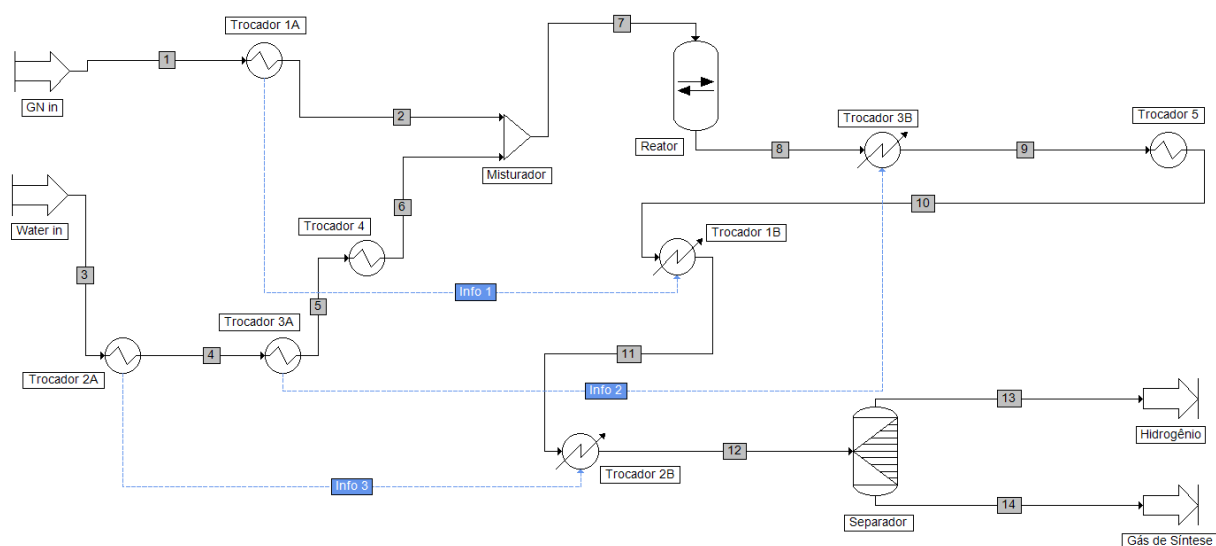
Figura 4. Grande curva composta.



Fonte: Autor.

Com os resultados obtidos na integração energética, foi realizada uma nova simulação, apresentada na Figura 5.

Figura 5. Simulação do processo após a integração energética.



Fonte: Autor.

Para facilitar a visualização, os trocadores de integração são representados como dois pelo ProSim e são ligados por uma linha chamada “linha de informação” (linha azul pontilhada). A representação é feita dessa maneira para indicar que a corrente quente após o reator está recebendo as informações das correntes frias do início do processo que vão precisar ser aquecidas para entrar no misturador. Sendo assim, como calculado, temos três trocadores de integração e duas utilidades.

Com os dados obtidos pela integração energética foi realizada uma análise de custos com relação às utilidades e aos novos trocadores de calor. Para as utilidades chegou-se a uma economia de energia de cerca de 82% quando comparado ao processo antes da integração energética. Analisando o investimento necessário para os novos trocadores de calor, observou-se que, após um mês de funcionamento da planta, o capital investido já seria retornado (*payback*).

Conclusões

Através da análise da integração energética do processo de produção de hidrogênio utilizando uma planta de reforma a vapor através do gás natural observou-se que seria possível realizar uma otimização adicionando-se três trocadores de calor de integração com apenas duas correntes de utilidades. Após a nova simulação do processo com os dados obtidos da rede de trocadores de calor foi possível perceber uma redução de 82% do gasto energético da planta com as utilidades. Para isso seria necessário investir em trocadores de calor de integração que teriam o retorno do investimento em apenas um mês de funcionamento da planta. Com isso, tem-se que o método de Pinch é eficiente para a análise e otimização energética de processos e se torna uma prática interessante tanto do ponto de vista financeiro como energético.

Agradecimentos

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte e a Université de

Referências Bibliográficas

CESÁRIO, M. R. Reforma a vapor catalítica do metano: otimização da produção e seletividade em Hidrogênio por absorção in situ do CO₂ produzido. 2013, 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.

CHISALITA, D.-A.; CORMOS, C.-C. Techno-economic assessment of hydrogen production processes based on various natural gas chemical looping systems with carbon capture. **Energy**, v. 181, p. 331-344, 2019.

LIRA, R. L. T. C.; FILHO, N. M. L.; LUCENA, S. Simulação da produção de hidrogênio industrial e gás de síntese via gás natural utilizando o *software aspen hysys*. **Revista de Química Industrial**, ano 16, v. 758, p. 53-61, 2018.

MAIA, N. A. Obtenção e emprego de hidrogênio em motores. Tese de doutorado – UFRN, 1976.

PROSIM. Software & Services in Process Simulation. Disponível em: <<http://www.prosim.net/fr/index.php>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

SIMULIS *PINCH*. Software Simulis *Pinch* Process Energy Integration in Microsoft Excel. PROSIM. Disponível em: <<http://www.prosim.net/en/software-simulis-Pinch-process-energy-integration-in-microsoft-excel-%99-13.php>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

SINNOTT, R. K. **Coulson & Richardson's Chemical Engineering – Chemical Engineering Design**. 4 ed., v. 6, Oxford: Butterworth Heinemann, 2005.

SISTEMA FIRJAN. Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil? Estudos para o desenvolvimento da cidade do Rio de Janeiro. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

TURTON, R. *et al.* **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. 3 ed., New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998.