

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS MEDIANEIRA
ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS

GIOVANI SILVERO PATUZZO

**OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE ABSORÇÃO POR
WATER SCRUBBING NO REFINO DE BIOGÁS**

MONOGRAFIA

MEDIANEIRA

2019

GIOVANI SILVERO PATUZZO

**OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE ABSORÇÃO POR
WATER SCRUBBING NO REFINO DE BIOGÁS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Laércio Mantovani Frare

MEDIANEIRA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE ABSORÇÃO POR WATER SCRUBBING NO REFINO DE BIOGÁS

por

GIOVANI SILVERO PATUZZO

Esta Monografia foi apresentada em 3 de Maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Laercio Mantovani Frare
Prof.(a) Orientador(a)

Rafael Arioli
Membro titular

Simoni Spohr Venzon
Membro titular

RESUMO

PATUZZO, Giovani Silvero. **Otimização e análise do processo de absorção por water scrubbing no refino de biogás**. 2019. 24 páginas. Monografia .
Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

Para que o biogás seja utilizado como combustível, são requeridos tratamentos para remoção de contaminantes, como por exemplo, o dióxido de carbono (CO_2). Mundialmente utilizados, sistemas de lavagem por água ou Water Scrubbing são extremamente eficientes quanto à remoção de CO_2 e utilizam o princípio de solubilidade deste gás na água. O processo ocorre em colunas de absorção, onde duas das variáveis que supostamente influenciam a concentração final de CO_2 são estudadas, sendo elas: temperatura da água e razão entre a vazão de água e vazão do biogás (L/G). Através de simulações no software Hysys® e análise dos resultados gerados por meio da metodologia DCCR, foi possível constatar e quantificar a influência das variáveis na resposta (remoção de CO_2). Sendo demonstrado, por exemplo, que conforme aumenta-se a relação L/G, menos expressiva é a influência da temperatura no processo de remoção de CO_2 . Além disso, dentro da faixa das variáveis estudadas, a eficiência na remoção de CO_2 ficou entre 94,73% a 99,80%, demonstrando eficiência e robustez no processo.

Palavras-chave: simulação. Processo. DCCR.

ABSTRACT

PATUZZO, Giovani Silvero. **Process optimization and analysis of the absorption process by water scrubbing in biogás refining**. 2019. 24 pages. Monografia. Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

For biogas to be used as fuel, treatments are required to remove contaminants, such as carbon dioxide (CO₂). Worldwide used, water scrubbing systems are extremely efficient in the removal of CO₂ and use the principle of solubility of this gas in water. The process takes place in absorption columns, where two of the variables that supposedly influence the final concentration of CO₂ are studied, which are: water temperature and ratio between water flow and biogas flow (L/G). Through simulations in the Hysys® software and analysis of the results generated by the DCCR methodology, it was possible to verify and quantify the influence of the variables on the response (CO₂ removal). For example, as the L/G ratio is increased, the influence of temperature on the CO₂ removal process is less significant. In addition, within the range of the studied variables, the CO₂ removal efficiency was between 94.73% and 99.80%, demonstrating efficiency and robustness in the process.

Keywords: simulation. Process. DCCR

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Número de plantas de biometano na Europa e suas respectivas tecnologias de refino	10
Figura 2 - Fluxograma do processo de tratamento de biogás estudado	12
Figura 3 - Fluxograma da coluna de absorção	13
Figura 4 - Gráfico de Pareto para resposta Y	19
Figura 5 - Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) em função da temperatura da água e L/G para a Eficiência de remoção de CO ₂	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados de monitoramento Refinaria – UD CIBiogás.....	13
Tabela 2 - Valores codificados e reais utilizados no DCCR	15
Tabela 3 - Valores do delineamento experimental	15
Tabela 4 - Matriz do delineamento e resposta	17
Tabela 5 - Coeficientes de regressão para a resposta eficiência de remoção de CO ₂	18
Tabela 6 - ANOVA para a resposta eficiência de remoção de CO ₂ (intervalo de confiança de 95%)	20

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO	12
2.2 MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO.....	13
2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO ...	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4 CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

As energias provenientes de fontes de energia renovável vêm aumentando mundialmente, segundo os dados apresentados pela Agência Internacional de Energia (IEA) no relatório *Renewables 2018* (IEA,2018). Os problemas ambientais atribuídos aos combustíveis fósseis, bem como à sua volatilidade de custos, fortalecem ainda mais o desenvolvimento de novas fontes de energia. Nesta visão, o biogás surge como uma alternativa sustentável e com um potencial de investimento exponencial na matriz energética brasileira.

