

KATTIA DE LOS ÁNGELES SOLÍS RAMÍREZ

**PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE ETANOL DE CANA
DE AÇÚCAR COM VISTA A APLICAÇÕES EM COMUNIDADES
ISOLADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S687p
2012

Solís Ramírez, Kattia de los Ángeles, 1978-
Produção de energia elétrica a partir de etanol de cana de
açúcar com vista a aplicações em comunidades isoladas /
Kattia de los Ángeles Solís Ramírez. – Viçosa, MG, 2012.
xvi, 85f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Juarez de Sousa e Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Álcool como combustível. 2. Energia elétrica -
Produção. 3. Cachaça. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

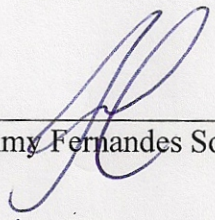
CDD 22. ed. 662.6692

KATTIA DE LOS ÁNGELES SOLÍS RAMÍREZ

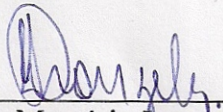
**PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE ETANOL DE CANA
DE AÇÚCAR COM VISTA A APLICAÇÕES EM COMUNIDADES
ISOLADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

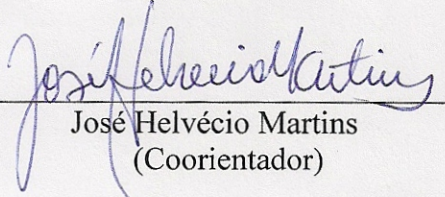
APROVADA: 18 de dezembro de 2012.



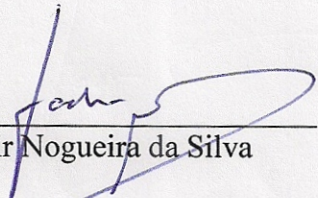
Sammy Fernandes Soares



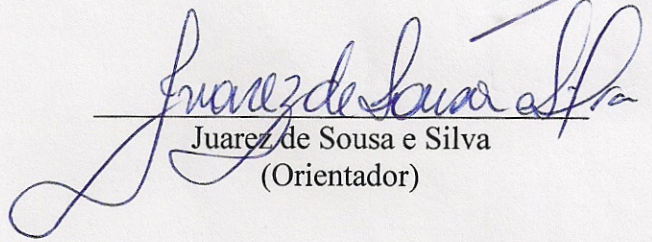
Sergio Mauricio Lopes Donzeles



José Helvécio Martins
(Coorientador)



Jadir Nogueira da Silva



Juarez de Sousa e Silva
(Orientador)

“A educação é a arma mais poderosa que
você pode usar para mudar o mundo”
(Nelson Mandela).

Às minhas filhas Ariadna e Luana, o meu maior tesouro da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir-me chegar até aqui.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À FAPEMIG - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio financeiro recebido para a realização desta pesquisa.

Ao programa PEC-PG - Programa de Estudante-Convênio de Pós-Graduação, pela concessão da bolsa de doutorado.

À UCR - Universidad de Costa Rica, pelo apoio financeiro.

Ao MICIT – Ministério da Ciência e Tecnologia e ao CONICIT – Conselho Nacional para Pesquisas Científicas e Tecnológicas, da Costa Rica, pelo apoio financeiro.

Ao professor Juarez de Sousa e Silva, pela orientação.

Ao professor Roberto Precci Lopes, pela contribuição neste trabalho.

Ao professor José Helvecio Martins, pelas sugestões neste trabalho.

Aos meus pais Homer (*in memoriam*) e Rafaela, pelo incentivo constante, mesmo estando distantes.

Ao meu esposo Pedro, pelo seu apoio incondicional em todo momento.

À minha família, especialmente aos meus irmãos Guiselle, Minor, Seidy, Karla e Gabriela e meu sobrinho Jeremy, pela sua colaboração à distância durante todo este processo.

Aos meus sogros Casimira e Lorenzo, pelas suas palavras de apoio.

À minha amiga Yorleny, pela amizade no decorrer do caminho.

Ao Gianey e ao Hamilton, pelo apoio na pesquisa.

A todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma na realização desta tese.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
RESUMEN.....	xv
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	3
CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DE UMA COLUNA DE RECHEIO EM DESTILAÇÃO DESCONTÍNUA DE ÁLCOOL.....	4
1 INTRODUÇÃO.....	4
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
4 CONCLUSÕES.....	28
REFERÊNCIAS.....	28
CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO TECNICA DE DOIS GRUPOS GERADORES A ÁLCOOL.....	30
1 INTRODUÇÃO.....	30
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3 RESULTADOS E DISCUSÃO.....	37
4 CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	44
CAPÍTULO 3 - VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL COMBUSTÍVEL EM MICRODESTILARIAS.....	45
1 INTRODUÇÃO.....	45
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4 CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS.....	63
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA UTILIZANDO ÁLCOOL COMBUSTÍVEL.....	66
1 INTRODUÇÃO.....	66

2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	70
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4 CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	81
CONCLUSÕES GERAIS.....	84

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DE UMA COLUNA DE RECHEIO EM DESTILAÇÃO DESCONTÍNUA DE ÁLCOOL

Figura 1 - Tipos de recheios randômicos.....	5
Figura 2 - Coluna de destilação.....	9
Figura 3 - Esquema do processo de destilação simples.....	10
Figura 4 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 15%.....	16
Figura 5 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 30%.....	16
Figura 6 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 45%.....	17
Figura 7 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 60%.....	17
Figura 8 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 75%.....	18
Figura 9 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 15% em função do tempo.....	19
Figura 10 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 30% em função do tempo.....	20
Figura 11 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 45% em função do tempo.....	20
Figura 12 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 60% em função do tempo.....	21
Figura 13 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 75% em função do tempo.....	21
Figura 14 - Comportamento do teor alcoólico (TA) na saída 3 e na panela e do volume (Vol.) na panela para um teor alcoólico inicial de 45%.....	22
Figura 15 - Comparação entre a vazão teórica e experimental do álcool para as diferentes saídas do destilado na coluna de destilação estimada com o modelo geral (Equação 12).....	23
Figura 16 - Relação entre a vazão teórica e experimental para as diferentes saídas do destilado na coluna utilizando os modelos para cada uma das alturas.....	24
Figura 17 - Consumo específico de energia teórico e experimental em função do teor alcoólico para a obtenção do etanol combustível.....	25
Figura 18 - Esquema para montagem de uma minidestilaria com sistema de pré-aquecimento para uso eficiente da energia.....	25
Figura 19 - Diagrama de fases do etanol.....	27

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DE DOIS GRUPOS GERADORES A ÁLCOOL

Figura 1. Grupo gerador 1.....	33
Figura 2. Grupo Gerador 2.....	33
Figura 3. Medidor do nível de combustível do GG 1.....	34
Figura 4. Medidor do nível de combustível do GG 2.....	34
Figura 5. Conjunto para dissipação da energia elétrica do GG 1.....	36
Figura 6. Conjunto para dissipação da energia elétrica do GG 2.....	36
Figura 7. Medidor universal de grandezas (MUG).....	37
Figura 8. Potência elétrica gerada em função da carga no grupo gerador 1 utilizando álcool combustível do posto e álcool combustível da fazenda.....	38
Figura 9. Potência elétrica gerada em função da carga no grupo gerador 2 utilizando álcool combustível do posto e álcool combustível da fazenda.....	39
Figura 10. Consumo específico de combustível para o grupo gerador 1 (GG 1) e o grupo gerador 2 (GG 2) utilizando álcool do posto (EP) e álcool da fazenda (EF).....	42
Figura 11. Eficiência do grupo gerador 1 e do grupo gerador 2 (GG 1 e GG 2) utilizando álcool do posto (EP) e álcool da fazenda (EF).....	43

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA UTILIZANDO ÁLCOOL COMBUSTÍVEL

Figura 1 - Grupos geradores. (a) Grupo gerador a álcool de 10 kVA. (b) Grupo gerador a álcool de 42 kVA.....	71
Figura 2 - Composição dos custos de geração de eletricidade com Grupos Geradores para diferentes tempos de amortização.....	75
Figura 3 - Variação do Custo Anual Equivalente da geração de energia elétrica com a taxa de desconto.....	76
Figura 4 - Variação do Custo Anual Equivalente da geração de energia elétrica com a inversão inicial.....	77
Figura 5 - Variação do Custo Anual Equivalente da geração de energia elétrica com o preço do álcool combustível.....	78

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DE UMA COLUNA DE RECHEIO EM DESTILAÇÃO DESCONTÍNUA DE ÁLCOOL

Tabela 1 - Valores de AEPT para anéis <i>Pall</i>	6
Tabela 2 - Resultados para a primeira hora de destilação.....	14
Tabela 3 - Resultados calculados a partir dos 60 min de destilação.....	15
Tabela 4 - Resultado da análise do álcool combustível de acordo com as Normas da ANP.....	18
Tabela 5 - Propriedades físicas dos componentes puros.....	26
Tabela 6 - Valores da fração molar de álcool nas misturas utilizadas como matéria-prima.....	26
Tabela 7 - Altura do recheio recomendada para a coluna de destilação para um teor alcoólico final de 93%.....	27

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DE DOIS GRUPOS GERADORES A ÁLCOOL

Tabela 1- Tensões obtidas com o grupo gerador 1.....	40
Tabela 2 - Tensões obtidas com o grupo gerador 2.....	40

CAPÍTULO 3 - VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL COMBUSTÍVEL EM MICRODESTILARIAS

Tabela 1 - Informações gerais utilizadas para análise da viabilidade econômica....	50
Tabela 2 - Investimentos e custos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana.....	51
Tabela 3 - Investimentos e custos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça.....	52
Tabela 4 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 8 h dia ⁻¹	55
Tabela 5 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 8 h dia ⁻¹	55
Tabela 6 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 8 h dia ⁻¹	56
Tabela 7 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 8 h dia ⁻¹	56
Tabela 8 - Indicadores de participação de cada atividade no custo final de produção do álcool combustível para as duas opções analisadas.....	56

Tabela 9 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 16 h dia ⁻¹	57
Tabela 10 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 16 h dia ⁻¹	58
Tabela 11 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 16 h dia ⁻¹	58
Tabela 12 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 16 h · dia ⁻¹	59
Tabela 13 - Indicadores de participação de cada atividade no custo final de produção do álcool combustível para as duas opções analisadas.....	59
Tabela 14 - Análise de sensibilidade do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana – opção 1.....	60
Tabela 15 - Análise de sensibilidade do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça – opção 2.....	61
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA UTILIZANDO ÁLCOOL COMBUSTÍVEL	
Tabela 1 - Residências sem energia elétrica nas diferentes regiões do Brasil.....	66
Tabela 2 - Parâmetros utilizados na análise econômica.....	72
Tabela 3 - Resultados econômicos obtidos para os casos propostos.....	75
Tabela 4 - Efeito da taxa de desconto sobre o CEE.....	78
Tabela 5 - Efeito da inversão sobre o CEE.....	79
Tabela 6 - Efeito do preço do álcool combustível sobre o CEE.....	79
Tabela 7 - Tarifas médias de energia elétrica por classe de consumo por região (R\$/MWh), em novembro de 2011.....	80

RESUMO

SOLÍS RAMÍREZ, Kattia de los Ángeles, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2012. **Produção de energia elétrica a partir de etanol de cana de açúcar com vista a aplicações em comunidades isoladas.** Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Coorientadores: Roberto Precci Lopes e José Helvecio Martins.

A destilação consiste em separar os componentes de uma mistura líquida por evaporação e condensação subsequente. A separação baseia-se na diferença absoluta das volatilidades dos componentes. As microdestilarias são equipamentos com capacidade de produzir até 5.000 L de álcool por dia. Neste trabalho, objetivou-se avaliar tecnicamente uma coluna de destilação de recheio em sistema descontínuo, utilizando como mistura os resíduos de cachaça e avaliar o desempenho de dois grupos geradores, utilizando como combustível álcool do posto de abastecimento e álcool proveniente de uma microdestilaria. Também avaliar economicamente a produção de álcool combustível em microdestilarias, utilizando como matéria prima o caldo de cana e os resíduos da cachaça e estudar a utilização de etanol de cana de açúcar na produção de energia elétrica. A avaliação técnica da coluna foi realizada de forma experimental com a destilação de resíduos de cachaça (cabeça e cauda) com teores alcoólicos de 15, 30, 45, 60 e 75%. Além disso, foi monitorada a temperatura ao longo da coluna e analisado o consumo específico de energia. A coluna também foi analisada sob o aspecto teórico com o cálculo da AEPT (altura equivalente a um prato teórico), aplicando a metodologia de McCabe-Thiele para determinação do número de estágios de separação. O álcool obtido foi enviado para análise no LEC/UFMG (Laboratório de Ensaios de Combustíveis/Universidade Federal de Minas Gerais) e analisado segundo as normas da ANP (Agência Nacional de Petróleo). O álcool obtido foi utilizado para a avaliação de dois grupos geradores a álcool combustível de 10 e 42 kVA. Além disso, também foram avaliados com álcool combustível de posto de abastecimento. Para isso foram utilizadas diferentes cargas no gerador e avaliou-se o consumo de combustível, a potência gerada e a eficiência. Depois foi realizada uma análise econômica da produção de álcool em microdestilarias e obteve-se o CEE (custo equivalente de eletricidade). Como resultado da destilação não foi possível obter álcool combustível apto para a comercialização de acordo com a norma da ANP, com a coluna e teores alcoólicos utilizados, porém, é possível garantir o teor alcoólico recomendado pela norma da ANP se for utilizado teor inicial superior a 85%. Isso pode ser devido a que o controle manual de resfriamento da coluna de destilação não garantiu um funcionamento eficiente, mas a coluna pode ser

usada para produzir álcool em sistema cooperativo. Encontrou-se o modelo geral que descreve o comportamento da vazão de saída da coluna em função do teor alcoólico inicial de pré-destilado na panela, teor alcoólico destilado na saída, a altura da coluna e a temperatura na saída. Determinou-se o consumo específico de energia mínimo necessário para evaporar o álcool presente na mistura de pré-destilados. A quantidade mínima de energia a fornecer ao sistema para evaporar o etanol presente na panela foi de 2.126,20 kJ L⁻¹ para a mistura com 15% de teor alcoólico e de 1.027,30 kJ L⁻¹ para a mistura de 75% de teor alcoólico. Determinou-se a altura ótima usando um recheio randômico comercial para diferentes teores alcoólicos iniciais para obter álcool combustível. A mínima altura obtida foi de 2 m para anéis de Pall de 25 mm, para um teor alcoólico inicial de 80% e a máxima altura obtida foi de 6 m para anéis de Pall de 50 mm, para um teor alcoólico inicial de 8%. Para o grupo gerador 1 o consumo específico de combustível foi de 0,93 L kWh⁻¹ e 0,90 L kWh⁻¹ e para o grupo gerador 2 foi de 0,62 L kWh⁻¹ e 0,71 L kWh⁻¹, para álcool de posto e de fazenda, respectivamente. Considerando-se o preço de venda de álcool igual a R\$ 1,50 por litro, como matéria prima o caldo de cana e um funcionamento de microdestilaria de 8 h dia⁻¹, o VPL (Valor Presente Líquido) do investimento foi de R\$ 214.569,53, a TIR (Taxa Interna de Retorno) de 52,82% e o TRCD (Tempo de retorno de capital descontado) de 2,25 anos. Utilizando como matéria prima os resíduos de cachaça, o VPL do investimento foi de R\$ 397.407,17, a TIR de 144,87%, o TRCD de 0,77 ano. Em outro cenário, foi analisada a microdestilaria com um funcionamento diário de 16 h por dia. Para o caldo de cana, obteve-se um VPL de R\$ 540.916,99, uma TIR de 108,11% e um TRCD de 1,04 anos. Para os resíduos de cachaça obteve-se um VPL de R\$ 853.238,91, uma TIR de 290,77% e um TRI de 0,39 ano. Confirmou-se em todos os casos a rentabilidade do sistema. O CEE para os dois grupos geradores, utilizando R\$ 0,70 por litro como o preço do álcool combustível, foi de R\$ 1,00 por kWh e R\$ 0,95 por kWh para o grupo gerador 1 e para o grupo gerador 2 foi de R\$ 0,68 por kWh e R\$ 0,67 por kWh, para tempos de amortização de 5 e 10 anos, respectivamente.

ABSTRACT

SOLÍS RAMÍREZ, Kattia de los Ángeles, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, december 2012. **Power production from sugarcane ethanol for applications in isolated communities.** Advisor: Juarez de Sousa e Silva. Co-advisors: Roberto Precci Lopes and José Helvecio Martins.

Distillation is to separate the components of a liquid mixture by evaporation and subsequent condensation. The separation is based on the absolute difference in volatilities of the components. The microdistilleries equipment are capable of producing up to 5,000 L of alcohol per day. This study aimed to evaluate technically a distillation column filling in a batch system, using waste of sugarcane aguardiente as a mixture and evaluate the performance of two electricity generator sets, using alcohol as a fuel from fuel station and an alcohol distillery. Also economically evaluate the production of fuel ethanol in microdistilleries, using as raw fermented sugarcane juice and the waste of sugarcane aguardiente and study the use of ethanol from sugarcane in the production of electricity. The technical evaluation of the column was performed with the experimental distillation of waste from sugarcane aguardiente (head and tail) with alcohol levels of 15, 30, 45, 60 and 75%. In addition, the temperature was monitored throughout the column and analyzed the specific energy consumption. The column was also analyzed from the theoretical aspect with the calculation of HETP (height equivalent to a theoretical plate), applying the McCabe-Thiele methodology for determining the number of separation stages. Alcohol was sent for analysis at the LEC / UFMG (Testing Laboratory Fuels / Universidade Federal de Minas Gerais) and analyzed according to the standards of the ANP (National Petroleum Agency). The alcohol obtained was used for the evaluation of two electricity generators by ethanol fuel of 10 and 42 kVA. Moreover, were also evaluated with alcohol from fuel station. Different loads were used in the electricity generators and evaluated fuel consumption, the power generated and efficiency. After an economic analysis was performed of alcohol production in microdistilleries and gave the LCE (levelized cost of electricity). As a result of distillation was not possible to obtain alcohol fuel suitable for marketing in accordance with the standard of the ANP, with the column and used alcohol levels, however, can ensure the alcohol content standard recommended by the ANP is used for initial content exceeding 85%. This may be due to the manual control cooling of the distillation column did not guarantee an efficient operation, but the column can be used to produce alcohol in cooperative system. It was found the general model that describes the

behavior of the output flow of the column due to the alcohol content of the initial pre-distilled in a still pot, alcoholic distillate output, column height and temperature at the exit. It was determined the minimum specific energy consumption required to evaporate the alcohol present in the mixture of pre-distilled. The minimum amount of energy to be supplied to the system to evaporate the ethanol present in the still pot was $2126.20 \text{ kJ L}^{-1}$ to the mixture with 15% alcohol and $1027.30 \text{ kJ L}^{-1}$ to the mixture of 75% alcohol content. It was determined the optimum height using a stuffing random commercial for different alcohol levels for to obtain ethanol fuel. The minimum height of 2 m was obtained for Pall rings of 25 mm, for an initial alcohol content of 80% was obtained and the maximum height of 6 m to Pall rings of 50 mm to an initial alcohol content of 8%. For the generator 1 the specific fuel consumption was 0.93 L kWh^{-1} L and 0.90 L kWh^{-1} and for the generator 2 was 0.62 L kWh^{-1} and 0.71 L kWh^{-1} , for alcohol from fuel station and farm respectively. Considering the sale price of alcohol equal to R\$ 1.50 per liter, as raw material sugarcane juice and a distillery operation of 8 h day^{-1} , the NPV (Net Present Value) of the investment was R\$ 214,569.53, the IRR (Internal Rate of Return) of 52.82% and payback of 2.25 years. Using waste from sugarcane aguardiente as raw material, the NPV of the investment was R\$ 397,407.17, the IRR of 144.87 and the payback of 0.77 years. In another scenario, it was analyzed the distillery operation with a 16 h per day. It was obtained for the fermented sugarcane juice a NPV of R\$ 540,916.99, an IRR of 108.11% and a payback of 1.04 years. To waste from sugarcane aguardiente obtained a NPV of R\$ 853,238.91, an IRR of 290.77% and a payback of 0.39 years. It was confirmed in all cases the profitability of the system. The EEC for the two generator sets, using R\$ 0.70 as the price per liter of fuel alcohol, was R\$ 1.00 per kWh for the generator 1 and R\$ 0.95 per kWh, and for the generator 2 was R\$ 0.68 per kWh and R\$ 0.67 per kWh, for times of amortization of 5 and 10 years, respectively.

