



**Victor Cabral da Hora Aragão de Carvalho**

**AVALIAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DE FAZENDA  
DE ALGAS PRODUTORAS DE  
BIOCOMBUSTÍVEL EM UMA USINA DE  
ETANOL**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes



**Victor Cabral da Hora Aragão de Carvalho**

**AVALIAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DE  
FAZENDA DE ALGAS PRODUTORAS DE  
BIOCOMBUSTÍVEL EM UMA USINA DE  
ETANOL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Vallois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Maurício Cardoso Arouca**

Professor do Programa de Planejamento Energético – Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do  
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Abril de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Victor Cabral da Hora Aragão de Carvalho**

Graduou-se em Engenharia Ambiental Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, em 2010. Atua na área de Engenharia Ambiental, no campo de Petróleo e Energia com ênfase em Sistemas Energéticos e Avaliação de Impacto Ambiental.

#### Ficha Catalográfica

Carvalho, Victor Cabral da Hora Aragão de

Avaliação da implantação de fazenda de algas produtoras de biocombustível em uma usina de etanol / Victor Cabral da Hora Aragão de Carvalho ; orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes. – 2014.

96 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.\

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses.
2. Avaliação do ciclo de vida (ACV).
3. Balanço energético.
4. Biocombustível de algas.
5. Etanol de cana-de-açúcar. I. Gomes, Marcos Sebastião de Paula. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para todos os professores que sentem prazer em ensinar.

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos professores que fizeram parte de minha jornada acadêmica, em especial ao Professor Marcos Sebastião, que sempre depositou toda sua confiança em minha capacidade.

Ao meu companheiro de pesquisas, Marco Díaz, por seu bom humor e por sua parceria.

Às agências CAPES e FAPERJ, por subsidiarem o projeto de pesquisa que embasou este trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> Rafael Valdetaro, por compartilhar os frutos de seu trabalho na área de biocombustíveis de algas.

À Kenya, a forja de meu caráter, e ao Carlos Alberto, meu melhor amigo.

## Resumo

Carvalho, Victor Cabral da Hora Aragão de; Gomes, Marcos Sebastião de Paula. **Avaliação da implantação de fazenda de algas produtoras de biocombustível em uma usina de etanol.** Rio de Janeiro, 2014. 96p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com a crescente demanda – nacional e internacional – por biocombustíveis e a pressão internacional para redução da emissão de gases de efeito estufa, o Brasil teria muito a ganhar, do ponto de vista econômico e ambiental, com um aumento na eficiência e oferta de biocombustíveis. O advento da produção de biocombustíveis produzidos em fazendas de alga possibilita uma relação de simbiose com usinas de cana-de-açúcar. Tais algas se alimentam, entre outras substâncias, de dióxido de carbono, e a abundante biomassa de cana queimada em caldeiras, aliada à incidência solar privilegiada no Brasil, fazem da utilização de algas em usinas de cana uma possibilidade de conversão de emissões de gás de efeito estufa em biocombustível. Essa dissertação tem como objetivo estimar o resultado da implantação de uma fazenda de algas em uma usina de cana-de-açúcar. A usina em questão sofreu vistoria e fez-se o levantamento da produção de energia renovável e as emissões atmosféricas dos principais gases de efeito estufa ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ ), através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A meta, a partir desta análise e com o uso de dados primário de uma empresa que instala fazendas de alga, é estimar o acréscimo de biocombustível gerado por algas e o decréscimo das emissões de GEE no processo produtivo. Os resultados obtidos na Usina Estudada mostram que caso a mesma implantasse uma fazenda de algas em seu parque industrial, sua eficiência energética na produção de energia através do etanol quase triplicaria ao passo em que emitiria quatro vezes menos poluentes em sua cadeia de produção. Caso a usina optasse por gerar exclusivamente Biodiesel, produziria Biodiesel (B100) para 19 anos de subsistência com um combustível 78,4% menos poluente em termos de GEE. Aproximações mostram que caso a totalidade da lavoura de cana implante fazendas de algas no Brasil, apenas o Biodiesel gerado neste processo seria equivalente à quase 70% da produção Brasileira de diesel de 2012.

## Palavras-chave

Avaliação do ciclo de vida (ACV); Balanço energético; Biocombustível de Algas; Etanol de cana-de-açúcar.