O Brasil tem o agronegócio como principal de fonte de receita do PIB. A participação do agronegócio no PIB foi de, aproximadamente, 24% em 2017. Atrelado a isto há um enorme potencial de produção de biometano, onde segundo Milanez et al., (2018), os resíduos agroindustriais são responsáveis por 75% do potencial de matérias-primas a serem exploradas para a produção do biogás. Além disso, dados apresentados por Milanez et al., (2018), estimam que o país tenha um potencial de produção de biometano de, aproximadamente, 71 milhões de m³ por dia, provenientes do agronegócio. Segundo a EPE (2017), estima-se suprir com este potencial, por volta de, 50% da demanda de diesel do setor agroindustrial até 2026.

Para que o biogás seja utilizado como substituto de alguns tipos de combustíveis, como no caso de combustíveis veiculares, este deve ser tratado retirando elementos que são danosos aos equipamentos e que reduzem seu poder calorífico. Os principais elementos a serem retirados são dependentes de sua aplicação, sendo principalmente o Dióxido de Carbono (CO₂), Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e a umidade (H₂O).

No ano de 2015 a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) emitiu a Resolução Nº 8 definindo o biogás como gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos. Além disso, também denominou o biogás purificado como Biometano. Desta forma a resolução estabeleceu a qualidade mínima que o biometano deve ter para ser equivalente à outros combustíveis atualmente comercializados.

Se o biometano é considerado o futuro do gás renovável no Brasil, as tecnologias de refino tornam-se a peça fundamental na cadeia de produção. Atualmente inúmeras técnicas tratamento são ofertadas no mercado. Algumas utilizam o

princípio da diferença entre a solubilidade do CO_2 , H_2S e metano (CH_4) em diferentes solventes, onde pela solubilidade do CO_2 ser maior em relação a CH_4 , este passa pelo processo sendo pouco absorvido e, por consequência, o gás final do processo possui uma maior concentração de CH_4 . Um solvente comumente utilizado em tal processo é a água e o processo é denominado *Water Scrubbing* (WS) (HOYER et al.,2016).

O estudo proposto contempla o processo denominado *Water Scrubbing*, por ser mundialmente conhecido e uns dos mais utilizados no refino de biogás. Segundo informações apresentadas por Wall et al, (2018), mais de 30% das plantas em todo o mundo que produzem biometano, utilizam tal processo, como é apresentado na Figura 1.