RESUMEN

SOLÍS RAMÍREZ, Kattia de los Ángeles, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, diciembre de 2012. **Producción de energía eléctrica a partir de etanol de caña de azúcar con el propósito de aplicaciones en comunidades aisladas.** Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Coorientadores: Roberto Precci Lopes y José Helvecio Martins.

La destilación consiste en separar los componentes de una mezcla líquida por evaporación y su condensación posterior. La separación se basa en la diferencia absoluta de las volatilidades de los componentes. Las microdestilerías son equipos capaces de producir hasta 5000 litros de alcohol por día. Este estudio tuvo como objetivo evaluar técnicamente una columna de destilación de relleno en un sistema discontinuo, utilizando como mezcla los residuos de aguardiente y evaluar el desempeño de dos grupos electrógenos, utilizando como combustible alcohol del puesto de abastecimiento y alcohol proveniente de una microdestilería. También evaluar económicamente la producción de etanol combustible en microdestilerías, utilizando como materia prima el jugo de caña de azúcar y los residuos de la producción de aguardiente y estudiar la utilización del etanol en la producción de energía eléctrica. La evaluación técnica de la columna se realizó de forma experimental con la destilación de residuos de aguardiente (cabeza y cola) con grados de alcohol de 15, 30, 45, 60 y 75%. Además, la temperatura fue monitoreada en toda la columna y se analizó el consumo específico de energía. La columna se analizó teóricamente determinando la AEPT (altura equivalente a un plato teórico), aplicando la metodología de McCabe-Thiele para la determinación del número de etapas de separación. El alcohol obtenido en la destilación fue enviado al LEC / UFMG (Laboratorio de Ensayos de Combustibles / Universidad Federal de Minas Gerais) y analizado de acuerdo con las normas de la ANP (Agencia Nacional del Petróleo). El alcohol obtenido se utilizó para la evaluación de los dos grupos electrógenos de 10 y 42 kVA. Además, también se evaluaron con alcohol del puesto de combustible. Para esto se utilizaron diferentes cargas en el grupo electrógeno y se evaluó el consumo de combustible, la potencia generada y la eficiencia. Fue realizado un análisis económico de la producción de alcohol en microdestilarias y se determinó el CEE (costo equivalente de electricidad). Como resultado de la destilación no fue posible obtener alcohol combustible adecuado para la comercialización de conformidad con el estándar de la ANP, con la columna y grados alcohólicos utilizados. Esto puede ser debido a que el control manual del sistema de enfriamiento de la columna de destilación, no garantizó un funcionamiento eficiente. Se determinó el

modelo general que describe el comportamiento del flujo de salida de la columna en función del grado alcohólico inicial de la mezcla, grado alcohólico del destilado, altura de la columna y la temperatura de salida de la columna. Se determinó el consumo mínimo de energía específica requerida para evaporar el alcohol presente en la mezcla. La cantidad mínima de energía que debe suministrarse al sistema para evaporar el etanol presente fue de 2126,20 kJ L⁻¹ para la mezcla con 15% de grado alcohólico y 1027,30 kJ L⁻¹ para la mezcla con 75% de grado alcohólico. Se determinó la altura óptima utilizando un relleno comercial para diferentes grados alcohólicos iniciales para obtener alcohol combustible. La altura mínima obtenida fue de 2 m para anillos *Pall* de 25 mm para un grado alcohólico inicial de 80% y la máxima altura obtenida fue de 6 m para anillo *Pall* de 50 mm para un grado alcohólico inicial de 8%. Para el grupo electrógeno 1 el consumo específico de combustible fue de 0,93 y 0,90 L kWh⁻¹ y para el grupo electrógeno 2 fue de 0,62 y 0,71 L kWh⁻¹ para el alcohol del puesto de combustible y de la microdestilería, respectivamente. Considerando el precio de venta de alcohol a R\$ 1,50 por litro, como materia prima el jugo de caña de azúcar y un funcionamiento de la microdestilería de 8 h día⁻¹, el VAN (Valor Actual Neto) de la inversión fue de R \$ 214569,53, la TIR (Tasa Interna de Retorno) de 52,82% y payback descontado de 2,25 años. Utilizando los residuos de aguardiente como materia prima, el VAN fue de R\$ 397407,17, la TIR de 144,87% y el payback descontado de 0,77 años. En otro escenario, se analizó una microdestilería con un funcionamiento diario de 16 h día⁻¹. Para el jugo de caña, se obtuvo un VAN de R\$ 540916,99, una TIR de 108,11% y un payback descontado de 1,04 años. Para los residuos de aguardiente se obtuvo un VAN R\$ 853238,91, una TIR de 290,77% y payback descontado de 0,39 años. Se confirmó en todos los casos la rentabilidad del sistema. El CEE para los dos grupos electrógenos, utilizando como precio del alcohol combustible R\$ 0,70 por litro, fue de R\$ 1,00 por kWh y R\$ 0,95 por kWh para el grupo electrógeno 1 y para el grupo electrógeno 2 fue de R\$ 0,68 por kWh y R\$ 0,67 por kWh, para los tiempos de amortización de 5 y 10 años, respectivamente.

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é um país com tradição no uso de fontes renováveis de energia. Segundo a EPE (2012), 44,1% da energia utilizada no país provêm de fontes renováveis. No ano de 1975 criou-se o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), o qual tinha como objetivo a substituição em larga escala dos combustíveis veiculares derivados do petróleo por álcool, devido à crise do petróleo em 1973 e mais agravante depois da crise de 1979.

A destilação é uma operação unitária que consiste em separar os componentes de uma mistura líquida (na que todos os compostos são mais ou menos voláteis) por evaporação e condensação subsequente. A separação baseia-se na diferença absoluta das volatilidades dos componentes, resultando na formação de um vapor de composição diferente em relação ao líquido que procede (MARCILLA, 1998).

A destilação pode ser realizada de forma contínua ou descontínua. No primeiro caso, a alimentação da mistura na panela e a remoção do destilado são feitas de maneira contínua. No segundo caso, uma carga líquida da mistura a ser separada é adicionada à coluna e a seguir é continuamente vaporizada. O vapor produzido é removido da coluna, condensado e armazenado em reservatórios. Ao longo da batelada a mistura original vai sendo consumida e as composições ao longo da coluna vão mudando continuamente. A preferência por processos descontínuos está baseada em aspectos econômicos, uma vez que é necessário menos capital para o investimento inicial, e também na maior flexibilidade alcançada na operação deste processo (JUNGES, 2010).

O álcool etílico, ou etanol, é uma substância com fórmula molecular C_2H_6O , que pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha (ciclo Otto) de duas maneiras, basicamente: 1) em misturas de gasolina e etanol anidro; ou 2) como etanol puro, geralmente hidratado. Silva (2011) cita o uso de etanol para a cocção de alimentos. Nesse sentido, desenvolveu-se na Universidade Federal de Viçosa um fogão doméstico (modelo UFV) do tipo não pressurizado, o qual pode ser construído para funcionar com qualquer número de bocas e não necessita de carga frequente.

Algumas das vantagens do uso do álcool combustível são: menor dependência de combustíveis fósseis, menor emissão de poluentes e os subprodutos da cana são utilizados no próprio ciclo produtor de álcool.

Em muitas localidades, a ausência de energia elétrica é o principal entrave ao desenvolvimento microrregional, fazendo com que milhões de brasileiros vivam com

altos níveis de pobreza. O programa do governo federal Luz para Todos trouxe importantes contribuições para a melhoria da qualidade de vida de muitos brasileiros. Porém, este programa não contempla o fornecimento de energia com potência elétrica suficiente para permitir que o desenvolvimento regional possa ser contabilizado monetariamente pelos economistas. O programa Luz para Todos visa à universalização do uso da energia elétrica a todas as moradias rurais do Brasil, com pontos de luz e tomadas. A localização remota e isolada das comunidades atendidas por este programa, a baixa densidade demográfica e o baixo poder aquisitivo destas oneram os custos das redes de energia elétrica e desestimulam investimentos em eletrificação rural pelo setor elétrico. Apesar do mérito deste programa, é preciso dar ao homem do campo condições para trabalhar a terra e promover o desenvolvimento sustentável local com geração de emprego e renda.

Os sistemas energéticos convencionais, caracterizados pela centralização da produção e da distribuição, nem sempre se apresentam como a melhor opção para atender a área rural. Basicamente, isto se deve ao alto nível de dispersão dessas áreas e à baixa demanda por energia, tendo em vista que as atividades econômicas dessas populações, em geral, são muito reduzidas, assim como o consumo de energéticos. Outros fatores, como a dificuldade de acesso às propriedades, o tamanho das propriedades e a baixa renda familiar também contribuem para a inviabilidade técnico-econômica da extensão da rede de energia elétrica para certas áreas.

Neste contexto, objetivou-se:

- Avaliar tecnicamente a coluna de destilação utilizada, usando como matéria-prima os resíduos provenientes da produção de cachaça.
- Avaliar o desempenho de dois grupos geradores, utilizando, como combustível, álcool do posto de combustível e álcool da fazenda proveniente de uma microdestilaria.
- Realizar a análise econômica da produção de álcool combustível em microdestilarias, utilizando como matérias-primas o caldo de cana e os resíduos provenientes da produção de cachaça.
- Avaliar economicamente a produção de álcool combustível em microdestilarias, utilizando como matéria prima o caldo de cana e os resíduos provenientes da produção de cachaça.
- Realizar uma análise econômica dos custos de produção de energia elétrica utilizando-se dois grupos geradores de energia elétrica a etanol, sendo um monofásico e outro trifásico.

REFERÊNCIAS

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2012 ano base 2011**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 282 f. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 29 out. 2012.

JUNGES, J. J. **Avaliação de políticas de operação de colunas de destilação em batelada**. 2010. 37 f. Trabalho de diplomação (Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MARCILLA, G. A. **Introducción a las operaciones de separación**: cálculo por etapas de equilibrio. Publicaciones Universidad de Alicante, 1998. 341 p.

SILVA, J. S. **Produção de álcool na fazenda**: equipamentos, sistemas de produção e usos. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2011. 390 f.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO TÉCNICA DE UMA COLUNA DE RECHEIO EM DESTILAÇÃO DESCONTÍNUA DE ÁLCOOL

1 INTRODUÇÃO

A destilação é uma operação unitária que consiste em separar os componentes de uma mistura líquida (na que todos os compostos são mais ou menos voláteis) por evaporação e condensação subsequente. A separação baseia-se na diferença absoluta das volatilidades dos componentes, resultando na formação de um vapor de composição diferente em relação ao líquido que procede (MARCILLA, 1998).

Hoje em dia, a destilação é uma operação muito utilizada nas indústrias de petróleo, de bebidas, químicas, petroquímicas e farmacêuticas. É importante não só para o desenvolvimento de novos produtos, mas também para a recuperação e reutilização de líquidos voláteis. Os fabricantes de produtos farmacêuticos, por exemplo, utilizam grandes quantidades de solventes, a maioria deles pode ser recuperado por destilação, com poupanças substanciais em custo e redução da poluição (APV, 2008).

Destilação Descontínua ou Destilação Simples

A destilação simples ou descontínua é realizada em bateladas. A carga de líquido é introduzida em um vaso provido de aquecimento, entrando em ebulição. Os vapores são retirados pelo topo através do condensador, onde são liquefeitos e coletados em outros recipientes. A primeira porção do destilado será a mais rica em componentes mais voláteis. À medida que prossegue a vaporização, o produto vaporizado torna-se mais volátil e o líquido residual torna-se menos volátil, pois o percentual de componentes leves no líquido residual vai sendo esgotado (ROITMAN, 2002).

Colunas de Recheio

Neste tipo de coluna, os pratos ou bandejas são substituídos por corpos sólidos com formatos definidos. Estes corpos, denominados recheios, podem ser: a) Randômicos: constituídos de peças de no máximo 90 mm, que são colocados ao acaso no leito para permitir uma distribuição desarrumada de seus elementos; e b) Recheios Estruturados: são todos que podem ser colocados na torre de uma forma ordenada.

A finalidade do recheio é provocar o contato das fases líquido-vapor. Os corpos do recheio devem ser de alta resistência à corrosão, motivo pelo qual são, geralmente, de cerâmica ou de aço inoxidável. Dependendo da temperatura do processo podem-se utilizar também recheios de plástico de alta resistência.

Os recheios são disponibilizados em seções, sobre suportes de sustentação, o que impede uma compactação e/ou descompactação localizada, que formaria caminhos preferenciais ao longo da coluna.

O tamanho dos elementos dos recheios, geralmente, variam entre 0,5 e 8 cm.

Segundo Roitman (2002), as torres que utilizam recheios são muito competitivas com as que contêm pratos com borbulhadores ou perfurados, apresentando algumas vantagens, tais como:

1. Geralmente são projetos mais econômicos, por serem mais simplificados;
2. Apresentam pequena perda de carga; e
3. Não estão sujeitas às formações de espuma.

Alguns destes recheios podem ser observados na Figura 1.

Segundo Kister (1992), geralmente a eficiência do recheio aumenta quando:

- A área superficial do recheio por unidade de volume também aumenta e quando a superfície do recheio diminui (recheios randômicos) ou a largura dos canais diminui (recheio estruturado); e
- A superfície do recheio está mais bem distribuída ao redor do elemento recheado.



Figura 1. Tipos de recheios randômicos.

Fonte: Bennett, 2000.

Desempenho da coluna

O desempenho de uma coluna de recheio é frequentemente expressado em termos de a altura equivalente de um prato teórico (AEPT) que correlaciona os estágios de separação em uma coluna de recheio com um prato teórico. Para a determinação deste parâmetro, faz-se necessária a determinação do número de estágios teóricos para a separação da mistura.

Segundo Sinnott (2005), uma vantagem dos recheios estruturados sobre os recheios randômicos é uma AEPT menor (tipicamente menor de 0,5 m).

Tabela 1. Valores de AEPT para anéis *Pall*

Tamanho (mm)	AEPT (m)
25	0,40 - 0,50
38	0,60 - 0,75
50	0,75 - 1,00

Fonte: Sinnott, 2005.

O etanol ou álcool etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), sob pressão e temperatura normais, apresenta-se líquido, incolor, com odor característico e é miscível em água. Este composto pode ser obtido por síntese química, porém, o processo mais comum é o da fermentação. Nesse processo, utiliza-se como matéria-prima substâncias açucaradas, amiláceas e celulósicas (NOGUEIRA, 2008).

A qualidade dos combustíveis é definida por um conjunto de características físicas e químicas previstas nas Normas Brasileiras (NBR) e nos Métodos Brasileiros (MB); da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e de normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). As especificações são estabelecidas pela ANP (Agência Nacional de Petróleo), que determina valores limites para essas características, de modo a assegurar o desempenho adequado dos combustíveis.

Cachaça é a denominação típica e exclusiva da aguardente de cana produzida no Brasil, com graduação alcoólica de trinta e oito a quarenta e oito por cento em volume, à temperatura de vinte graus Celsius, obtida pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar com características sensoriais peculiares, podendo ser adicionada de açúcares até seis gramas por litro (BRASIL, 2009).

De acordo com Silva (2011), em geral, denomina-se cabeça os 10% iniciais do processo de destilação, e cauda os 10% finais, enquanto que a fração coração constitui os 80% intermediários a estas, constituindo a fração da “cachaça de boa qualidade”.

Segundo este mesmo autor, de uma tonelada de cana consegue-se extrair, com o uso de pequenos engenhos, 600 L de caldo de cana, o que possibilita a obtenção de 60 L de álcool. Se o álcool for obtido a partir de resíduos de cachaça (cabeça e cauda), 600 L de caldo de cana serão suficientes para produzir 11 L de álcool. Portanto, de uma hectare que produza, em média, 100 t de cana, pode-se produzir 6.000 L de álcool ou 1.100 L de álcool e 11.400 L de cachaça de boa qualidade.

A produção da cachaça no Brasil é considerável e de grande importância social que representa, ao possibilitar inúmeros empregos, porém, a falta de incentivo ao pequeno produtor se desnuda como um grande obstáculo a ser vencido. Um dos fatores ambientais a ter em conta são os resíduos da produção da mesma. Geralmente a fração cabeça é jogada fora por produtores mais rigorosos, pois compromete o sabor da cachaça e prejudica a saúde do consumidor quando incorporada à bebida (BOZA; HORII, 1998).

Os produtores de cachaça podem ter uma produção versátil com a obtenção de um novo produto, o etanol, a partir de resíduos que até então para muitos seriam inúteis, sem agredir e comprometer o meio ambiente. O álcool combustível é um produto renovável, limpo e ecologicamente correto; que contribui para a redução do efeito estufa, não afeta a camada de ozônio e diminui substancialmente a poluição do ar, minimizando os seus impactos na saúde pública (PETROBRAS, 2007) quando comparado com os combustíveis fósseis. Além disso, ainda poderão aumentar sua renda, diminuindo os custos.

A produção de etanol em pequena escala traz vantagens e benefícios para o produtor de cachaça como geração de menores impactos ao meio ambiente, melhor aproveitamento de subprodutos, maior geração de renda e retorno financeiro para o produtor, além da produção de um biocombustível menos agressivo ao meio ambiente. Praticamente todo resíduo gerado na produção de cachaça não somente é deixado de ser descartado no ambiente, mas também é incorporado ao processo de produção, contribuindo para uma maior lucratividade. Ao mesmo tempo, com a utilização do bagaço como fonte de energia, praticamente todo CO₂ emitido durante a fabricação da cachaça é resgatado (carbono neutro). Somado a isto, o vinhoto que, com a aplicação deste novo processo, deixa de ser um agente poluidor do ambiente para se tornar matéria-prima na fabricação de álcool combustível. A utilização de conceitos energeticamente sustentáveis com processos contemporâneos de fabricação abre horizonte para a produção autossuficiente e sustentável dos produtores de cachaça.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar tecnicamente a coluna de destilação utilizada, usando como matéria-prima os resíduos provenientes da produção de cachaça.