## Abstract

Carvalho, Victor Cabral da Hora Aragão de; Gomes, Marcos Sebastião de Paula (Advisor). **Evaluation of the implementation of a biofuel producing algae farm in an ethanol plant.** Rio de Janeiro, 2014. 96p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the demand for Biofuels growing – in Brazil and abroad – and with worldwide efforts to reduce greenhouse gas (GHG) emissions, Brazil would have much to gain, from an environmental and economic point of view, from increasing the efficiency and offer of biofuels. The advent of biofuels produced in algae farms enabled a symbiotic relationship with ethanol plants. Such algae feeds off, among other things, Carbon Dioxide, and the abundant biomass burned in ethanol plants' boilers, along with Brazil's privileged solar incidence, and this regime permits such farms to convert GHG to biofuel. The objective of this study was to investigate an ethanol plant as a productive system to understand how the addition of an algae farm could change the status quo of energy efficiency and emission of pollutant gases. The system analyzed includes the sugarcane sowing, the plantation handling, the harvesting, the industrial activities, and the Ethanol distribution. The goal, from this analysis and using primary data from a company that installs algae farms, is to estimate the increase of biofuel generated by algae and decrease GHG emissions in the production process. The results obtained in Plant Studied show that an algae farm in its industrial grounds would better its energy efficiency in almost threefold, while generating four times less atmospheric pollution in their production chain. If the plant chose to produce exclusively Biodiesel, production of B100 Biodiesel would be enough for the industry's diesel needs for 19 years, with a 78.4% cleaner fuel in terms of GHG emissions. Approximations show that if all the sugar cane fields implant algae farms in Brazil, the Biodiesel generated in this process would be equivalent to almost 70% of the Brazilian production of diesel from 2012.

## Keywords

Life cycle assessment (LCA); Energy Balance; Algae Biofuel; Sugarcane Ethanol.