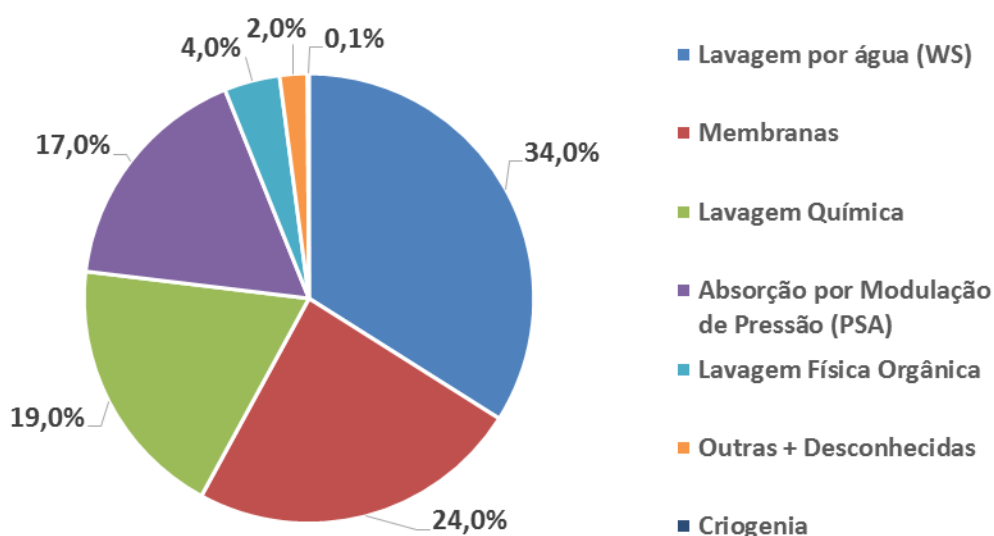


Figura 1 - Número de plantas de biometano na Europa e suas respectivas tecnologias de refino
Fonte: Adaptado de Wall et al. (2018)

Segundo SVENSSON et al. (2016), até 2016 existiam 4 plantas de produção de biometano no Brasil, das quais 2 utilizavam equipamento WS e 2 sistemas *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Dentre as unidades que utilizam a tecnologia WS, tem-se a planta instalada no Oeste do Paraná, operada pela empresa CIBiogás. A planta tem como função tratar os resíduos orgânicos gerados por 4 restaurantes, produzir biometano e abastecer uma pequena frota de veículos leves e utilitários.

O sistema *WS*, instalado na planta, foi desenvolvido por uma empresa nacional e sua operação, bem como alguns parâmetros, foram acompanhados desde o início de seu funcionamento. Após 12 meses da implantação, alguns parâmetros monitorados demonstraram a necessidade de mudanças operacionais para aumentar a eficiência quanto à remoção de CO_2 e quanto a perda de CH_4 durante o processo. Desta forma o presente estudo avalia a influência das variáveis operacionais “Temperatura da água” e “razão entre a vazão de Líquido e Gás (L/G)” na concentração final de CO_2 no gás tratado pelo sistema. Devido à dificuldade de controle de tais variáveis no processo real, foram realizadas simulações computacionais por meio do software ASPEN Hysys®. A partir dos dados gerados nas simulações utilizou-se a ferramenta de planejamento experimental denominada Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para análise da influência das variáveis operacionais estudadas na Eficiência de Remoção de CO_2 a partir do processo *WS*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

As seleção do sistema a ser estudado foi decorrente à necessidade de melhorias na operação no equipamento já em funcionamento na planta de biogás denominada UD-CIBiogás, instalada na cidade de Foz do Iguaçu/PR. O processo pode ser representado pelo fluxograma apresentado na Figura 2. Note que o equipamento se diferencia dos principais sistemas *WS* principalmente pela ausência de uma coluna flash. O estudo será limitado ao processo que ocorre na coluna de absorção de CO₂.