Especificamente, pretendeu-se:

- a) Estudar o comportamento da vazão de saída do álcool e seu teor alcoólico para três saídas diferentes da coluna de destilação;
- b) Obter um modelo matemático para a vazão de saída do álcool em função das principais variáveis presentes no processo de destilação do álcool;
- c) Determinar a energia mínima necessária para realizar o processo de destilação; e
- d) Definir a altura ótima do recheio da coluna de destilação para um recheio comercial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes componentes:

- Matéria-prima: foram utilizadas misturas dos resíduos da produção de cachaça (cabeça e cauda), com teores alcoólicos de 15, 30, 45, 60 e 75%. Sempre foi utilizado um volume de 200 L em cada teste. Utilizou-se um densímetro de álcool com termômetro para determinar a porcentagem de álcool na mistura.
- Coluna de destilação: para a destilação do álcool combustível utilizou-se uma coluna de destilação construída em aço inox de 3,55 m de altura e 13 cm de diâmetro, a qual estava constituída por: a) Panela com capacidade para 400 L, instalada a uma caldeira a lenha de 50 kg_{vapor}/h; b) Dois trocadores de calor, um colocado acima do primeiro recheio e outro no topo da coluna; e c) Como recheio da coluna foi utilizado pedra brita, com altura do recheio de 2,5 m (Figura 2). As saídas 1, 2 e 3 estavam localizadas a uma altura de 1,99 (1,50 m de recheio), 2,39 (1,90 m de recheio) e 3,55 m (2,50 m de recheio) do início da coluna.

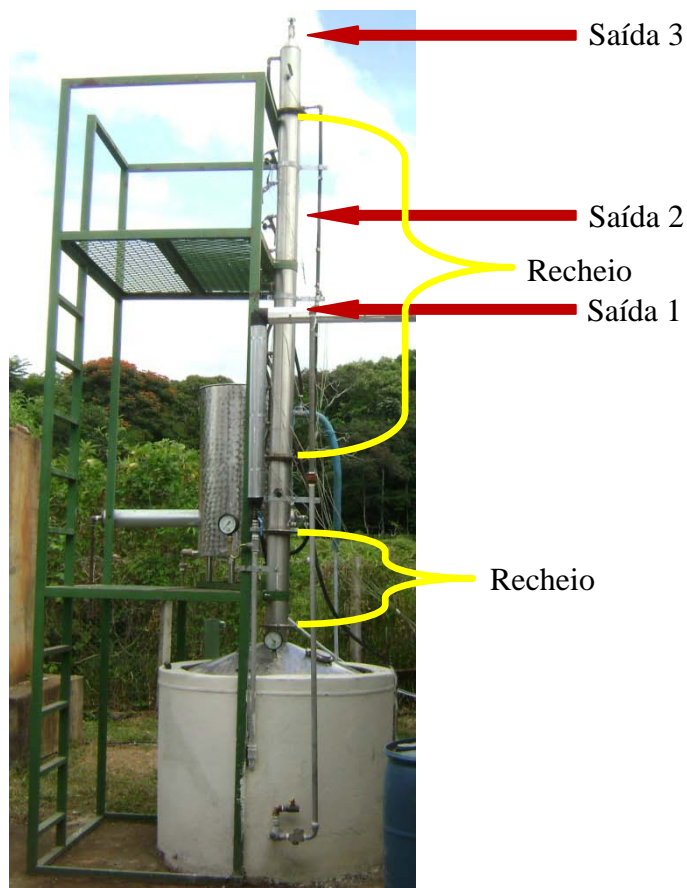


Figura 2. Coluna de destilação.

- Sistema de aquisição de dados: a coluna de destilação foi instrumentada com onze termopares tipo K, ao longo de sua altura. Utilizou-se um sistema de 12 canais, o qual descarregava os dados de temperatura em tempo real a um computador. O valor da temperatura foi utilizado como parâmetro para o controle manual da água nos trocadores de calor e do vapor na panela; para garantir o teor alcoólico necessário na saída.

Testes de destilação

Foram colocados 200 L de pré-destilado (cabeça e cauda) na panela com um teor alcoólico determinado anteriormente a 20 °C (15, 30, 45, 60 e 75%). Uma vez que iniciou o processo de destilação, mediu-se a vazão de saída do álcool e o teor alcoólico a cada 5 min. Como saída do álcool na coluna utilizaram-se três pontos diferentes (Figura 2). Realizaram-se cinco testes de destilação para cada uma das saídas, para um total de 15 testes. O tempo de duração do teste foi tomado como o tempo desde o início de saída do destilado durante uma hora; devido à dificuldade de manter estável a saída

do destilado. A análise do álcool destilado foi realizada segundo a Regulação ANP 23/2011 e o Regulamento Técnico ANP N°3/2011.

Observa-se na Figura 3 o processo de destilação simples que ocorre na coluna mostrada na Figura 2.

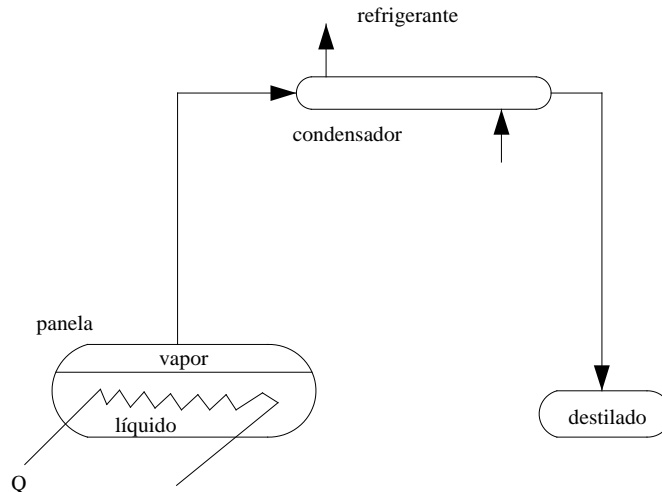


Figura 3. Esquema do processo de destilação simples.
Fonte: Marcilla, 1998.

As equações que representam o processo de destilação são deduzidas na sequência. Seja L_0 a quantidade inicial de mistura depositada na panela (molar ou em massa) de composição x_{i0} , sendo o componente i tomado como o componente de referência (geralmente o mais volátil). Em um determinado momento, (t) ficará em uma determinada quantidade de líquido L , de composição x_i . Seja dV a quantidade de vapor gerada ao longo de um intervalo de tempo entre t e $t + dt$, em equilíbrio com o líquido, e com composição y_i . Nesse intervalo de tempo, dt , o líquido sofre uma mudança total dL e sua composição também varia de dx_i . Um balanço de massa ao longo deste período de tempo fornece os parâmetros e condições dados a seguir.

Em $t = t$:

Quantidade total de vapor de composição y_i : 0

Quantidade total de líquido de composição x_i : L

Composição do vapor: -

Composição do líquido: x_i

Componente i no vapor: -

Componente i no líquido: Lx_i

Em $t = t + dt$:

Quantidade total de vapor de composição y_i : dV

Quantidade total de líquido de composição x_i : $L - dL$

Composição do vapor: y_i

Composição do líquido: $x_i - dx_i$

Componente i no vapor: $y_i dV$

Componente i no líquido: $(L - dL)(x_i - dx_i)$

A quantidade total y de componente i que passa à fase de vapor no tempo dt é igual à variação por meio da fase líquida e, portanto, pode ser escrita como:

Balanco total:

$$dV = (L - dL) - L = -dL \quad (1)$$

Balanco do componente i :

$$y_i dV = (x_i - dx_i)(L - dL) - x_i L \quad (2)$$

Operando e negligenciando o produto de diferenciais tem-se:

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx_i}{y_i - x_i} \quad (3)$$

Integrando a Equação (3) a partir das condições iniciais, $L = L_0$, $x_i = x_{i0}$ e das finais, $L = L_f$, $x_i = x_{if}$, pode-se escrever:

$$\frac{\ln(L_0)}{L_f} = \int_{x_{if}}^{x_{i0}} \frac{dx_i}{y_i - x_i} \quad (4)$$

A Equação (4) é conhecida como equação de Lord Rayleigh.

Para resolver os problemas associados com a destilação simples é necessário obter as equações representativas de todo o processo, entre o tempo inicial e o tempo final. Denominando-se D a quantidade total de vapor condensado a partir do início do processo até o seu final, e x_{iD} sua composição média, é possível obter os seguintes balanços:

$$L_0 - D = L_f \quad (5)$$

$$L_0 x_{i0} - D_{xD} = L_f x_{iD} \quad (6)$$

Assim, as Equações 4, 5 e 6 relacionam as quantidades e composições de todas as fases envolvidas no processo de destilação em qualquer instante.

Determinação do consumo de energia

O consumo de energia no processo de destilação foi considerado como a energia mínima necessária para evaporar o volume de álcool destilado. Para isso, precisou-se determinar o calor necessário para levar a mistura de pré-destilado colocada na panela até 78 °C, que corresponde ao calor sensível da mistura (Equação (7)).

$$Q_s = mC_p(T_2 - T_1) \quad (7)$$

em que:

- Q_s = Calor sensível da mistura, kJ;
- m = Massa de pré-destilado, kg;
- C_p = Calor específico da mistura, $\text{kJ kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$;
- T_2 = Temperatura final, °C; e
- T_1 = Temperatura inicial, °C.

O calor específico da mistura foi determinado pela Equação (8):

$$C_p = \sum_1^N X_i C_{p_i} \quad (8)$$

em que:

- X_i = Fração mássica do componente puro na mistura, adimensional;
- C_{p_i} = Calor específico do componente puro, $\text{kJ kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$;
- i = O i -ésimo componente; e
- N = Número de componentes.

Para evaporar o etanol da mistura quando atinge os 78 °C precisa-se continuar aquecendo e o valor de calor necessário para conseguir a evaporação é o calor latente da massa de etanol presente na panela (Equação (9)).

$$Q_L = m_e L_e + m_a L_a \quad (9)$$

em que:

- Q_L = Calor latente de vaporização do etanol, kJ;
- m_e = Massa de etanol na saída, kg;
- L_e = Entalpia de vaporização do etanol, kJ kg^{-1} ;

m_a = Massa de água presente no etanol na saída, kg; e

L_a = Entalpia de vaporização da água, kJ kg^{-1} .

A quantidade mínima de calor (Q_T) necessária para evaporar o volume de etanol presente na panela é igual à soma da quantidade de calor sensível da mistura (Q_S) e o calor latente de vaporização do álcool (Q_L), (Equação (10)).

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (10)$$

Determinação da altura equivalente de um prato teórico (AEPT)

A transferência de massa dentro de uma coluna de recheio tipicamente se descreve em termos de A_{EPT} , a altura equivalente de um prato teórico, ou seja, a altura de recheio requerido para uma etapa teórica de separação.

O desempenho de uma coluna de destilação de recheio é, frequentemente, expresso em termos da AEPT, definida utilizando a Equação (11).

$$AEPT = \frac{Z}{N} \quad (11)$$

em que:

$AEPT$ = Altura equivalente de um prato teórico, m;

Z = Altura do recheio, m; e

N = Número de estágios teóricos.

Existem vários modelos teóricos e empíricos para avaliar a AEPT, mas é preciso conhecer todas as características de recheio para poder utilizá-los.

Para calcular o número de estágios teóricos foi utilizado o método de McCabe-Thiele (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como se observa na Tabela 2, em 60% das destilações realizadas foi possível obter álcool com teores alcoólicos superiores aos 85%, os quais estão dentro dos valores recomendados por Crispim e Vieira (2001), para serem utilizados como álcool combustível. Observam-se na Tabela 2 que foram obtidas vazões desde 19 Lh^{-1} até 84 Lh^{-1} . Deve-se levar em conta que se trata somente do destilado da primeira hora,

que é o mais concentrado. Quanto ao teor alcoólico, o melhor resultado foi obtido com a destilação do pré-destilado a 45%, quando se realizou a destilação pela saída 3 da coluna, o qual correspondeu a 89,2%.

Tabela 2 - Resultados para a primeira hora de destilação

Saída	Volume inicial na panela	Teor de alc. inicial na panela	Vazão na saída	Volume de álcool destilado	Teor de álcool destilado	Volume final na panela	Teor alc. final na panela	Temp. na saída
(Nº)	(L)	(%)	(L h ⁻¹)	(L)	(%)	(L)	(%)	(°C)
1	200	15,0	33	33	71,9	167	3,6	79,9
	200	30,0	58	58	78,8	142	10,1	78,5
	200	45,0	31	31	85,9	169	37,3	77,6
	200	60,0	57	57	82,7	143	50,9	78,6
	200	75,0	84	84	85,2	116	67,5	79,8
2	200	15,0	21	21	80,8	179	7,4	78,8
	200	30,0	72	72	76,9	128	3,6	76,8
	200	45,0	20	20	85,4	180	40,6	77,4
	200	60,0	51	51	85,7	149	51,1	75,0
	200	75,0	39	39	86,8	161	72,2	80,5
3	200	15,0	20	20	86,8	180	7,0	78,3
	200	30,0	40	40	81,7	160	17,3	75,9
	200	45,0	19	19	89,2	181	40,4	76,4
	200	60,0	44	44	85,7	156	52,8	73,6
	200	75,0	33	33	87,0	167	72,7	77,8

Verifica-se na Tabela 2 que na saída 1 obteve-se maior vazão, mas menor concentração do álcool, ao contrário do que aconteceu na saída 3, na qual se obteve menor vazão, mas uma maior concentração.

Para determinar o comportamento da destilação foram utilizadas as Equações (5) e (6), cujos resultados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados calculados a partir dos 60 minutos de destilação

Saída	Vol. inic. na panela	Teor de alc. inic. na panela	Vazão na saída	Volume de álcool destilado	Teor de álcool destilado	Volume final na panela	Tempo de destilação	Teor de alc. final na panela
(Nº)	(L)	(%)	(L h ⁻¹)	(L)	(%)	(L)	(min)	(%)
1	167	3,6	33	3	71,9	164	5	2,4
	142	10,1	58	15	78,8	128	15	2,3
	169	37,3	31	70	85,9	99	136	2,7
	143	50,9	57	86	82,7	56	91	2,3
	116	67,5	84	91	85,2	25	65	2,1
2	179	7,4	21	11	80,8	168	32	2,5
	128	3,6	72	2	76,9	126	2	2,2
	180	40,6	20	83	85,4	98	248	2,7
	149	51,1	51	87	85,7	62	102	2,8
	161	72,2	39	133	86,8	28	205	2,7
3	180	7,0	20	10	86,8	170	29	2,4
	160	17,3	40	30	81,7	130	45	2,5
	181	40,4	19	79	89,2	102	250	2,4
	156	52,8	44	94	85,7	62	128	3,0
	167	72,7	33	139	87,0	29	252	3,4

Para obter os dados de destilação a partir da primeira hora foi suposto que era possível manter constantes a vazão e o teor alcoólico do destilado na saída, obtidos durante a primeira hora. Observe-se na Tabela 3 que, em alguns casos, as destilações acabam antes de completar a segunda hora.

Observa-se, das Figuras 4 a 8, que não existe padrão de comportamento na vazão da coluna em estudo, o que pode estar relacionado com a altura da coluna e com o controle manual da coluna. Observa-se que, trabalhando com a saída 3, esta apresenta melhor facilidade de controle manual durante o processo. Quanto ao teor alcoólico na saída, observa-se que este mantém um comportamento estável durante a destilação.

O processo de destilação é um processo de transferência de calor e massa e, neste caso, o que acontece é que a coluna de destilação não tem a altura de recheio adequada para permitir que aconteça corretamente essa troca de calor e massa. Além disso, é difícil controlar a temperatura na coluna, devido ao controle manual das válvulas de água nos trocadores de calor.

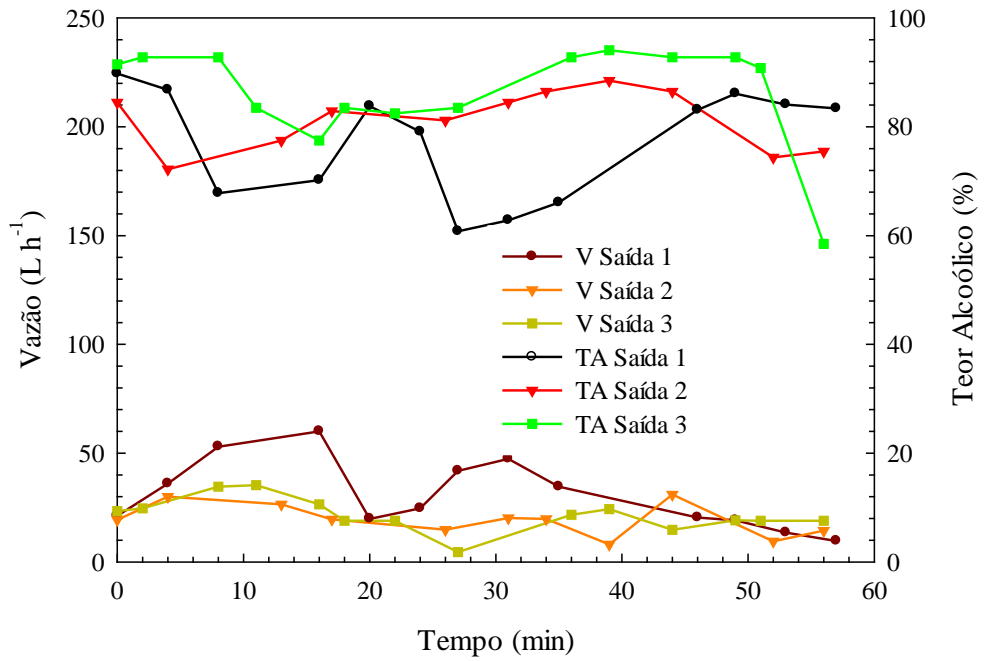


Figura 4 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 15%.