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Avaliação de Ciclo de Vida .....	16
2.2	Metodologia de Análise de Ciclo de Vida.....	17
2.3	Estudos Antecedentes de Análise de Ciclo de Vida do Etanol .....	22
2.4	Estudos Antecedentes Para a Destinação do Bagaço de Cana .....	23
2.5	Estudos Antecedentes da Caracterização e Destinação de Algas... ..	25
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	28
3.1	Panorama do Setor Sucroalcooleiro do Brasil .....	28
3.2	Ciclo da Cana de Açúcar .....	30
3.2.1	Preparo do Solo .....	31
3.2.2	Plantio da Cana.....	34
3.2.3	Manejo de Cultura .....	36
3.2.4	Colheita da Cana-de-açúcar .....	37
3.2.5	Processos Industriais na Produção de Etanol .....	39
3.3	Avaliação do Ciclo de Vida do Etanol da Cana-de-Açúcar .....	49
3.4	Inventário do Ciclo de Vida do Etanol da Cana-de-Açúcar.....	52
3.4.1	Energia Fóssil na Produção de Etanol.....	53
3.4.2	Quantificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa .....	58
3.5	Fazenda de Microalgas na Produção de Biocombustíveis .....	60
4	RESULTADOS .....	66
4.1	Resultados do Inventário de Ciclo de Vida da Usina visitada .....	66
4.2	Eficiência Energética da Usina visitada.....	72
4.3	Potencial de Geração de Biodiesel da Usina visitada.....	74
4.4	Análise dos Resultados.....	78
4.4.1	Consumo Fóssil da Usina.....	78
4.4.2	Eficiência Energética Estimada .....	80
4.4.3	Potencial Cenário de Biocombustíveis Brasileiros .....	80
5	CONCLUSÕES .....	82
5.1	Pegada Ecológica .....	82
5.2	Adoção Hipotética das Fazendas de Alga em Escala Nacional.....	83
5.3	Recomendações para futuros trabalhos .....	84
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases de Avaliação de Ciclo de Vida. Fonte: ABNT (2001) .....	18
Figura 2: Fluxograma de atores envolvidos nas unidades de processo de produção do Etanol. Fonte: (Diaz, 2010) .....	21
Figura 3: Terreno da Usina Visitada em fase de preparo do solo para cultivo de cana .....	32
Figura 4: Fileiras de colmos de cana dispersadas na Usina Visitada .....	35
Figura 5: Cana de açúcar após ação de uma frente de queimada .....	38
Figura 6: Guincho utilizado na colheita .....	39
Figura 7: Amostrador de cana da Usina Visitada .....	40
Figura 8: Pesquisador apontando no detalhe os orifícios de amostragem das caçambas de caminhões de carga .....	41
Figura 9: Laboratório da Usina Visitada .....	42
Figura 10: Garra de cana .....	43
Figura 11: Mesa na qual é iniciado o processo de tratamentos físicos automatizados da Usina Visitada .....	44
Figura 12: Desfibrador de cana da Usina Visitada .....	45
Figura 13: Filtro rotativo da Usina Visitada .....	46
Figura 14: Destilaria de etanol da Usina Visitada .....	47
Figura 15: Lagoa de vinhaça da Usina Visitada .....	48
Figura 16: Canais de distribuição de vinhaça .....	49
Figura 17: Fluxograma de etapas e entradas no processo produtivo de etanol .....	51
Figura 18: Processo produtivo SAT para algas naturais (Fonte: SAT, 2011) .....	63
Figura 19: Processo SAT para produção de bioetanol de cianobactérias geneticamente modificadas (Fonte: SAT, 2011) .....	65
Figura 20: Toletes de cana usados no plantio da Usina Visitada .....	67
Figura 21: Solo em primeiro plano com coloração evidenciando a aplicação de cinzas e torta de filtro nas terras da Usina Visitada .....	68
Figura 22: Poço de verificação de nível do sistema de bombeamento de vinhaça .....	69
Figura 23: Gerador termoelétrico alimentado pela queima de bagaço .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Calor específico de diversas biomassas e combustíveis .....	25
Tabela 2: Comparativo de área, produtividade e produção da Indústria Sucoalcooleira do Brasil: Safras 2011/2012 e 2012/2013 .....	29
Tabela 3: Composição da tabela de análise de consumo energético e emissões de GEE de (Diaz, 2013) .....	53
Tabela 4: Densidade média nacional de utilização de diferentes equipamentos .....	54
Tabela 5: Consumo de Óleo Diesel em diferentes etapas produtivas de etanol (média nacional) .....	55
Tabela 6: Dados do maquinário usado em operações agrícolas na Usina Visitada .....	55
Tabela 7: Consumo de energia fóssil da Usina Visitada (segmentado) .....	56
Tabela 8: Maquinário e implementos usados na colheita de cana da Usina Visitada .....	57
Tabela 9: Energia consumida durante a colheita na Usina Visitada .....	57
Tabela 10: Produção e rendimento de cana da safra de 2012 da Usina Visitada .....	70
Tabela 11: Energia total consumida na safra 2012 da Usina Visitada .....	70
Tabela 12: Total de GEE emitidos na safra 2012 da Usina Visitada .....	71
Tabela 13: Produção de etanol e outros derivados da cana na safra 2012 da Usina Visitada .....	71
Tabela 14: Eficiências energéticas de diferentes biocombustíveis .....	72
Tabela 15: Valores de eficiência energética do etanol encontrados na bibliografia .....	73

## Lista de siglas e abreviaturas

ABNT –	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV –	Análise de Ciclo de Vida
ATR –	Açúcar Total Recuperável
cm –	Centímetro
CO <sub>2</sub> –	Dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> eq –	Dióxido de carbono equivalente
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> –	Sacarose
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH –	Etanol
CH <sub>4</sub> –	Metano
GEE –	Gases de Efeito Estufa
GJ –	Giga Joule
h –	hora
ha –	hectare
ICV –	Inventário de Ciclo de Vida
ISO –	International Organization for Standardization
J –	Joule
Kg –	Quilograma
KJ –	Quilojoule
m <sup>3</sup> –	Metro cúbico
MJ –	Megajoule
ml –	Mililitro
mM –	Milimolar
MWh –	Megawatthora
N <sub>2</sub> –	Gas nitrogenio
N <sub>2</sub> O –	Óxido Nitroso
NO <sub>x</sub> –	Óxidos Mononitrogenados
SAT –	See Algae Technology

SO <sub>x</sub> –	Óxidos Monosulfurados
t –	Tonelada
TW –	Terawatt

## Lista de equações

Equação 1: Fermentação da sacarose .....	46
Equação 2: Cálculo da Média de Consumo de Combustível na Produção de Etanol .....	54
Equação 3: Cálculo de Eficiência Energética do Etanol .....	73