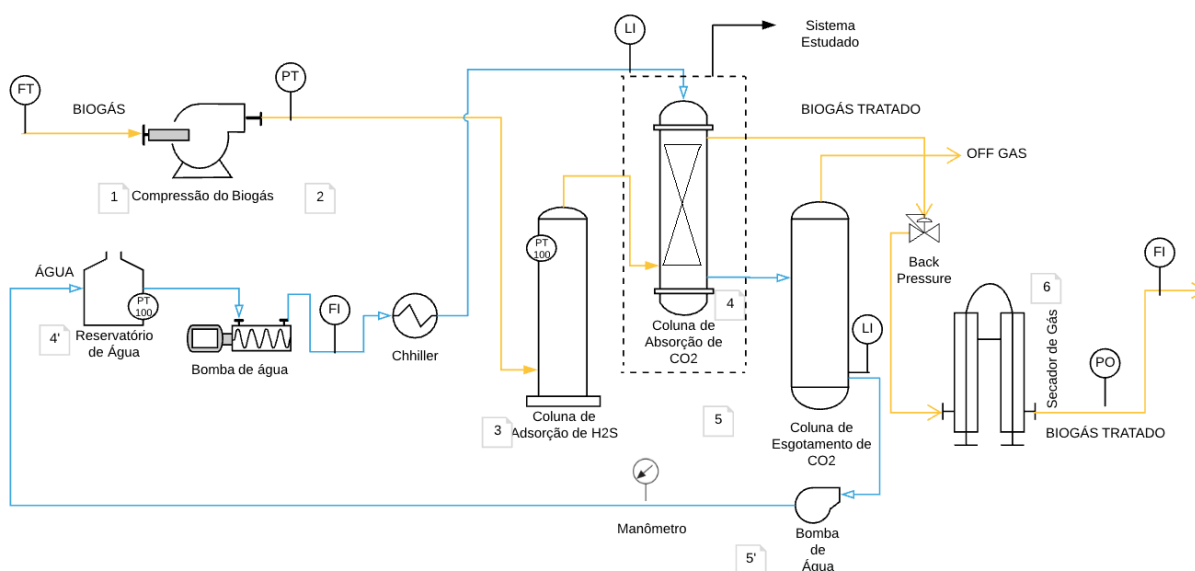


Figura 2 - Fluxograma do processo de tratamento de biogás estudado

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Na coluna de absorção ocorre a passagem de biogás comprimido, em fluxo ascendente, e de água, em fluxo descendente, com o objetivo de remover o dióxido de carbono presente no biogás (Figura 3). As dimensões adotadas no estudo da coluna são exatamente como hoje no equipamento, sendo elas: 330 mm de diâmetro, 5,5 metros de altura.

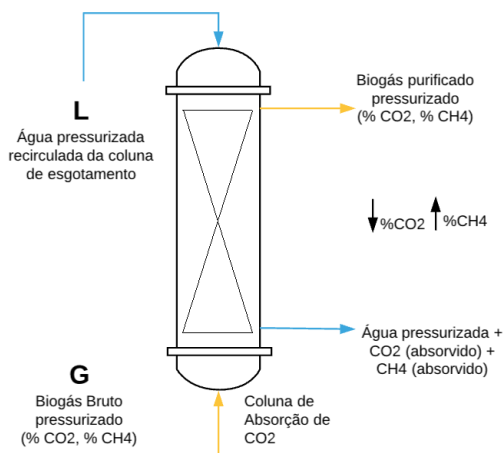


Figura 3 - Fluxograma da coluna de absorção

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.2 MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO

Dentre as inúmeras variáveis presentes no processo de absorção, foram definidas como objeto de estudo apenas duas: temperatura da água e razão Líquido/Gás. A escolha se deu principalmente pela possibilidade de controle de tais variáveis no processo real. Para a simulação no software Aspen Hysy[®], foram assumidas as seguintes premissas:

- Dimensões da coluna – 330 mm de diâmetro e 5,5 metros de altura;
- Composição de entrada do biogás no processo: Média da composição segundo os dados de monitoramento apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Dados de monitoramento Refinaria – UD CIBiogás.

Meses monitorados	Média Mensal			
	Composição do Biogás			
	%CH ₄	%CO ₂	%O ₂	H ₂ S - ppm
Mar/18	55,73	43,65	0,55	678,9
Abr/18	58,64	40,85	0,45	594,44
Mai/18	62,96	36,54	0,47	285,09
Jun/18	65,82	33,72	0,43	267,82
Jul/18	63,24	36,27	0,5	0,001
Ago/18	60,47	38,89	0,6	346,64
Set/18	57,47	41,87	0,63	384,58

Out/18	57,33	42,19	0,41	686,77
Média	60,21	39,25	0,51	405,53
Desvio Padrão	3,52	3,47	0,08	236,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

- Considera-se um sistema binário, ou seja, apenas um componente é transferido de uma fase para outra (Exemplo: dióxido de carbono-água, metano-água);
 - A corrente de água será considerada pura, ou seja, sem a presença de qualquer gás absorvido;
 - A absorção é considerada isotérmica;
 - Cada estágio será considerado como ideal;
 - Foram considerados 7 estágios ideais;
 - O soluto transferido entre as fases não mudará as vazões de gás e de líquido;
 - A pressão é constante ao longo da coluna;
 - A vazão do gás de entrada será fixada em $25 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e a vazão de água será variada para atender a relação L/G estipuladas no planejamento experimental;
 - A pressão do sistema será definida em 9,6 bar;

Um estudo apresentado por COZMA et al. (2014) abordou diferentes abordagens na modelagem utilizando o software ASPEN, e concluiu que para processo de absorção com pressões até 10 bar em condições de regime permanente, os modelos NRTL e UNIQUAC se mostraram apropriados. Desta forma o modelo a ser adotado na simulação será NRTL, usando o módulo de coluna de absorção.