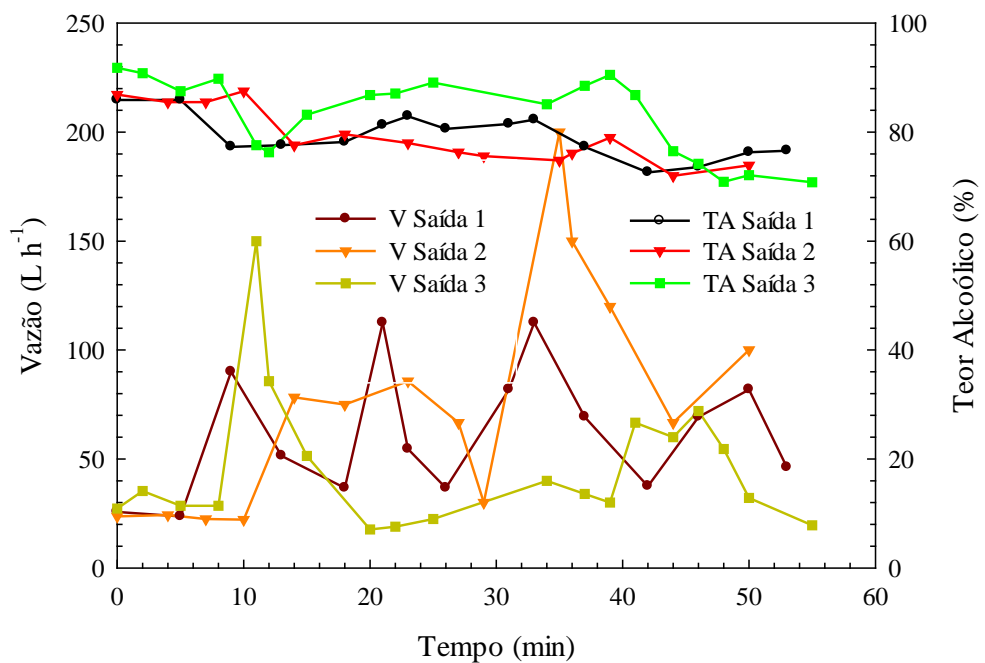


Figura 5 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 30%.

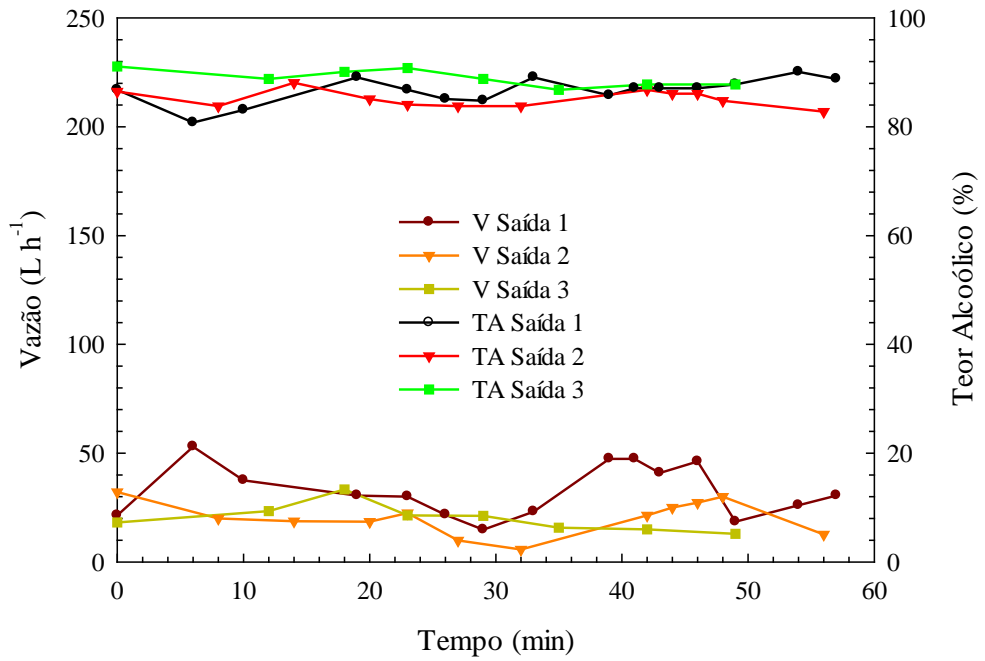


Figura 6 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 45%.

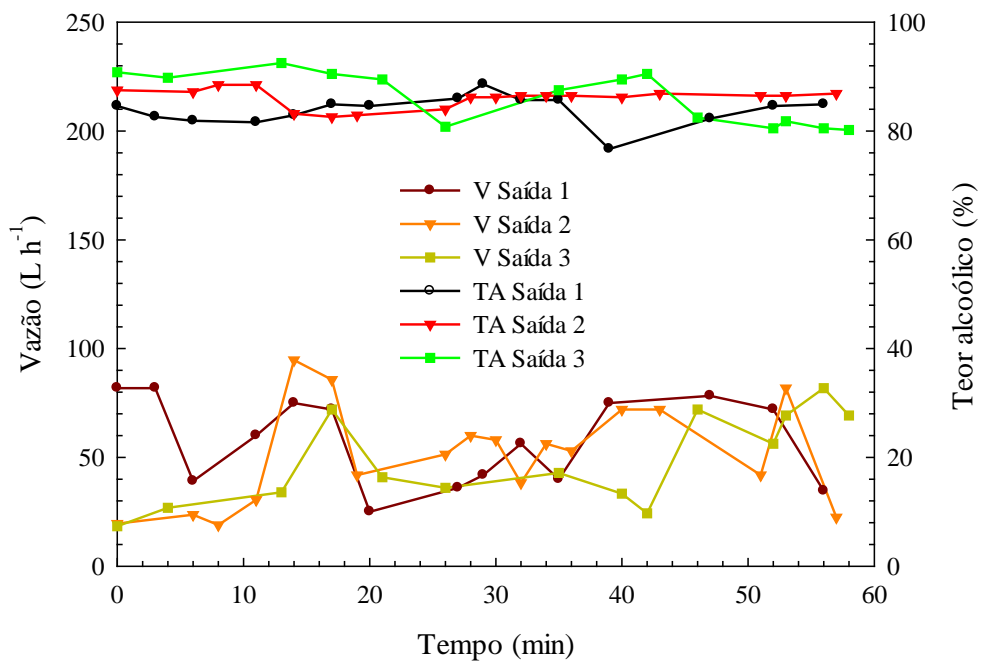


Figura 7 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 60%.

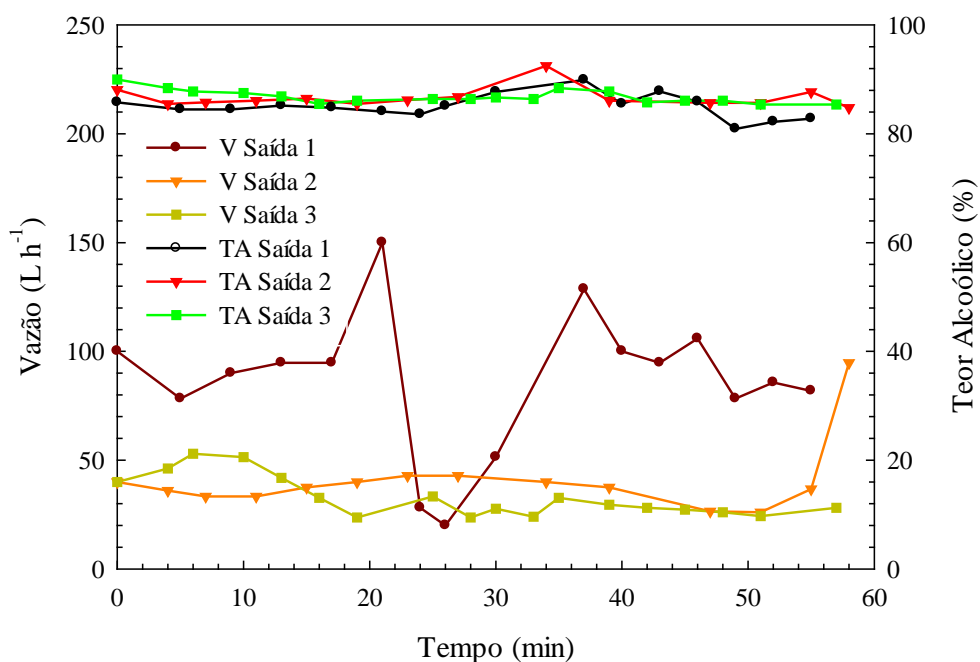


Figura 8 - Vazão de álcool (V) na saída e teor alcoólico (TA) de saída do álcool para um teor alcoólico inicial do pré-destilado de 75%.

A análise do álcool destilado foi realizada segundo a Regulação ANP 23/2011 e o Regulamento Técnico ANP N°3/2011. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultado da análise do álcool combustível de acordo com as normas da ANP

Ensaio	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Limite: Resolução ANP
Massa específica a 20 °C (kg m ⁻³)	848,9	825,8	824,9	EAC: 791,5 máx. EHC: 807,6 a 811,0
Teor alcoólico (% em massa)	78,1	87,0	87,3	EAC: 99,3 min. EHC: 92,5 a 93,8
Teor de hidrocarbonetos (% em volume)	0	0	-	Máx. 3
Potencial hidrogeniônico (pH)	3,55	5,24	5,18	6,0 a 8,0
Aspecto	Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas	-	Límpido e isento de impurezas
Cor	Incolor	Incolor	-	EAC: Laranja EHC: Isento de corante
Condutividade elétrica (μS m ⁻¹)	946,1	15,2	20,3	Máx. 350

EAC: etanol anidro combustível, EHC: etanol hidratado combustível.

Como podem ser observadas, todas as amostras enviadas para análise estão fora do padrão de comercialização, segundo os parâmetros definidos pela ANP. Porém,

segundo Crispim e Vieira (2001), a partir de um teor alcoólico de 85%, o álcool destilado pode ser usado como combustível na própria fazenda, sem nenhum empecilho.

Outro ponto que divergiu dos padrões definidos pela ANP foi o pH do produto. Porém, como foi usada matéria-prima oriunda da fermentação para produção de aguardente e o seu pH médio é de 4,0 a 5,0 (PEREIRA, 2007), a adequação a este parâmetro vai depender de outros processos, sabendo-se que, na destilação descontínua, essa correção é difícil de ser realizada. Aspecto importante a ter em conta na utilização como combustível, pois um combustível com pH ácido ou inferior a 6 danificaria os motores de combustão interna, diminuindo sua vida útil e o tempo de manutenção. Esta questão pode ser resolvida por meio da adição de alguma substância alcalina.

Das Figuras 9 a 13 observa-se o comportamento do teor alcoólico e volume na panela durante o processo de destilação. Conforme avança o tempo, ambos os parâmetros diminuem. Observa-se também na Figura 14 o comportamento do teor alcoólico e volume de mistura na panela durante o processo de destilação para um teor alcoólico inicial de 45% na saída 3.

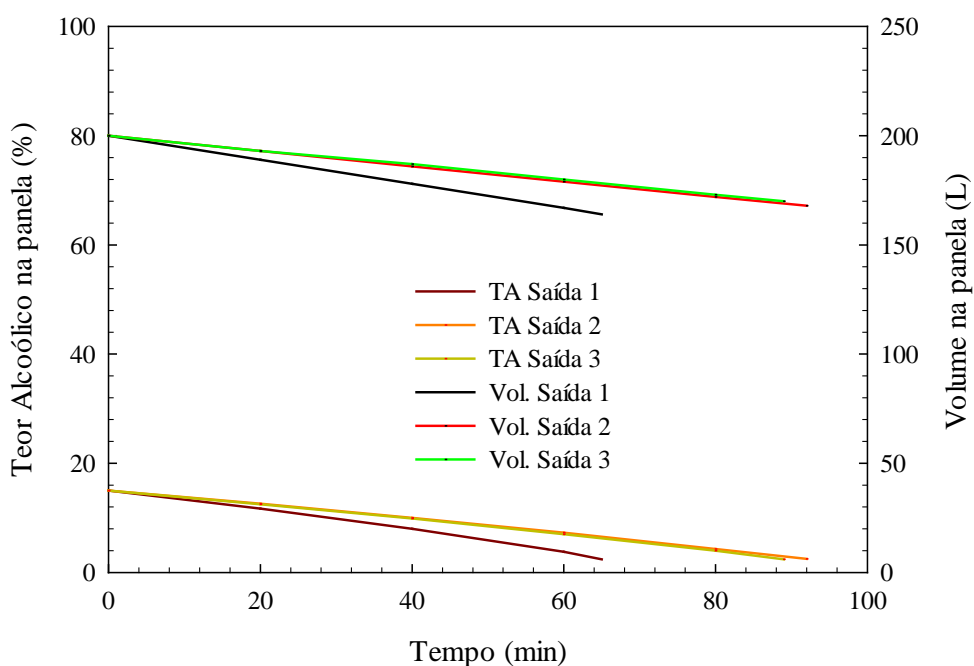


Figura 9 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 15% em função do tempo.

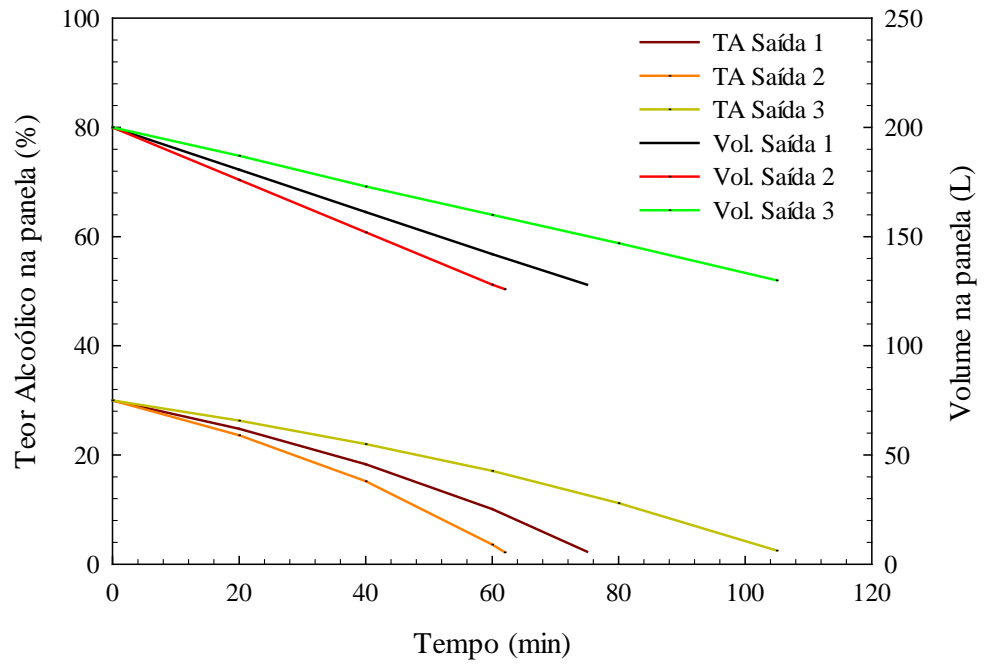


Figura 10 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 30% em função do tempo.

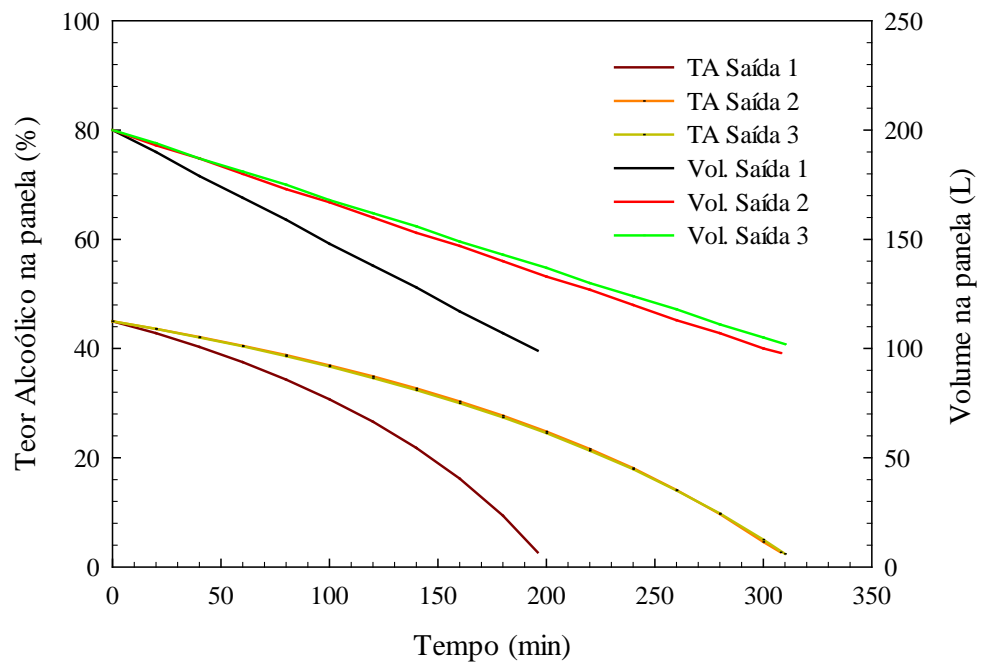


Figura 11 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 45% em função do tempo.

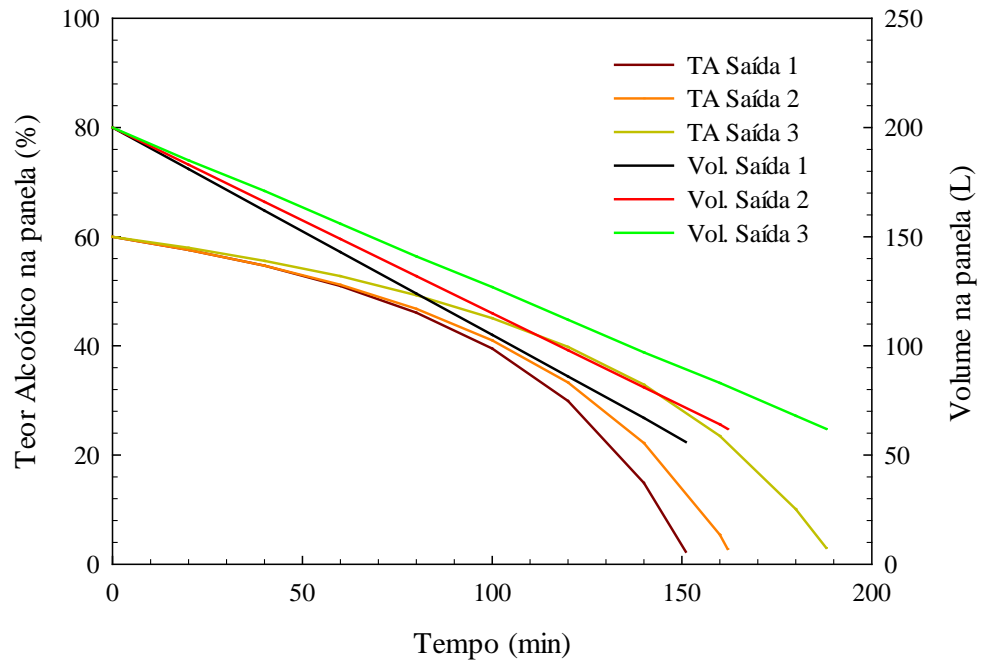


Figura 12 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 60% em função do tempo.

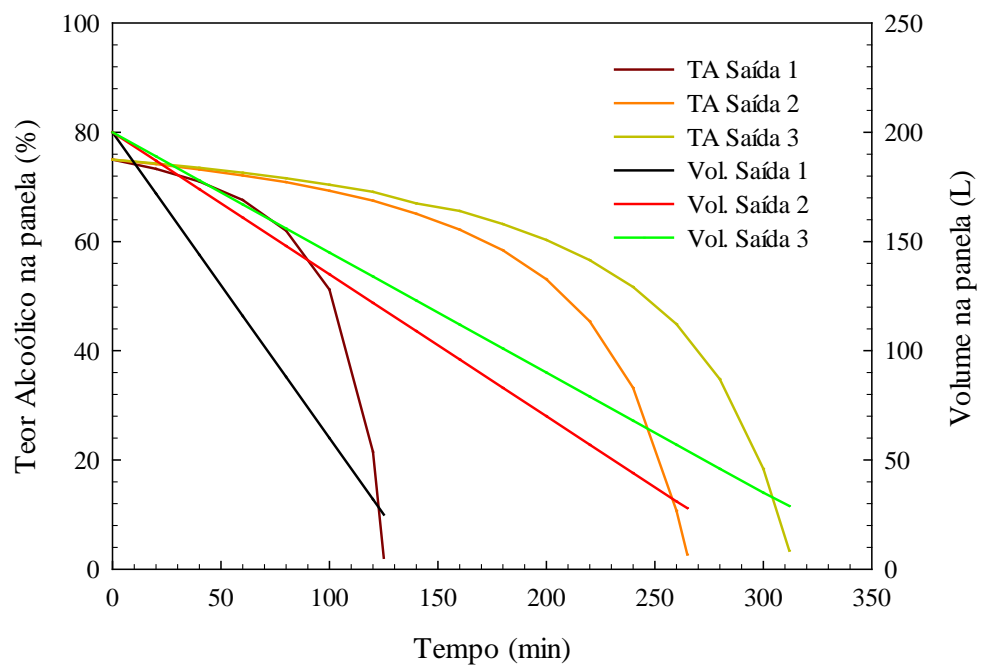


Figura 13 - Teor alcoólico (TA) e o volume (Vol.) da mistura na panela para uma carga inicial de 75% em função do tempo.

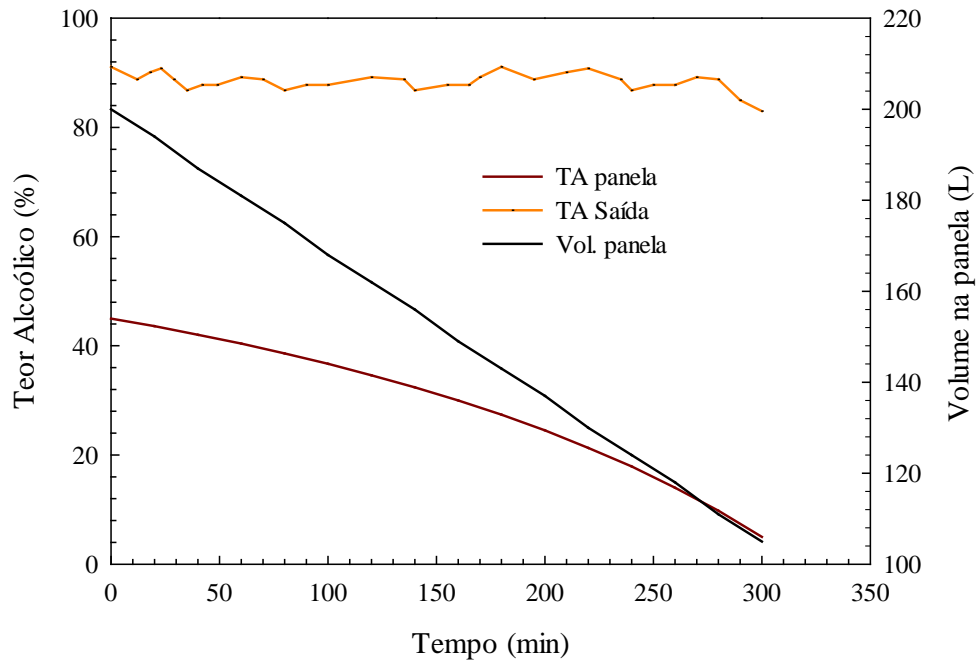


Figura 14 - Comportamento do teor alcoólico (TA) na saída 3 e na panela e do volume (Vol.) na panela para um teor alcoólico inicial de 45%.

Observou-se nas destilações realizadas que o líquido que fica na panela ao final da destilação contém entre 2,1 e 3,4% de álcool, o que corresponde, aproximadamente, a 1 e 4 L de álcool para pré-destilados de 75 e 15%, respectivamente. Verificou-se na prática que a coluna não consegue extrair este álcool que fica na panela.

Determinou-se a relação geral entre a vazão de saída do destilado na coluna e o teor alcoólico na entrada, o teor alcoólico na saída, a altura da coluna e a temperatura na saída da coluna. Para isso, utilizou-se uma análise de regressão multivariada e os dados obtidos durante a primeira hora de destilação. Tal relação pode ser expressa na Equação (12):

$$Q = 415,007 + 0,641TA_E - 2,637TA_S - 2,098T_S - 7,445H; \quad R^2 = 0,517 \quad (12)$$

em que:

- Q = Vazão de saída de álcool (Lh^{-1});
- T_{AE} = Teor alcoólico da mistura na entrada (%);
- T_{AS} = Teor alcoólico do destilado na saída (%);
- T_S = Temperatura de saída ($^{\circ}C$); e
- H = Altura da saída do destilado (m).

Determinou-se igualmente a relação para cada uma das saídas do destilado nas Equações (13), (14) e (15).

Saída 1:

$$Q = -572,676 + 0,783TA_E - 0,515TA_S + 8,013T_S; \quad R^2 = 0,726 \quad (13)$$

Saída 2:

$$Q = 911,412 + 1,192TA_E - 7,596TA_S - 3,775T_S; \quad R^2 = 0,979 \quad (14)$$

Saída 3:

$$Q = 435,861 + 0,233TA_E - 2,907TA_S - 2,160T_S; \quad R^2 = 0,955 \quad (15)$$

Nas Figuras 15 e 16 observa-se a relação entre a vazão teórica e experimental para as diferentes saídas do destilado na coluna.

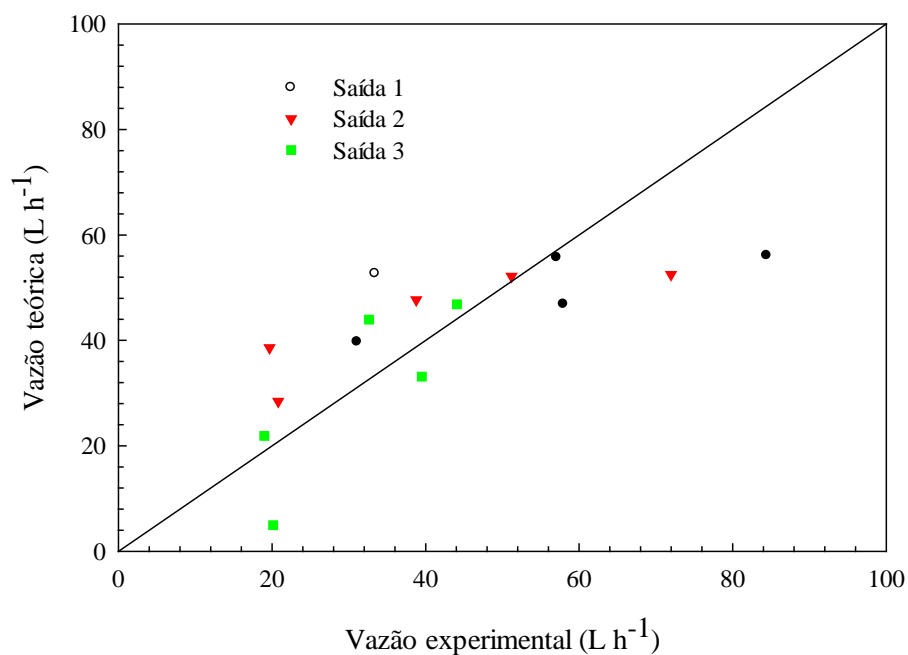


Figura 15 – Comparação entre a vazão teórica e experimental do álcool para as diferentes saídas do destilado na coluna de destilação estimada com o modelo geral (Equação 12).

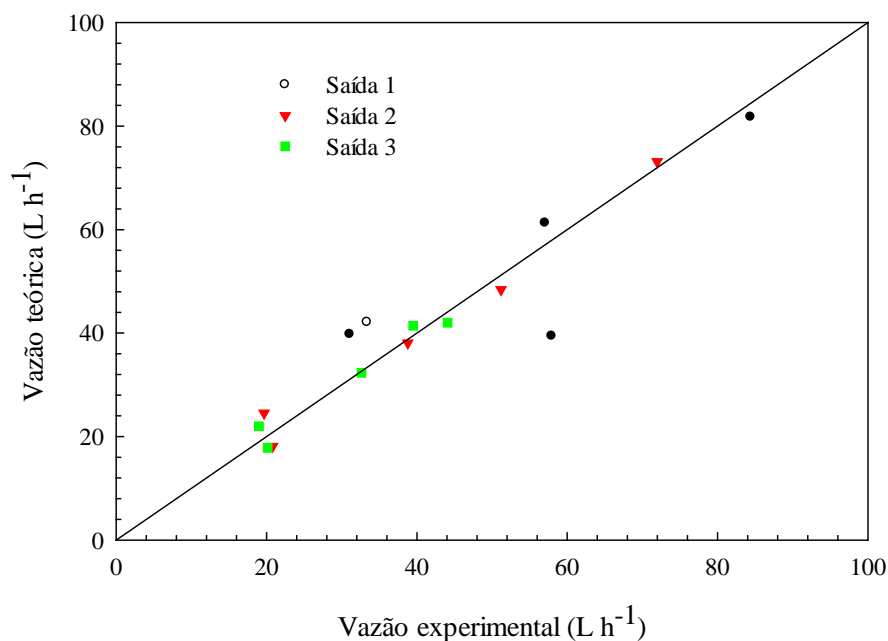


Figura 16 - Relação entre a vazão teórica e experimental para as diferentes saídas do destilado na coluna utilizando os modelos para cada uma das alturas.

Verifica-se na Figura 15 a comparação entre os valores experimentais obtidos e os teóricos estimados com a Equação (12) e na Figura 16 os valores estimados com a Equação (13), a (14) e a (15), obtidas pela análise de regressão multivariada. A Figura 15 tem maior dispersão em relação à Figura 16 devido ter sido usado para gerar esta figura o modelo geral ajustado para todos os dados experimentais obtidos, com um coeficiente de determinação de 0,517, valor inferior aos outros modelos ajustados para cada altura da coluna.

Pode-se observar na Figura 16 que os valores mais dispersos correspondem ao modelo da saída 1, verificando-se também, por meio do coeficiente de determinação do modelo, que apresenta um valor de 0,726. Este valor é baixo quando comparado com os outros modelos (saída 2 e 3). Justifica-se este comportamento devido ao sistema de controle da temperatura ser manual, o que impossibilita realizá-lo eficientemente. Recomenda-se utilizar um sistema eletrônico de controle mediante eletroválvulas e sensor de temperatura que garanta a temperatura adequada na saída para o processo.

Observa-se na Figura 17 o mínimo consumo específico de energia para evaporar o etanol presente em cada mistura analisada e a energia específica fornecida pela lenha utilizada em cada teste para cada mistura. Pode-se notar a diminuição à medida que aumenta o teor alcoólico na mistura a ser destilada, devido à existência de maior concentração de álcool. Assim, o calor específico da mistura diminuirá por influência da alta porcentagem mássica de etanol na panela porque este possui menor calor específico

que a água. A quantidade mínima de energia a fornecer ao sistema para evaporar o etanol presente na panela foi de $2.126,20 \text{ kJ L}^{-1}$ para a mistura com 15% de teor alcoólico e de $1.027,30 \text{ kJ L}^{-1}$ para a mistura com 75% de teor alcoólico. Isso significa que se deve aproveitar o calor cedido ao condensador quando se destilam misturas com baixo teor alcoólico, como se observa na Figura 18.

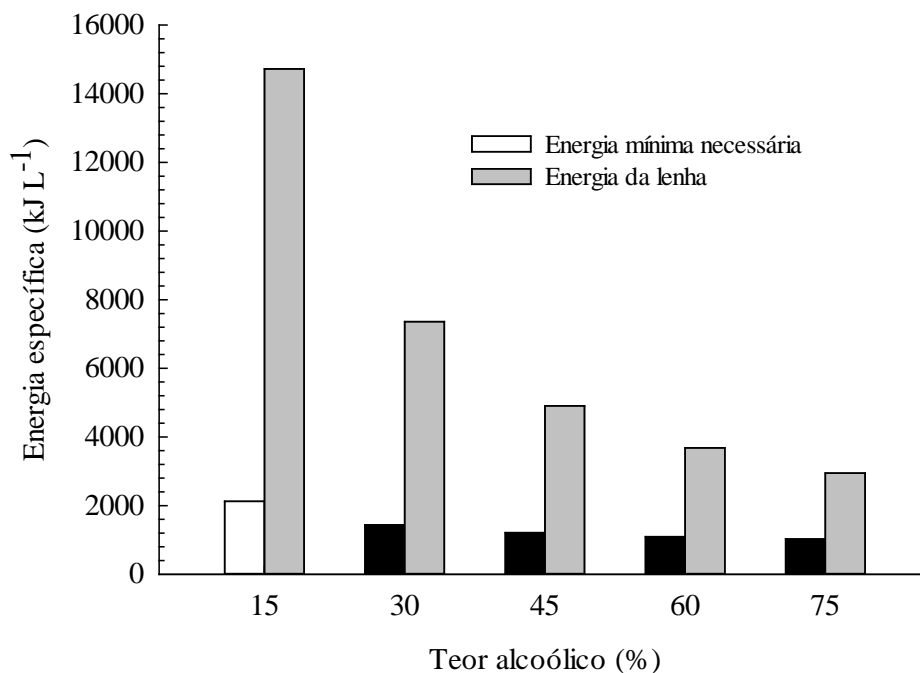


Figura 17 - Consumo específico de energia teórico e experimental em função do teor alcoólico para a obtenção do etanol combustível.

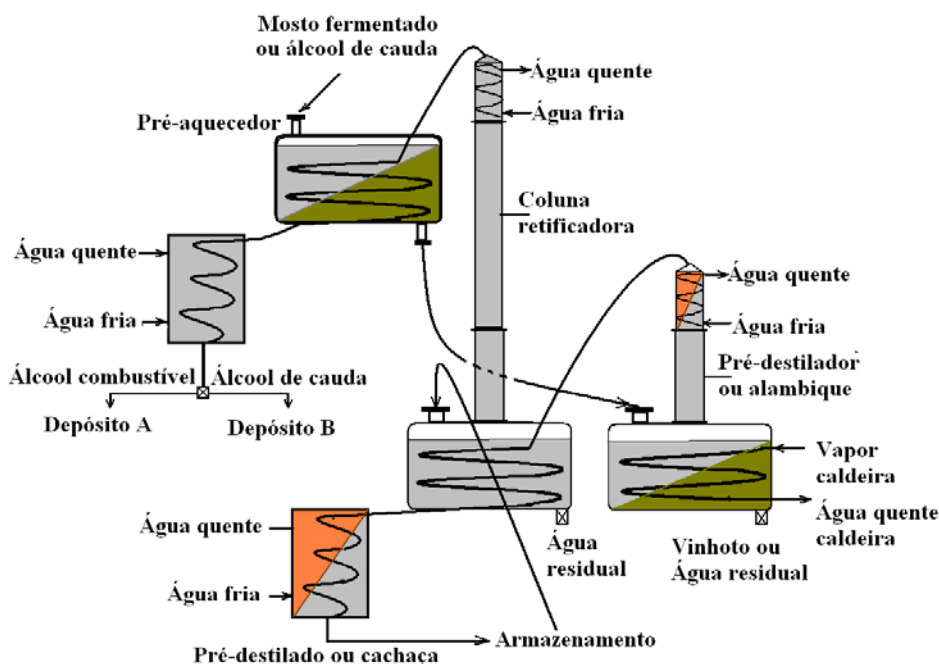


Figura 18 - Esquema para montagem de uma minidestilaria com sistema de pré-aquecimento para uso eficiente da energia.

Na caldeira utilizada o consumo de lenha necessário para realizar o processo de destilação foi em média de 25 kg por teste. Quando comparada a energia específica fornecida pelo combustível com o consumo mínimo específico de energia pôde-se apreciar que o sistema foi muito ineficiente. Isso ocorreu pelo fato da caldeira utilizada estar sobredimensionada, sendo necessário jogar fora parte do vapor produzido, além das perdas existentes no sistema.

Como não foi possível obter álcool combustível, decidiu-se obter a altura adequada do recheio que a coluna deveria ter se utilizasse algum recheio randômico comercial para obter álcool combustível a 93%. Para isso, utilizou-se o método gráfico de McCabe-Thiele para determinar o número de estágios teóricos. Nas Tabelas 5 e 6 encontram-se os valores utilizados no método gráfico de McCabe-Thiele.

Tabela 5 - Propriedades físicas dos componentes puros

Substância	Fórmula	Massa molecular (g mol ⁻¹)	Massa específica (g cm ⁻³)
Etanol	C ₂ H ₆ O	46	0,789
Água	H ₂ O	18	0,999

Tabela 6 - Valores da fração molar de álcool nas misturas utilizadas como matéria-prima

Teor alcoólico (%)	Fração molar de álcool	Fração molar de água	Fração molar da mistura
8	0,0014	0,0511	0,0262
40	0,0069	0,0333	0,1708
80	0,0137	0,0111	0,5528
93	0,0160	0,0039	0,8041

Para uma coluna que utilize como matéria-prima o caldo de cana-de-açúcar, o qual tem aproximadamente 8% de teor alcoólico, seriam necessários seis estágios teóricos. Para uma coluna que utilize como matéria-prima a mistura de cabeça e cauda a qual tem aproximadamente 40% de teor alcoólico seriam necessários cinco estágios teóricos e para utilizar a coluna para repassar uma matéria-prima pré-destilada com um teor alcoólico de 80% seriam necessários quatro estágios teóricos (Figura 19).

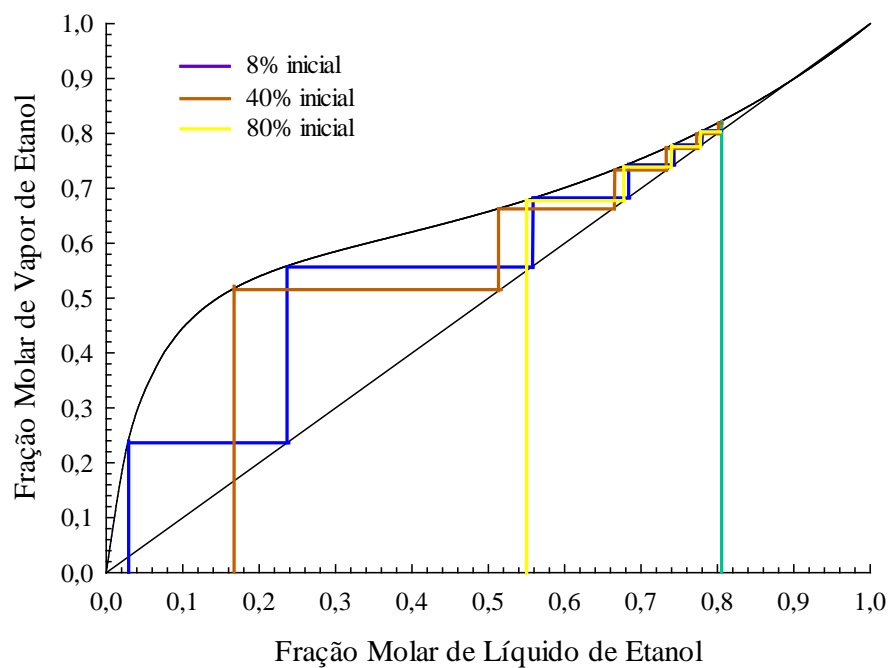


Figura 19. Diagrama de fases do etanol.