2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Para identificação da influência dos parâmetros Temperatura da Água e Razão L/G na concentração de metano no biometano, foi realizado um planejamento experimental para otimização do processo através da metodologia DCCR. Os níveis

estudados no planejamento DCCR do processo *Water Scrubbing* foram definidos a partir das possíveis condições a campo e suportados pelas condições apresentadas no estudo realizado por COZMA (2014). Desta forma finalidade do planejamento experimental será determinar a faixa de operação onde fosse obtido a maior concentração de metano no biometano na maior temperatura de água e menor relação L/G. Pois, quanto menor a temperatura da água e maior a razão L/G, maior os gastos energéticos.

Desta forma, foi utilizado um DCCR com 11 pontos fatoriais, com 3 pontos centrais e 4 pontos axiais, totalizando 11 ensaios. Na Tabela 2 apresentam-se os parâmetros estudados no planejamento em valores reais e codificados.

Tabela 2 - Valores codificados e reais utilizados no DCCR

Valores codificados e reais utilizados no DCCR						
Variáveis	Código	-1,41	-1	0	1	1,41
Temperatura água [°C]	x ₁	5	7,9	15	22,1	25
Razão L/G [m ³ H ₂ O/Nm ³]	x ₂	0,136	0,141	0,154	0,167	0,172

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Na Tabela 3 estão apresentados os valores codificados e reais pertencentes ao delineamento experimental para a realização dos ensaios. Os resultados do planejamento experimental foram analisados através do programa *Protimiza Experimental Design*. Os modelos de predição e as respectivas superfícies de resposta serão calculados a um intervalo de confiança de 95% (p-valor<0,05).

Tabela 3 - Valores do delineamento experimental

Valores do delineamento experimental					
Ensaio		Temperatura água [°C]		Razão L/G [m ³ H ₂ O/Nm ³]	
		X ₁	Valor Real	X ₂	Valor Real
Ensaio nos pontos fatoriais	1	-1	7,9	-1	0,141
	2	1	22,1	-1	0,141
	3	-1	7,9	1	0,167
	4	1	22,1	1	0,167
Ensaio no	5	0	15	0	0,154

ponto central	5	0	15	0	0,154
	5	0	15	0	0,154
	6	-1,41	5	0	0,154
Ensaio nos	7	1,41	25	0	0,154
pontos axiais	8	0	15	-1,41	0,136
	9	0	15	1,41	0,172

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do planejamento experimental e as simulações no software Hysys®, avaliando a influência das variáveis L/G e temperatura da água, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Matriz do delineamento e resposta

Ensaio		Temperatura água [°C]		Razão L/G [m ³ H ₂ O/Nm ³]		CO ₂ Final[%]	Eficiência de Remoção CO ₂ [%]
		X ₁	Valor Real	X ₂	Valor Real		
Ensaio nos pontos fatoriais	1	-1	7,9	-1	0,141	0,07%	99,82%
	2	1	22,1	-1	0,141	2,07%	94,73%
	3	-1	7,9	1	0,167	0,02%	99,95%
	4	1	22,1	1	0,167	0,50%	98,73%
Ensaio no ponto central	5	0	15,0	0	0,154	0,19%	99,52%
	6	0	15,0	0	0,154	0,19%	99,52%
	7	0	15,0	0	0,154	0,19%	99,52%
Ensaio nos pontos axiais	8	-1,41	5,0	0	0,154	0,02%	99,95%
	9	1,41	25,0	0	0,154	1,86%	95,26%
	10	0	15,0	-1,41	0,136	0,51%	98,70%
	11	0	15,0	1,41	0,172	0,08%	99,80%

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

É possível observar que, dentro da faixa das variáveis estudadas, a eficiência na remoção de CO₂ ficou entre 94,73% a 99,80% e por consequência a concentração final de CO₂ ficou entre 0,08% a 2,07%.