Observa-se na Tabela 7 a altura do recheio recomendada para diferentes tamanhos de anéis de *Pall*, para diferentes teores alcoólicos iniciais da mistura de pré-destilados.

Tabela 7. Altura do recheio recomendada para a coluna de destilação para um teor alcoólico final de 93%

Teor alcoólico inicial 8%			
Tipo recheio	Tamanho (mm)	AEPT (m)	Z (m)
Anéis de <i>Pall</i>	25	0,50	3,00
	38	0,75	4,50
	50	1,00	6,00
Teor alcoólico inicial 40%			
Tipo recheio	Tamanho (mm)	AEPT (m)	Z (m)
Anéis de <i>Pall</i>	25	0,50	2,50
	38	0,75	3,75
	50	1,00	5,00
Teor alcoólico inicial 80%			
Tipo recheio	Tamanho (mm)	AEPT (m)	Z (m)
Anéis de <i>Pall</i>	25	0,50	2,00
	38	0,75	3,00
	50	1,00	4,00

Observa-se que a mínima altura obtida foi de 2 m para anéis de *Pall* de 25 mm, para um teor alcoólico inicial de 80%. Comparado com os resultados obtidos na análise da coluna utilizada, foi possível notar que o projeto não está adequado precisando, portanto, aumentar a altura da coluna para garantir um teor alcoólico de 93% na saída dela e garantir a produção de álcool combustível segundo as normas da ANP. Observou-se que, utilizando teores alcoólicos iniciais na panela superiores a 85%, é possível obter o valor de teor recomendado pela norma ANP com a coluna utilizada.

Mantendo o sistema atual de produção do álcool na fazenda é recomendável levar toda a produção para uma cooperativa que garanta os parâmetros de qualidade do álcool combustível. Então, caso haja uma cooperativa, a coluna, como projetada, produz resultados satisfatórios.

4 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi realizado este trabalho concluiu-se, inicialmente, que a saída 3 da coluna de destilação apresentou uma vazão de saída do álcool mais estável e com teores alcoólicos superiores às outras saídas.

Obteve-se o modelo geral que descreve o comportamento da vazão de saída da coluna em função do teor alcoólico inicial de pré-destilado na panela, do teor alcoólico destilado na saída, da altura da coluna e da temperatura na saída.

Determinou-se o consumo específico de energia mínimo necessário para evaporar o álcool presente na mistura de pré-destilados. A quantidade mínima de energia a fornecer ao sistema para evaporar o etanol presente na panela foi de 2.126,20 kJ L⁻¹ para a mistura com 15% de teor alcoólico e de 1.027,30 kJ L⁻¹ para a mistura de 75% de teor alcoólico.

Por fim, determinou-se a altura ótima usando um recheio randômico comercial para diferentes teores alcoólicos iniciais para obter álcool combustível. A mínima altura obtida foi de 2 m para anéis de *Pall* de 25 mm, para um teor alcoólico inicial de 80% e a máxima altura obtida foi de 6 m para anéis de *Pall* de 50 mm, para um teor alcoólico inicial de 8%.

REFERÊNCIAS

APV-Distillation Handbook. 4th ed. SIEBE. N. Y. USA. APV Americas, Engineered Systems, 2008.

BENNETT, D. L. Optimize Distillation Columns. **Chemical Engineering Progress**. May 2000. p. 27. American Institute of Chemical Engineers.

BRASIL. Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/231844/decreto-6871-09#art2>>. Acesso em: 11 out. 2012.

BOZA, Y.; HORII, J. Influência da destilação sobre a composição e a qualidade sensorial da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 18, n. 4, p. 391-396, 1998.

CRISPIM, J. E.; VIEIRA, E. S. A. Cana-de-açúcar: boa alternativa agrícola e energética para a agricultura nacional. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 2, 2001.

KISTER, H. Z. **Distillation Design**. McGraw-Hill, New York, USA, 1992. 710 p.

MARCILLA, G. A. **Introducción a las operaciones de separación: cálculo por etapas de equilibrio**. Publicaciones Universidad de Alicante, 1998. 341 p.

NOGUEIRA, R. M. **Análise Técnica e Econômica da Produção Sustentável de Álcool Combustível, Aguardente e Leite, a partir da Cana-de-Açúcar**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

PEREIRA, A. F. **Suplementação de nitrogênio sobre a fermentação alcoólica para a produção de cachaça, cerveja e vinho**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

PETROBRAS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. Particle Technology and Separation Processes. **Coulson & Richardson's Chemical Engineering Handbook**. 5th ed. v. 2. Oxford: Editora Butterworth-Heinemann, 2002.

ROITMAN, V. **Curso de formação de operadores de refinaria: operações unitárias**. Curitiba: PETROBRAS: UnicenP, 2002. 50 p.

SILVA, J. S. **Produção de álcool na fazenda: equipamentos, sistemas de produção e usos**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2011. 390 f.

SINNOTT, R. K. **Chemical Engineering Design. Coulson & Richardson's Chemical Engineering Handbook**. 4th ed. Oxford: Editora Elsevier Butterworth-Heinemann, v. 6, 2005.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO TÉCNICA DE DOIS GRUPOS GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA A ÁLCOOL

1 INTRODUÇÃO

A indústria da cana-de-açúcar é de longa data um dos esteios da economia brasileira. A partir da introdução das primeiras mudas no país, em 1532, por mais de dois séculos o açúcar foi o principal produto brasileiro. Há cerca de 40 anos teve início a transformação do setor. Além do açúcar, as usinas passaram a ter foco na produção do etanol e, mais recentemente, a atenção voltou-se à bioeletricidade, aos alcoolquímicos e à comercialização de créditos de carbono. Trata-se de um novo patamar de negócios, no qual a competitividade é a ordem do dia (NEVES; TROMBIN; CONSOLI, 2010).

O álcool etílico, ou etanol, é uma substância com fórmula molecular C_2H_6O , que pode ser utilizada como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha (ciclo Otto) de duas maneiras, basicamente: 1) em misturas de gasolina e etanol anidro; ou 2) como etanol puro, geralmente hidratado.

No caso brasileiro, as especificações, que devem ser atendidas pelos produtores e respeitadas por toda a cadeia de comercialização, são definidas pela Portaria ANP 57/2011, para a gasolina com etanol anidro; e pela Resolução ANP 7 de 09/02/2011, para o etanol anidro e hidratado, denominados, respectivamente, álcool etílico anidro combustível (EAC) e álcool etílico hidratado combustível (EHC). Segundo essa legislação, considerando teores em massa, o etanol anidro deve conter no máximo 0,4% de água, enquanto que o etanol hidratado deve conter no máximo 4,9%. O teor alcoólico deve ser 99,3% para o EAC e entre 92,5 e 93,8% para o EHC, considerando as porcentagens em massa (ANP, 2011). Segundo a Resolução CIMA 37/2007, 25% é o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina (CIMA, 2007).

O etanol é um capítulo recente na história dos motores de combustão interna. Os primeiros motores foram desenvolvidos para uso de gasolina e diesel. Atualmente, a interface tecnológica motor-combustível revela interesse pelos biocombustíveis, em particular pelo etanol. É preciso levar em conta que, no mundo, 97% dos combustíveis consumidos são derivados do petróleo. Isso é relevante porque torna a viabilização comercial de qualquer combustível alternativo dependente do aproveitamento da

infraestrutura para transporte, estocagem e distribuição de gasolina e diesel. Nesse sentido, a compatibilidade do etanol, misturado à gasolina ou puro, é uma grande vantagem frente a outras opções energéticas (NIGRO; SZWARC, 2010a).

O etanol hidratado puro deve ser usado em motores fabricados ou adaptados especificamente para esse fim, em particular com a adoção de taxas de compressão mais elevadas, visando utilizar adequadamente a octanagem mais alta do etanol frente à gasolina e obter ganhos de eficiência de 10%. Em outras palavras, a maior octanagem do etanol permite que os motores obtenham mais energia útil do calor do combustível, comparativamente à gasolina. Outras modificações devem ser efetuadas no sistema de alimentação de combustível e na ignição para compensar as diferenças na relação ar-combustível e outras propriedades. Além disso, são requeridas modificações em alguns materiais em contato com o combustível, como tratamento anticorrosivo das superfícies metálicas dos tanques, filtros e bombas de combustível e substituição de tubulações ou adoção de materiais mais resistentes ao etanol. Atualmente, depois de décadas de aperfeiçoamento de motores especialmente fabricados para etanol, a tecnologia automotiva está suficientemente desenvolvida para permitir que veículos a etanol puro hidratado tenham desempenho, dirigibilidade, condições de partida a frio e durabilidade absolutamente similares aos motores a gasolina, especialmente em países com invernos moderados (BNDES; CGEE, 2008).

Devido à crise do petróleo de 1973, dois anos depois, foi desenvolvido pelo governo federal o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). O auge do Programa foi em 1979, com o segundo choque de preço do petróleo. O Proálcool tinha como objetivo substituir os derivados de petróleo pelo álcool, uma vez que, nessa época, a crise do petróleo já se espalhava pelo mundo, e o preço do produto subia cada vez mais, sendo necessário buscar outra fonte de energia para substituí-lo.

Na época, o que mais interessava era o desenvolvimento de uma tecnologia do motor a álcool que aumentasse a eficiência energética, que chegou a ser 16% superior à dos veículos à gasolina. Considerações ambientais não eram prioritárias, embora a qualidade “verde” do etanol, como combustível renovável, já fosse reconhecida. Foi só na década de 1980, quando os veículos a álcool atingiram 90% das vendas, que passaram a ser valorizadas as características ambientais e sociais do etanol, não raramente relegando a segundo plano a eficiência energética no aproveitamento do combustível. A partir da década de 1990, com a queda dos preços do petróleo, a indústria automobilística voltou a investir mais na atualização tecnológica do veículo à

gasolina, o que reduziu para cerca de 4% a vantagem energética dos veículos a etanol (NIGRO; SZWARC, 2010a).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar no ano civil 2011 alcançou 565,8 milhões de toneladas. Este montante foi 9,8% inferior ao registrado no ano civil anterior, quando a moagem foi de 627,3 milhões de toneladas. Em 2011, houve redução de 18,1% na fabricação de etanol, produzindo-se o montante de 22.892.504 m³. Cerca de 62% deste total referem-se ao etanol hidratado: 14.217.182 m³. Em termos comparativos, houve queda de 28,7% na produção deste combustível em relação a 2010. No que tange à produção de etanol anidro, que é misturado à gasolina A para formar a gasolina C, registrou-se acréscimo de 7,9%, totalizando 8.675.322 m³ (EPE, 2012).

Os combustíveis renováveis já representam 19% da energia dos combustíveis utilizados no setor de transportes no Brasil, que também pretende exercer certa liderança internacional e servir de exemplo para outros países na produção e utilização de combustíveis renováveis. Fica, portanto, o desafio para a engenharia brasileira: não só adaptar para o etanol as tecnologias desenvolvidas para uso dos derivados de petróleo, mas também realizar desenvolvimentos tecnológicos baseados nas propriedades específicas do etanol para tornar sua utilização como combustível mais competitiva, ajudando a evitar que novas legislações limitem o uso de etanol no mercado global (NIGRO; SZWARC, 2010b).

Neste trabalho, objetivou-se avaliar o desempenho de dois grupos geradores, utilizando, como combustível, álcool do posto de combustível e álcool da fazenda proveniente de uma microdestilaria. Especificamente, pretendeu-se avaliar a potência gerada, o consumo específico de combustível, bem como a eficiência dos dois grupos geradores de energia elétrica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes componentes:

- **Grupo Gerador 1** (GG 1): um gerador monofásico a etanol de 10 kVA/220V, sendo constituído de um motor de combustão de quatro tempos, de dois cilindros em V, associado a um gerador da marca BRANCO B4T-10.000 (Figura 1).



Figura 1. Grupo gerador 1.

- **Grupo Gerador 2 (GG 2):** um gerador trifásico a etanol de 42 kVA/220V , sendo constituído de um motor de combustão a gasolina, de seis cilindros igual ao de uma caminhonete FORD F1000, modificado para operar com etanol, associado a um gerador da marca WEG, modelo GTA162AIVD, com os terminais de saída conectados na configuração estrela, provido de sistemas de excitação de campo e controle de velocidade automáticos (Figura 2).



Figura 2. Grupo Gerador 2.

- **Combustível:** etanol comercial de posto de abastecimento e álcool combustível de fazenda com teor alcoólico de 91%, produzido a partir de resíduos da cachaça (cabeça e cauda) numa microdestilaria.
- **Dissipadores de energia:** lâmpadas incandescentes e resistências elétricas.

Medição do consumo de combustível

GG 1: a medida do consumo de combustível foi obtida pelo consumo de 500 mL de combustível, os quais foram colocados numa proveta de igual volume, medindo o tempo gasto pelo grupo gerador para consumo deste volume de combustível (Figura 3).



Figura 3. Medidor do consumo de combustível do GG 1.

GG 2: Para analisar o consumo de combustível do sistema foi utilizado um sistema medidor composto por uma mangueira transparente colocada no reservatório de combustível, com uma escala previamente calibrada com a ajuda de uma proveta. À medida que o combustível foi adicionado ao reservatório, o nível da mangueira foi registrado em uma escala, o que, segundo o princípio de Pascal, equivale ao volume do combustível presente no reservatório. É importante ressaltar que a extremidade inferior da mangueira se encontra conectada à base do tanque de combustível e a parte superior está em contato direto com o ar (Figura 4). Determinou-se o consumo de combustível para um tempo estabelecido de 2 h.



Figura 4. Medidor do nível de combustível do GG 2.

O cálculo do consumo específico do combustível do motor se definiu pelo volume consumido em um intervalo de tempo para uma potência determinada, como segue na Equação (1):

$$C_{ec} = \frac{V}{t P} \quad (1)$$

em que:

C_{ec} = Consumo específico de combustível, L (kWh)⁻¹;

V = Volume de combustível, L;

t = Tempo, h; e

P = Potência, kW.

Eficiência do grupo gerador

Para calcular a eficiência do grupo gerador, utilizou-se a Equação (2):

$$\eta = \frac{3600}{C_{ec} P_{Cl}} \quad (2)$$

em que:

η = Eficiência do sistema, decimal;

C_{ec} = Consumo específico de combustível, L (kWh)⁻¹; e

P_{Cl} = Poder calorífico inferior do combustível, kJ L⁻¹ (neste caso, 22350 kJ L⁻¹).

Ensaio do grupo gerador

GG 1: os ensaios foram feitos, inicialmente, com o grupo gerador operando sem carga. Depois os ensaios foram realizados colocando duas cargas diferentes de 3,5 e 7,1 kW. Para dissipar a energia elétrica produzida foi montada uma estrutura constituída por lâmpadas incandescentes de 200 W e um conjunto de resistências (Figura 5). A estrutura foi dividida em duas partes. A primeira foi composta por um circuito elétrico com lâmpadas incandescentes para uma potência total de 3,5 kW. A segunda foi composta por um circuito elétrico com lâmpadas incandescentes e resistências elétricas para uma potência total de 7,1 kW. Utilizou-se álcool do posto de combustível e álcool da fazenda nos ensaios e foram realizadas três repetições.



Figura 5. Conjunto para dissipação da energia elétrica do GG 1.

GG 2: os ensaios foram feitos no grupo gerador com cinco cargas diferentes de 4,5; 10,5; 16,5; 22,5 e 27 kW. Para dissipar a energia elétrica foi montado um banco de resistências num reservatório de água (Figura 6). O banco consistiu em cinco conjuntos de resistências, sendo dois conjuntos de 4,5 kW e três de 6 kW, totalizando 27 kW. Utilizou-se álcool do posto de combustível e álcool da fazenda nos ensaios realizados em três repetições.



Figura 6. Conjunto para dissipação da energia elétrica do GG 2.

Nos ensaios foram obtidas informações sobre grandezas, tais como tensão, corrente, fator de potência e frequência, utilizando para tal o aparelho Medidor Universal de Grandezas (MUG) (Figura 7), que possibilita a coleta de dados, bem como seu armazenamento em memória interna e transferência para computador.



Figura 7. Medidor universal de grandezas (MUG).

Análise estatística

Com os dados coletados realizou-se uma análise da significância da utilização do álcool do posto de combustível e do álcool da fazenda, aplicando-se o teste de *t* de *Student* ao nível de significância de 95%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados os ensaios com o grupo gerador 1 (GG 1) com álcool do posto de combustível e da fazenda. Na Figura 8, observa-se a potência gerada com cada combustível. A potência gerada para as cargas 1 e 2 utilizando álcool do posto de combustível foi de $3,45 \pm 0,01$ e $7,02 \pm 0,04$ kW, respectivamente. Quando se utilizou álcool da fazenda, a potência gerada foi de $3,45 \pm 0,02$ e $6,86 \pm 0,03$ kW para as cargas 1 e 2, respectivamente. Para a carga 1 obteve-se a mesma potência com ambos os combustíveis, mas para a carga 2 alcançou-se uma potência maior quando foi utilizado álcool do posto. Determinou-se, mediante o teste *t* ($\alpha = 0,05$), que existe diferença significativa para a potência gerada com a carga 2 do GG 1.

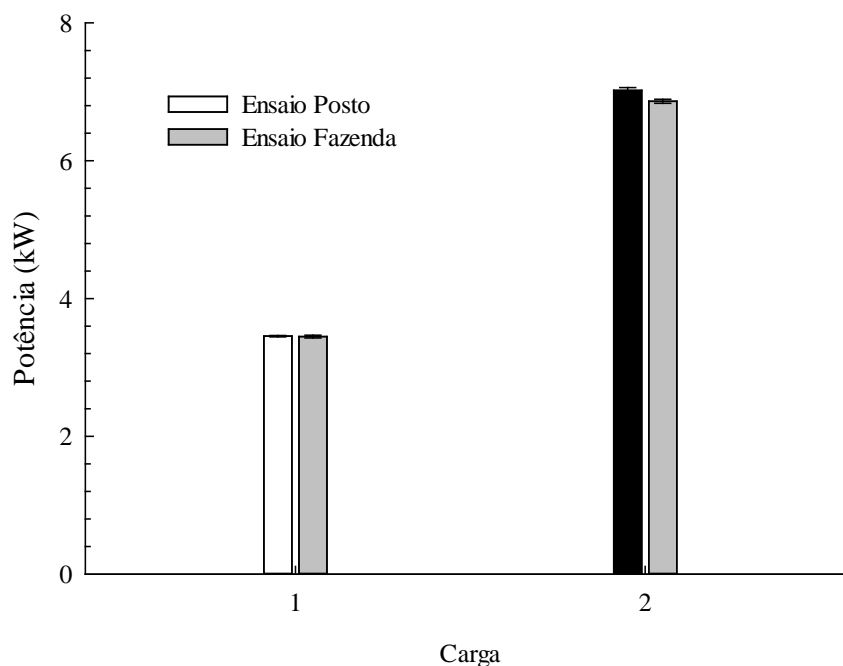


Figura 8. Potência elétrica gerada em função da carga no grupo gerador 1 utilizando álcool combustível do posto e álcool combustível da fazenda.

Na Figura 9, observa-se a potência gerada com o grupo gerador 2 (GG 2). Neste caso, a potência gerada com álcool do posto para a carga 1, 2, 3, 4 e 5 foi de $4,44 \pm 0,01$, $10,37 \pm 0,07$, $16,33 \pm 0,14$, $21,72 \pm 0,77$ e $25,99 \pm 0,98$ kW, respectivamente. Realizaram-se ensaios utilizando álcool da fazenda unicamente para a carga 4 e 5 e estes não foram com repetição. Os resultados obtidos para as cargas 4 e 5 foram 22,27 e 26,85 kW, respectivamente. Obtiveram-se potências maiores para as cargas 4 e 5 com o álcool da fazenda, mas este aumento de potência não foi significativo.

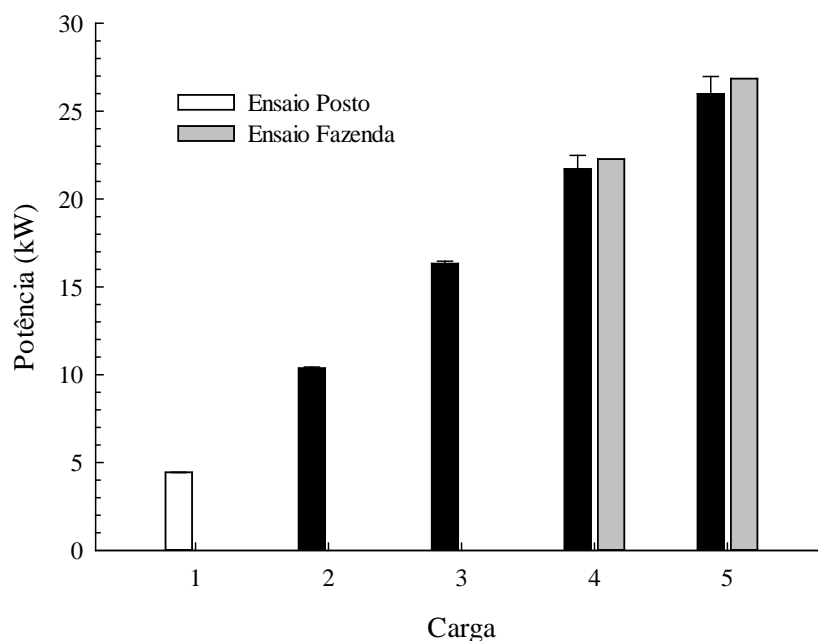


Figura 9. Potência elétrica gerada em função da carga no grupo gerador 2 utilizando álcool combustível do posto e álcool combustível da fazenda.

As tensões obtidas com o grupo gerador 1 encontram-se na Tabela 1.

Pela análise dos dados contidos na Tabela 1, é possível constatar que à medida que a carga demandada do gerador cresce, a tensão média tem seu valor reduzido. Isso acontece tanto com o álcool do posto como com o álcool da fazenda. Os valores de tensão em ambos os combustíveis para a carga 2 tem diferenças maiores que 10% com respeito à tensão nominal de 220 V. Observa-se também a estabilidade da tensão para cada carga utilizada com cada um dos combustíveis, com diferença não superior a um valor de 2 V.

Tabela 1 - Tensões obtidas com o grupo gerador 1

Carga (kW)	Ensaio	Tensão Média (V)	Desvio Padrão (V)	Tensão média Mínima (V)	Tensão média Máxima (V)
Posto					
3,45	1	211,77	0,5579	211,00	212,60
	2	212,12	0,2438	211,90	212,60
	3	212,23	0,1337	212,00	212,40
7,02	1	195,56	0,2186	195,30	196,00
	2	195,00	0,1658	194,80	195,20
	3	194,27	0,2830	193,90	194,80
Fazenda					
3,45	1	212,86	0,3307	212,30	213,20
	2	211,94	0,2186	211,70	212,40
	3	211,80	0,2000	211,50	212,20
6,86	1	192,50	0,4082	191,80	193,20
	2	191,94	0,3688	191,50	192,50
	3	191,56	0,1856	191,20	191,80

As tensões obtidas com o grupo gerador 2 encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Tensões obtidas com o grupo gerador 2

Carga (kW)	Ensaio	Tensão média (V)	Desvio Padrão (V)	Tensão média Mínima (V)	Tensão média Máxima (V)
Posto					
4,44	1	126,33	0,0459	126,30	126,40
	2	126,36	0,0495	126,30	126,40
	3	126,64	0,0506	126,60	126,80
10,37	1	125,10	0,2359	124,60	125,50
	2	126,06	0,2307	125,10	126,40
	3	126,28	0,2822	125,20	126,50
16,33	1	125,18	0,3925	123,00	125,60
	2	126,29	0,1645	125,20	126,50
	3	126,00	0,2020	123,30	126,20
21,72	1	121,93	0,5616	120,60	125,50
	2	126,07	0,0911	125,90	126,20
	3	125,62	0,3319	124,50	125,90
25,99	1	121,02	1,1507	123,00	125,60
	2	117,23	0,5507	125,20	126,50
	3	117,14	0,7506	123,30	126,20
Fazenda					
22,27	1	126,19	0,0264	126,10	126,20
26,85	2	120,34	0,3103	119,20	120,90

Pela análise dos dados contidos na Tabela 2 é possível constatar que à medida que a carga do gerador cresce, a tensão média tem seu valor reduzido. Para todos os valores de carga utilizados a tensão se manteve dentro da faixa de tolerância de 116 V a 133 V, em torno do valor nominal de 127 V, sendo essa faixa de tolerância uma das

condições contratuais de fornecimento de energia elétrica aplicada pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), empresa responsável pelo fornecimento de energia elétrica na região de Viçosa (CEMIG, 2012).

A variação da tensão é consequência da variação de frequência do sistema. Isso revela a existência de deficiências no sistema de controle de velocidade, uma vez que este deveria promover uma regulação de frequência em 60 Hz, o que não foi observado no sistema em questão. O caso mais crítico ocorreu para a carga de 27 kW, para a qual a frequência de trabalho atingiu valores de 48 Hz.

Em ambos os grupos geradores, reporta-se que têm um comportamento similar quando é aumentada a carga de trabalho, tanto para o álcool do posto como para o álcool da fazenda. Verifica-se que ambos têm um comportamento estável na produção de energia em cada uma das cargas utilizadas. Também existe a possibilidade de que a regulação do sistema de rotação esteja fora das faixas estabelecidas, devido ao decréscimo na rotação com o aumento das cargas de trabalho.

Na Figura 10, observa-se o consumo específico de combustível.

Em ambos os grupos geradores, conforme aumenta a potência elétrica gerada o consumo de combustível específico diminui. Para o grupo gerador 1, o consumo de combustível específico foi de $1,86 \pm 0,01$ L por kWh para a carga 1 de 3,45 kW utilizando álcool do posto e de $1,78 \pm 0,01$ L por kWh utilizando álcool da fazenda para a mesma potência. Determinou-se mediante o teste t que existe uma diferença significativa entre os consumos de combustível da carga 1.

Para a carga 2, o consumo de combustível foi de $0,93 \pm 0,01$ L por kWh utilizando álcool do posto e de $0,93 \pm 0,01$ L por kWh utilizando álcool da fazenda. Determinou-se mediante o teste t que não existe uma diferença significativa entre os consumos de combustível da carga 2. Neste caso, o consumo foi menor quando se utilizou álcool da fazenda.

Independentemente da carga, o consumo foi $6,47 \text{ L h}^{-1}$ para álcool do posto e $6,15 \text{ L h}^{-1}$ para álcool da fazenda, o que representa uma diferença significativa de acordo com o teste t.

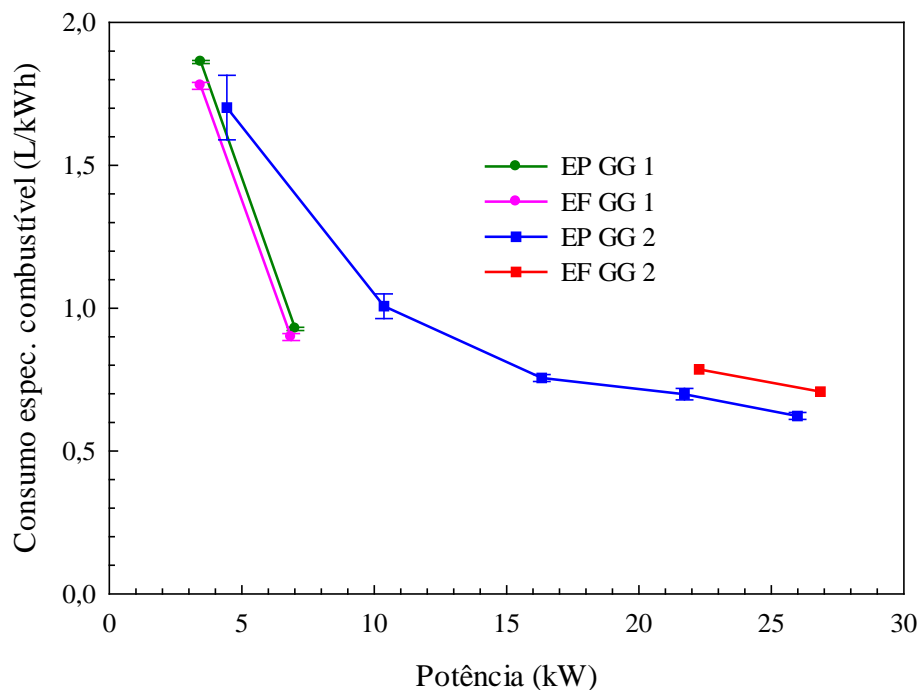


Figura 10. Consumo específico de combustível para o grupo gerador 1 (GG 1) e o grupo gerador 2 (GG 2), utilizando álcool do posto (EP) e álcool da fazenda (EF).

Para o grupo gerador 2, o consumo específico de combustível utilizando álcool do posto, para as cargas 1 a 5, foi de $1,70 \pm 0,11$; $1,01 \pm 0,04$; $0,76 \pm 0,01$; $0,70 \pm 0,02$ e $0,62 \pm 0,01$ L por kWh, respectivamente. Para o álcool da fazenda o consumo específico foi de 0,79 e 0,71 L por kWh para as cargas 4 e 5, respectivamente.

Determinou-se, mediante o teste t, que existe diferença significativa para as cargas 4 e 5 no consumo específico de combustível. Neste caso, o consumo foi maior para o álcool da fazenda, mas o aumento não foi maior que 15%.

Na Figura 11, observa-se que, à medida que aumentou a potência de trabalho no grupo gerador, a eficiência aumentou. Foram obtidos valores até de 25,88%, para uma potência de 22,99 kW, quando se utilizou álcool do posto no grupo gerador 1. Observou-se também que a eficiência para o grupo gerador 1 foi maior quando utilizou-se álcool da fazenda para as cargas utilizadas. No caso do grupo gerador 2, a eficiência foi maior com álcool do posto para potências entre 22,27 kW e 25,99 kW.

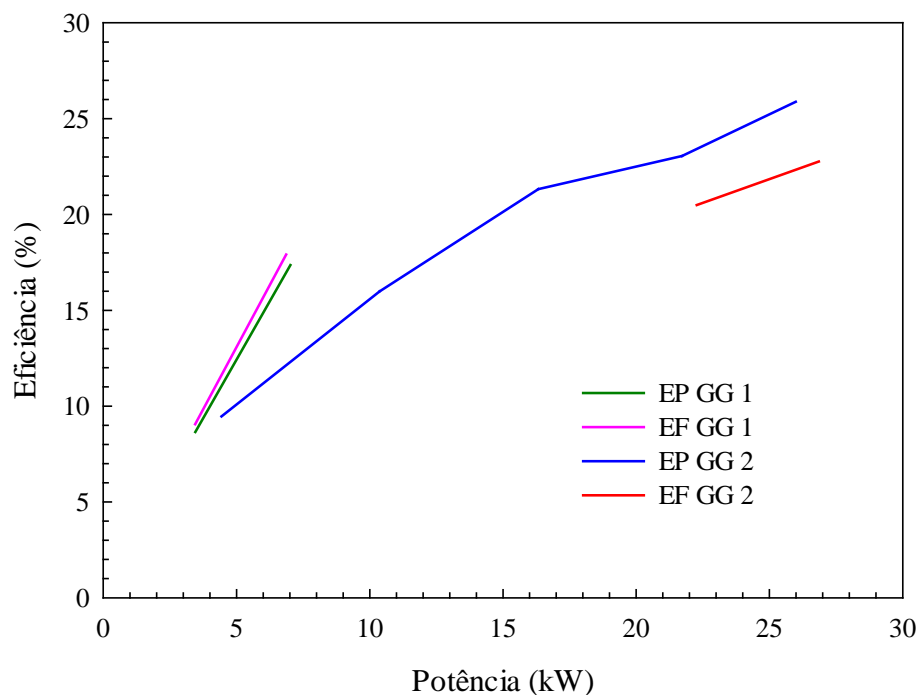


Figura 11. Eficiência do grupo gerador 1 e do grupo gerador 2 (GG 1 e GG 2) utilizando álcool do posto (EP) e álcool da fazenda (EF).

4 CONCLUSÕES

Nas condições em que foram realizados os ensaios e de acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que é viável o uso de álcool combustível produzido na fazenda nos grupos geradores de energia elétrica utilizados.

Houve redução nos valores do consumo específico de combustível com o aumento da potência. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 1 foi um consumo específico de combustível de 0,90 L por kWh para uma carga de 6,86 kW quando utilizou-se álcool combustível da fazenda. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 2 foi um consumo específico de combustível de 0,62 L por kWh para uma carga de 25,99 kW quando utilizou-se álcool combustível do posto de combustível.

Houve aumento nos valores da eficiência com o aumento da potência. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 1 foi uma eficiência de 17,91% para uma carga de 6,86 kW quando utilizou-se álcool combustível da fazenda. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 2 foi uma eficiência de 25,88% para uma carga de 25,99 kW quando utilizou-se álcool combustível do posto de combustível.

REFERÊNCIAS

ANP. Resolução ANP N° 7, de 9/2/2011. Estabelece as especificações do álcool etílico anidro combustível ou etanol anidro combustível e do álcool etílico hidratado combustível ou etanol hidratado combustível, contidas no Regulamento Técnico ANP n° 3/2011. Disponível em:

<http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2011/fevereiro/ranp%207%20-%202011.xml>. Acesso em: 30 jul. 2012.

BNDES - CGEE. **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável/organização BNDES e CGEE. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316 p.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2012 ano base 2011**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 282 f. Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 29 out. 2012.

CIMA. Resolução N° 37/2007. Dispõe sobre a adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina. Disponível em:

<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_resolucoes/resolucoes_cima/2007/rcima%2037%20-%202007.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_resolucoes/resolucoes_cima/2007/rcima%2037%20-%202007.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)>. Acesso em: 30 out. 2012.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; CONSOLI, G. O mapa sucroenergético do Brasil.

In: **Etanol e bioeletricidade**: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética.

Coordenação e organização Eduardo L. Leão de Souza e Isaias de Carvalho Macedo.

São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010.

NIGRO, F.; SZWARC, A. **Veículos Flex**. No resumo de: Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. Coordenação e organização Eduardo L. Leão de Souza e Isaias de Carvalho Macedo. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010a. Disponível em: <http://www.unica.com.br/Downloads/estudosmatrizenergetica/pdf/MATReenerget_FINAL_WEB.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2012.

NIGRO, F.; SZWARC, A. O etanol como combustível. In: **Etanol e bioeletricidade**: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. Coordenação e organização Eduardo L. Leão de Souza e Isaias de Carvalho Macedo. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010b.

CAPÍTULO 3

VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL COMBUSTÍVEL EM MICRODESTILARIAS

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é reconhecido mundialmente por seu pioneirismo na introdução em sua matriz energética de um biocombustível produzido a partir da cana-de-açúcar: o etanol.

Desde a década de 1970, quando foi lançado o Proálcool, o etanol ganhou grande impulso e se tornou, definitivamente, uma fonte importante de energia para o País.

Segundo Leite e Leal (2007), as razões para o interesse pelos biocombustíveis são muitas e variam de um país para outro e também ao longo do tempo, sendo as principais as seguintes:

- Diminuir a dependência externa de petróleo, por razões de segurança de suprimento ou impacto na balança de pagamentos;
- Minimizar os efeitos das emissões veiculares na poluição local, principalmente nas grandes cidades; e
- Controlar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Segundo a *Global Renewable Fuels Alliance*, a produção mundial de bioetanol atingiu 84,5 bilhões de litros em 2011. Os Estados Unidos e o Brasil continuam sendo os maiores produtores de etanol com produção contínua a um ritmo constante em 2012 (GRFA, 2012).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar no ano civil 2011 alcançou 565,8 milhões de toneladas. Este montante foi 9,8% inferior ao registrado no ano civil anterior, quando a moagem foi de 627,3 milhões de toneladas. Em 2011, houve redução de 3,8% na produção nacional de açúcar, com um total de 36,2 milhões de toneladas, além de um decréscimo de 18,1% na fabricação de etanol, produzindo-se o montante de 22.892.504 m³. Cerca de 62% deste total referem-se ao etanol hidratado: 14.217.182 m³. Em termos comparativos, houve queda de 28,7% na produção deste combustível em relação a 2010. No que tange à produção de etanol anidro, que é misturado à gasolina A para formar a gasolina C, registrou-se acréscimo de 7,9%, totalizando 8.675.322 m³ (EPE, 2012).

Conforme a definição indicada no Projeto de Lei do Senado nº 252, de 2011, que cria o Programa de Microdestilarias de Álcool e Biocombustíveis (Promicro), e dá outras providências, entende-se por microdestilaria a unidade com capacidade de produção de até cinco mil litros de álcool ou biocombustíveis por dia (BRASIL, 2011).

A produção de álcool combustível em microdestilarias é uma forma de inclusão dos pequenos agricultores no processo de produção de agroenergia sem prejudicar a produção de alimentos. Ao contrário de concorrer com a produção de alimentos, com a integração de atividades agrícolas, é possível incrementar e dinamizar a produção de alimentos como leite e carne (COSTA; RUTZ; FREITAS, 2007).