Pode se observar que quando a relação L/G é fixada e há uma redução na temperatura (Ensaio 1 a 4), a eficiência de remoção de CO₂ aumenta. Contudo a variação percentual da eficiência de remoção de CO₂ se difere quando fixadas diferentes razões L/G, ou seja, nos ensaios 1 e 2 (L/G=0,141) a variação foi de 5%, já nos ensaios 3 e 4 (L/G=0,167) foi de 1%. Demonstrando que conforme aumenta-

se a relação L/G, menos expressiva é a influência da temperatura no processo de remoção de CO₂.

Com a fixação da temperatura e variação da relação L/G também nota-se uma variação percentual na resposta. Ou seja, fixada a temperatura de 7,9°C e variado o L/G (ensaios 1 e 3) a variação é de 0,13% na eficiência quanto a remoção de CO₂. Já quando mantém-se a temperatura em 22,1°C (ensaios 2 e 4), a resposta é 4,05% maior na razão L/G= 0,167. Portanto, a influência da relação L/G sobre a resposta é reduzida conforme a temperatura da água é reduzida.

De posse de todos os resultados e utilizando o software Protimiza® para avaliação dos resultados segundo o método DCCR, obteve-se os efeitos das duas variáveis, as quais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de regressão para a resposta eficiência de remoção de CO₂

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	99,52	0,24	413,18	0,0000
x ₁ (L)	-1,62	0,15	-10,97	0,0001
x ₁ ² (Q)	-0,99	0,18	-5,62	0,0025
x ₂ (L)	0,71	0,15	4,82	0,0048
x ₂ ² (Q)	-0,16	0,18	-0,94	0,3904
x ₁ .x ₂	0,97	0,21	4,64	0,0056

Legenda: x₁ representa a variável temperatura codificada, x₂ representa a variável L/G codificada, L (termo linear) e Q (termo quadrático).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os resultados apresentados na Tabela 5, e corroborados na Figura 4, demonstram que todos os coeficientes lineares são significativos no processo, considerando um nível de significância p-valor menor que 0,05. Ou seja, o resultado confirma a influência das variáveis (Temperatura da água e L/G) na resposta (remoção de CO₂), bem como o efeito a partir da interação entre elas. Pode se destacar, pela leitura dos sinais dos coeficientes, que ao se reduzir a temperatura, a eficiência na remoção é aumentada. Assim como, se aumentar a relação L/G a eficiência também é aumentada. Nota-se também que a temperatura da água é a variável de maior influência na remoção de CO₂, haja visto seu coeficientes de regressão maiores que da razão L/G.

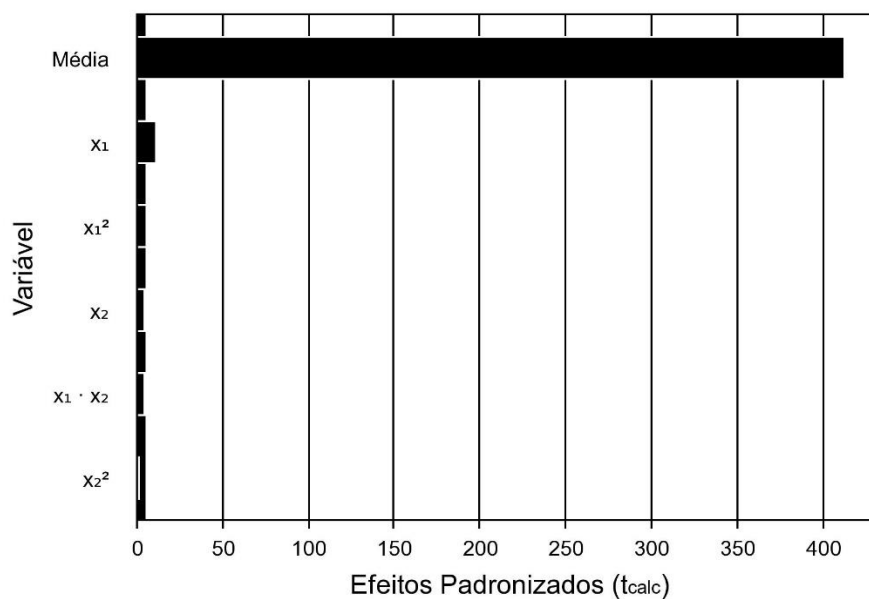


Figura 4 - Gráfico de Pareto para resposta Y
Fonte: Autor (2019)

A equação que governa o efeito das variáveis Temperatura e L/G na eficiência de remoção de CO₂, é apresentada como:

$$\text{Eficiência de remoção de CO}_2 = 99,52 - 1,62x_1 - 0,99x_1^2 + 0,71x_2 - 0,16x_2^2 + 0,97x_1x_2$$

Eq.1

Onde,

x_1 : Temperatura da água

x_2 : Razão L/G

A fim de avaliar de forma mais exata os resultados das simulações, fez-se o uso da análise de variância (ANOVA), a qual é utilizada para avaliar a significância estatística do modelo (Tabela 6).

Tabela 6 - ANOVA para a resposta eficiência de remoção de CO₂ (intervalo de confiança de 95%)

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	34,3	5	6,9	39,4	0,0005 ₁
Resíduos	0,9	5	0,2		
Falta de Ajuste	0,9	3	0,3		
Erro Puro	0	2			
Total	35,2	10			

% variação aplicada (R²) = 97,53% e F_{5,5;0,05} = 5,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A ANOVA indicou uma variação explicada de 97,53%, ou seja, o modelo matemático representa este percentual dos valores que foram estudados. Além disso, o F_{calc} foi 7,8 vezes superior ao tabelado e o p-valor menor que 0,05. Tais resultados sugerem que o modelo é preditivo para a faixa estudada. E portanto, foi possível gerar as superfícies de resposta e as curvas de contorno (Figura 5) que representam o efeito da temperatura da água e a razão L/G na eficiência de remoção de CO₂.

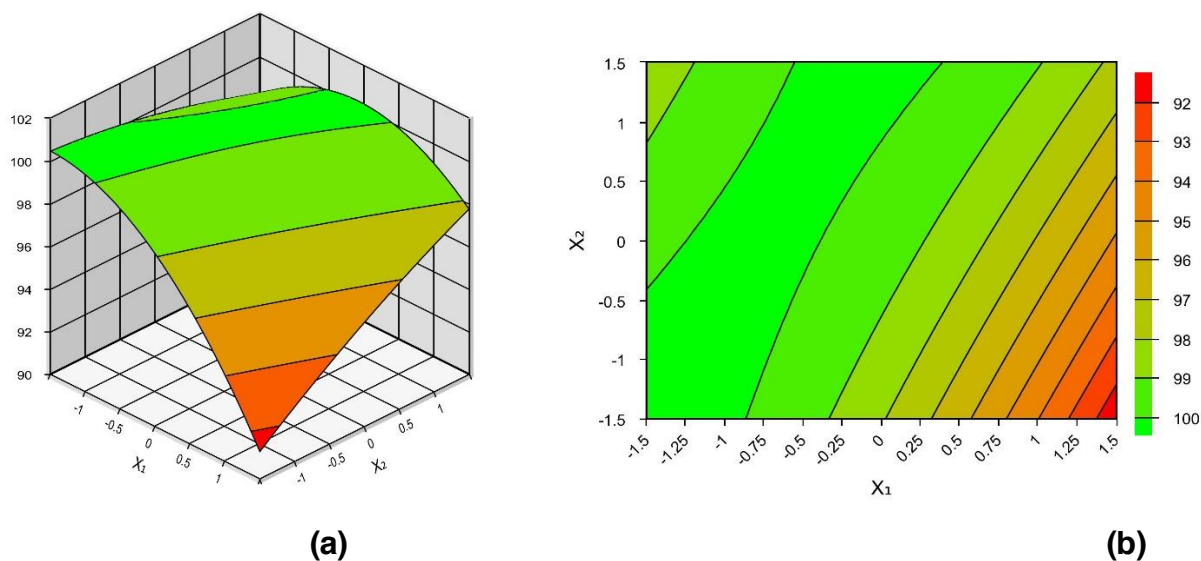


Figura 5 - Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) em função da temperatura da água e L/G para a Eficiência de remoção de CO₂

Fonte: Autor (2019).

A superfície gerada pelo modelo apresenta graficamente a relação entre as variáveis em estudo e a resposta para o intervalo estudado. É possível verificar na Figura 5(a) que a superfície atingiu um ponto de inflexão (cor verde mais claro), o que indica uma região de máxima eficiência de remoção de CO₂. Nota-se a robustez no processo quando busca-se uma eficiência de no mínimo 98%, e isto pode ser evidenciado pela grande área da Figura 5(b) referente a tal eficiência. Ou seja, se houver variações na operação do sistema, dentro do intervalo de estudo, a eficiência não é reduzida significativamente.

4 CONCLUSÕES

O biogás, como matéria prima para o combustível regulamentado e denominado biometano, necessita de tratamentos que possibilite atingir os requisitos mínimos do combustível renovável. Um dos tipos de tratamento, denominado *Water Scrubbing*, foi apresentado no presente trabalho e seu princípio de tratamento estudado, dando ênfase à influência da temperatura da água e razão L/G na eficiência de remoção de CO₂.

Com os objetivos de simular o processo de absorção em colunas num *software*, verificar a influência das variáveis citadas e qualificar as respostas por meio do métodos DCCR, afirma-se que o estudo executou o que foi proposto. Onde, inicialmente foram definidas as condições de contorno da simulação e realizadas simulações no software Hysys® após o delineamentos experimental proposto pelo método DCCR. Os resultados gerados nas simulações foram analisados pelo software Protimiza® e posteriormente interpretados.

A simulação do processo no software foi essencial para o estudo, pois permitiu a simulação do processo sem a necessidade de experimentos com o equipamento real, o que impraticável visto que no equipamento real não há controle sobre as variáveis analisadas. Além disso, os resultados avaliados sob a perspectiva do método DCCR, possibilitou a interpretação mais assertiva da influência das variáveis no resultado final. Constatou-se que ambas variáveis são influentes na concentração final do CO₂ e que conforme aumenta-se a relação L/G, menos expressiva é a influência da temperatura na resposta. Além disso, quanto menor a temperatura da água, menor é a influência da relação L/G sobre a resposta. De forma geral, ao reduzir a temperatura e aumentar a relação L/G, maior é a eficiência do processo em relação à remoção de CO₂. Ademais, o processo é robusto quando busca-se eficiências acima de 98% nas condições simuladas.

Como anteriormente citado, o estudo teve algumas limitações quanto as simulações do processo em campo, o que poderia resultar de respostas divergentes às simuladas. Contudo, as hipóteses confirmadas não se alterariam. Desta forma para confrontar os resultados obtidos no estudo sugere-se que as avaliações sejam realizadas em um equipamento real ou em uma bancada experimental. Também

sugere-se que sejam avaliadas outras variáveis na composição final do CO₂, como por exemplo em relação à pressão da coluna.

REFERÊNCIAS

COZMA, P.; WUKOVITS, W.; MAMALIGA, I.; FRIEDL, A.; GAVRILESCU, M. **Modeling and simulation of high pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading** Clean Techn Environ Policy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética**. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/apresentacoes-sobre-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

HOYER, K.; HULTEBERG, C.; SVENSSON M.; JERNBERG J.; NØRREGÅRD Ø. **Biogas upgrading – Technical Review** Energifork, 2016

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2018**. Disponível em: <<https://www.iea.org/renewables2018/>> Acesso em: 27 de março de 2017.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARAES, D. D.; MAIA, G. B. S.; SOUZA, J. A. P. S.; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: Panorama e perspectivas**. BIOGÁS BNDE Setorial 47, p. 221-276, 2018.

SVENSSON, M.; HOYER, K.; MURPHY, J. D. **Country Reports Summary 2016**. Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, IEA Bioenergy, 63p. Novembro, 2006.

WALL, D. M.; DUMONT M.; JERRY, M. D. **Facilitating a Future Green Gas Grid Through The Production of Renewable Gas**. Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, IEA Bioenergy, 32 p. Fevereiro, 2018.