Segundo Rambo (2008), nos projetos de microdestilarias podem ser visualizadas algumas formas de inovação. Enquanto inovação social estas práticas caracterizam associações de famílias de agricultores familiares em torno de uma atividade agroindustrial. Como inovações produtivas citam-se o cultivo da cana, bem como a produção do etanol. Dentre as inovações técnicas, pode-se citar a produção de equipamentos para microdestilarias, estruturados para produção, não apenas de etanol, mas dos demais subprodutos da cana-de-açúcar.

Nogueira (2008) mostrou que, no caso da produção de álcool a partir da cana-de-açúcar, existe a possibilidade da produção integrada de energia e alimento, com a produção de álcool combustível, aguardente e leite e/ou carne.

Segundo Ortega, Watanabe e Cavelett (2006), se os benefícios e as despesas socioambientais fossem incluídos no cálculo da rentabilidade dos empreendimentos rurais, a rentabilidade mudaria em favor dos sistemas com melhores características ecológicas e sociais. Até agora, essa inclusão não tem sido efetuada por falta de conhecimento para determinar os valores dos serviços ambientais e das externalidades negativas. A divulgação destes valores pode permitir que a sociedade se auto-organize para apoiar os sistemas verdadeiramente mais econômicos.

No noroeste do Rio Grande do Sul existem vários projetos de microdestilarias e, segundo os atores locais/regionais, o que tem motivado o desenvolvimento de projetos de produção descentralizada de álcool combustível por meio das microdestilarias são os ganhos ambientais e sociais que decorrerem destas propostas, tais como: geração de mais trabalho no meio rural, melhor remuneração das pessoas envolvidas; sistemas de produção mais sustentáveis, que agridam menos o ambiente e que sejam capazes de incrementar a renda das famílias; e a possibilidade de integração das microdestilarias às demais atividades da propriedade, dentro de uma dinâmica com que se possa utilizar

todos os subprodutos (a ponta da cana, o bagaço e o vinhoto), visando alcançar maior autonomia energética e alimentar das propriedades (RAMBO; FILLIPI; LIMA, 2008).

Na produção de álcool combustível em microdestilarias, alguns aspectos são muito importantes para que estas sejam viáveis (AMARAL, 2006): a) estimular iniciativas cooperadas; b) primar pela produção própria de matéria-prima e em áreas próximas ao local de transformação; c) opção por tecnologias de transformação que aliem facilidade de manejo e acessibilidade econômica por parte dos agricultores; d) produção integrada com alimentos, tanto dos derivados da cana (melado, açúcar mascavo, rapadura), quanto no aproveitamento das instalações e equipamentos para produzir outros produtos, como doces e conservas; e e) localização adequada, que permita o uso dos subprodutos gerados nos processos, atendendo a legislação ambiental.

Cachaça é a denominação típica e exclusiva da aguardente de cana produzida no Brasil, com graduação alcoólica de trinta e oito a quarenta e oito por cento em volume, à temperatura de vinte graus Celsius, obtida pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar com características sensoriais peculiares, podendo ser adicionada de açúcares até seis gramas por litro (BRASIL, 2009).

De acordo com Silva (2011), em geral, denomina-se cabeça os 10% iniciais do processo de destilação e cauda os 10% finais, enquanto que a fração coração constitui os 80% intermediários a estas, constituindo a fração da “cachaça de boa qualidade”. Segundo este mesmo autor, de uma tonelada de cana consegue-se extrair, com o uso de pequenos engenhos, 600 L de caldo de cana, o que possibilita a obtenção de 60 L de álcool. Se o álcool for obtido a partir de resíduos de cachaça (cabeça e cauda), 600 L de caldo de cana serão suficientes para produzir 11 L de álcool. Portanto, de uma hectare que produza, em média, 100 t de cana, pode-se produzir 6.000 L de álcool ou 1.100 L de álcool e 11.400 L de cachaça de boa qualidade.

Segundo a União dos Produtores de Bioenergia, o preço de uma tonelada de cana-de-açúcar na esteira no Estado de São Paulo, em novembro de 2012, foi de R\$ 57,89 (UDOP, 2012).

Moreira e Boizio (2012) fizeram um levantamento de custos da produção de cana-de-açúcar. O resultado encontrado foi de R\$ 10.925,00 por hectare para um pequeno produtor de Riberão Preto; para o grande produtor foi de R\$ 3.368,00 por hectare para a região Centro-Sul Tradicional; R\$ 3.479,00 por hectare para a região centro-sul expansão; e R\$ 3.455,00 por hectare para a região nordeste. Portanto, os custos foram bem superiores para o pequeno produtor quando comparado com o grande

produtor. A produtividade obtida pelo grande produtor foi de 82.103 kg ha⁻¹ e a produtividade do produtor independente foi em torno de 83.150 kg ha⁻¹.

Weschenfelder (2011) analisou a viabilidade econômica da produção de bioetanol em microdestilarias. Para isso, projetou uma produção média de 42 L h⁻¹ em operação contínua, permitindo uma produção de até 1000 L dia⁻¹ de etanol combustível, para operação do sistema de destilação 24 h dia⁻¹. Esta unidade utiliza como matéria prima a sacarose de cana-de-açúcar ou sorgo sacarino. De acordo com os resultados, o preço de produção do álcool combustível a partir de cana-de-açúcar como matéria prima foi de R\$ 0,83 por litro e de R\$ 0,92 por litro quando se utilizou sorgo sacarino como matéria prima. Segundo Silva (2007), o custo de produção de álcool em sistema cooperativo é de R\$ 0,65 por litro.

Souza (2010) realizou uma análise econômico-financeira de um projeto de microdestilaria, operando 8 h dia⁻¹ com cana-de-açúcar, durante 200 dias do ano, com uma produção média de 24 L h⁻¹, e um preço de venda do álcool combustível de R\$ 1,70 por litro. O projeto resultou ser viável economicamente com resultados positivos, com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 20% e um Tempo de Recuperação de Capital (TRC) de 3,32 anos.

Rosado, Coelho e Feil (2008) encontraram custos de produção de álcool próximos a R\$ 0,70 por litro, em microdestilarias com capacidade de produção de 35 L h⁻¹.

A microusina de álcool pode ser considerada viável técnica e economicamente, porém ainda é inviável social e politicamente pelo fato de ser desconhecida (ORTEGA; WATANABE; CAVELETT, 2006).

A produção de álcool a partir da cabeça e da cauda inclui o produtor rural de cachaça num mercado diferenciado e fomenta a melhoria da qualidade da cachaça, visto que desestimula a bi-destilação da cauda e da cabeça. O álcool, embora com preços mais baixo do que a cachaça tem muito mais liquidez, visto que é uma *commodity*. Além disso, de evitar que estes resíduos sejam lançados ao solo ou em cursos d'água, chegando a interferir na qualidade da água, na redução de peixes e de toda a atividade biológica. Outro grande diferencial deste modelo de produção do álcool a partir da cauda e da cabeça é que se utiliza a estrutura já existente na propriedade, com pequenas adaptações, não demandando assim investimentos significativos para o empreendedor rural. Decisivo neste contexto as possibilidades de ganho financeiro para o produtor, pré-requisito básico para o desenvolvimento e execução de qualquer projeto de integração e promoção da sustentabilidade no campo.

Neste trabalho, objetivou-se realizar a análise econômica da produção de álcool combustível em microdestilarias, utilizando como matérias-primas o caldo de cana e os resíduos provenientes da produção de cachaça.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Algumas das informações técnicas para as análises propostas foram obtidas no Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Foi analisada a viabilidade econômica de duas opções de produção de álcool combustível em microdestilaria.

- Opção 1: microdestilaria que utiliza como matéria-prima o caldo de cana-de-açúcar, a caldeira funcionando com bagaço de cana, considerando-se uma produção de 60 L de álcool combustível por tonelada de cana-de-açúcar e um rendimento médio de 90 t por ha. O custo da cana foi considerado como R\$ 55,00 por tonelada de cana, o que corresponde ao preço aproximado pago no estado de São Paulo por uma tonelada de cana colocada na usina.
- Opção 2: microdestilaria que utiliza como matéria-prima resíduos de cachaça (cabeça e cauda), a caldeira funcionando com lenha, considerando-se que é possível obter 11 L de álcool combustível a partir dos resíduos de uma tonelada de cana-de-açúcar utilizada na produção de cachaça. Foi suposto que não se contava com os resíduos e que os agricultores levariam os resíduos até a microdestilaria e receberiam o equivalente a 50% da receita proveniente da venda do álcool combustível.

Em ambos os casos considerou-se uma coluna de destilação com capacidade produtiva de 100 L h⁻¹ com sistema em batelada. Foi considerado um turno de trabalho de 8 h, das quais durante 7 h se produz destilado. O tempo restante é para a carga e descarga da coluna e para esquentar a panela da coluna. Cabe destacar que as duas colunas são diferentes. No caso do pré-destilado, este tem 40% de álcool.

As informações gerais utilizadas na análise da viabilidade econômica do projeto de microdestilaria encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações gerais utilizadas para análise da viabilidade econômica

Item	Unidade	Valor
Funcionamento anual	dia · ano ⁻¹	175
Operação diária	h · dia ⁻¹	8
Preço venda álcool	R\$ · L ⁻¹	1,50
Produção diária	L · dia ⁻¹	700
Produção real anual	L · dia ⁻¹	122.500
Produção máxima anual	L · dia ⁻¹	367.500

Na Tabela 2 e 3 observam-se os investimentos e custos utilizados na análise da viabilidade econômica.

Tabela 2 - Investimentos e custos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana

Investimentos			
Item	Unidade	Quantidade	Valor (R\$)
Moenda	ud	1	26.000,00
Esteira	ud	1	3.500,00
Decantador	ud	1	1.000,00
Dorna de diluição	ud	1	1.500,00
Dorna de fermentação	ud	4	7.000,00
Dorna de decantação	ud	1	1.500,00
Destilador	ud	1	30.000,00
Tanque armazenamento	ud	1	2.000,00
Moto bombas	ud	2	1.300,00
Caldeira	ud	1	15.000,00
Galpão	ud	1	13.000,00
Montagem	ud	1	4.000,00
Total			105.800,00
Custos			
Item	Unidade	Quantidade	Valor (R\$)
Mão de obra – trabalhadores	homem	2	13.000,00
Manutenção	----	-----	1.058,00
Energia elétrica	----	-----	700,00
Matéria prima - cana	t	2041,67	112.291,67
Total			127.049,67

Tabela 3 - Investimentos e custos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça

Investimentos			
Item	Unidade	Quantidade	Valor (R\$)
Destilador	ud	1	20.000,00
Moto bombas	ud	2	1.300,00
Caldeira	ud	1	15.000,00
Tanque armazenamento	ud	1	2.000,00
Galpão	ud	1	13.000,00
Montagem	ud	1	4.000,00
Total			55.300,00
Custos			
Item	Unidade	Quantidade	Valor (R\$ ano⁻¹)
Mão de obra – trabalhadores	homem	1	6.500,00
Lenha	m ³	50	4.000,00
Manutenção	-----	-----	553,00
Energia elétrica	-----	-----	700,00
Matéria-prima - resíduos	-----	-----	91875,00
Total			103.628,00

Análise Econômica

Para a análise econômica da produção de álcool combustível numa microdestilaria foi realizado um fluxo de caixa, calculando-se todas as receitas e despesas do projeto. Considerou-se que o projeto não foi financiado e para os cálculos dos indicadores econômicos foi adotada uma taxa de desconto de 12% ao ano e um horizonte de investimento de 10 anos.

No processo de tomada de decisão, por meio do uso dos cenários associados à análise de sensibilidade, buscou-se examinar o impacto que as variações no preço de venda do álcool combustível, na porcentagem do investimento, e a variação na taxa de desconto podem ocasionar no valor presente líquido (VPL), na taxa interna de retorno (TIR), e no tempo de retorno do capital descontado (TRCD).

Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) é um método capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Pode ser expresso pela Equação (1):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I \quad (1)$$

em que:

- VPL = Valor presente líquido, R\$;
- FC_t = Fluxo de caixa no período t, R\$;
- i = Taxa de juros, decimal;
- n = Total de períodos, ano; e
- I = Investimento, R\$.

A taxa de juros, frequentemente chamada de taxa de desconto, custo de oportunidade ou custo de capital, refere-se ao retorno mínimo que deve ser obtido por um projeto.

Quando o VPL é usado para tomar decisões do tipo “aceitar-rejeitar”, adotam-se os seguintes critérios:

- Se $VPL > 0$, o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é maior que o investimento inicial, deve-se aceitar o projeto do empreendimento;
- Se $VPL < 0$, o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é menor que o investimento inicial, deve-se rejeitar o projeto do empreendimento; e
- Se $VPL = 0$, o que indica que o valor atualizado dos recebimentos é igual ao do investimento inicial, a escolha entre aceitar e rejeitar o projeto é indiferente.

Taxa Mínima de Atratividade

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é utilizada como parâmetro de retorno exigido do investimento. A TMA deve ser no mínimo igual à taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes de menor risco do investimento.

Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos líquidos recebidos com o investimento inicial, ou seja, aquela que torna o VPL nulo. Pode ser expressa pela Equação (2):

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - I \quad (2)$$

Dentre vários investimentos, o melhor será aquele que tiver maior TIR. Quando a TIR é usada para tomar decisões do tipo “aceitar-rejeitar”, adotam-se os seguintes critérios:

- Se $TIR > TMA$, o investimento é economicamente atrativo;
- SE $TIR = TMA$, o investimento está economicamente em uma situação de indiferença; e
- Se $TIR < TMA$, o investimento não é economicamente atrativo.

Tempo de Retorno de Capital Descontado

O Tempo de Retorno de Capital Descontado (TRCD) é o período de tempo necessário para que o capital investido seja integralmente recuperado. Para aplicar o método do TRCD é necessário definir o tempo máximo para recuperar o capital investido. No caso do modelo proposto, adotou-se um horizonte de 10 anos para recuperar o capital investido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4 e 5 observam-se os fluxos de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível para as duas opções propostas. No fluxo de caixa podem-se observar as entradas e saídas do projeto. Além disso, foi colocado o fluxo acumulado e acumulado descontado, os quais são utilizados para calcular alguns dos indicadores econômicos verificados. As entradas do projeto correspondem, unicamente, à venda do álcool combustível.

Tabela 4 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 8 h dia⁻¹

Tempo	Entradas	Saídas	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Acumulado	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Acumulado Descontado
(ano)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
0	0,00	105.800,00	-105.800,00	-105.800,00	-105.800,00	-105.800,00
1	183.750,00	127.049,67	56.700,33	-49.099,67	50.625,30	-55.174,70
2	183.750,00	127.049,67	56.700,33	7.600,67	45.201,16	-9.973,54
3	183.750,00	127.049,67	56.700,33	64.301,00	40.358,18	30.384,63
4	183.750,00	127.049,67	56.700,33	121.001,33	36.034,09	66.418,72
5	183.750,00	127.049,67	56.700,33	177.701,67	32.173,29	98.592,01
6	183.750,00	127.049,67	56.700,33	234.402,00	28.726,15	127.318,17
7	183.750,00	127.049,67	56.700,33	291.102,33	25.648,35	152.966,52
8	183.750,00	127.049,67	56.700,33	347.802,67	22.900,31	175.866,83
9	183.750,00	127.049,67	56.700,33	404.503,00	20.446,71	196.313,54
10	183.750,00	127.049,67	56.700,33	461.203,33	18.255,99	214.569,53
Total	1.837.500,00	1.376.296,67	461.203,33	1.954.718,33	214.569,53	891.481,70

Tabela 5 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 8 h dia⁻¹

Tempo	Entradas	Saídas	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Acumulado	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Acumulado Descontado
(ano)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
0	0,00	55.300,00	-55.300,00	-55.300,00	-55.300,00	-55.300,00
1	183.750,00	103.628,00	80.122,00	24.822,00	71.537,50	16.237,50
2	183.750,00	103.628,00	80.122,00	104.944,00	63.872,77	80.110,27
3	183.750,00	103.628,00	80.122,00	185.066,00	57.029,26	137.139,52
4	183.750,00	103.628,00	80.122,00	265.188,00	50.918,98	188.058,50
5	183.750,00	103.628,00	80.122,00	345.310,00	45.463,37	233.521,88
6	183.750,00	103.628,00	80.122,00	425.432,00	40.592,30	274.114,18
7	183.750,00	103.628,00	80.122,00	505.554,00	36.243,12	310.357,30
8	183.750,00	103.628,00	80.122,00	585.676,00	32.359,93	342.717,23
9	183.750,00	103.628,00	80.122,00	665.798,00	28.892,80	371.610,03
10	183.750,00	103.628,00	80.122,00	745.920,00	25.797,14	397.407,17
Total	1.837.500,00	1.091.580,00	745.920,00	3.798.410,00	397.407,17	2.295.973,59

Com base nas Tabelas 4 e 5, foram determinados os indicadores econômicos do projeto (ver Tabelas 6 e 7). Verificou-se que ambas as opções resultaram viáveis economicamente. Cabe destacar que a microdestilaria funciona durante 175 dias ao ano, pelo que o sistema permanece muito tempo ocioso e que foi considerado um tempo de produção de 8 h dia⁻¹.

Tabela 6 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 8 h dia⁻¹

Indicador	Valor
Valor Presente Líquido - VPL (R\$)	214.569,53
Taxa Interna Retorno - TIR (%)	52,82
Tempo de Retorno do Capital Descontado – TRCD (ano)	2,25

Tabela 7 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 8 h dia⁻¹

Indicador	Valor
Valor Presente Líquido - VPL (R\$)	397.407,17
Taxa Interna Retorno - TIR (%)	144,87
Tempo de Retorno do Capital Descontado – TRCD (ano)	0,77

Analisou-se a participação de cada atividade no custo final de produção do álcool combustível para as duas opções analisadas e obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Indicadores de participação de cada atividade no custo final de produção do álcool combustível para as duas opções analisadas

Opção 1		Opção 2	
Item	Indicadores	Item	Indicadores
Matéria-prima	77,03%	Matéria-prima	81,01%
Investimento	12,85%	Investimento	8,63%
Mão-de-obra	8,92%	Mão-de-obra	5,73%
-----	-----	Lenha	3,53%
Manutenção	0,73%	Manutenção	0,49%
Energia elétrica	0,48%	Energia elétrica	0,62%

Para a opção 1, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 1,19 por litro. O custo da matéria-prima foi considerado como sendo R\$ 55,00 por tonelada, mas se este custo diminuísse em 50%, o custo de produção do álcool combustível diminuiria para R\$ 0,73 por litro.

Para a opção 2, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,93 por litro. O custo da matéria-prima foi considerado como sendo 50% do total das entradas no projeto em relação à venda do álcool combustível, mas se o custo dos resíduos da cachaça não fosse considerado, o custo de produção do álcool combustível diminuiria para R\$ 0,18 por litro. Esta opção é muito atrativa e viável para o produtor rural que têm produção de cachaça, pelo fato de poder incorporar ao processo a produção de álcool combustível mediante a utilização dos resíduos da cachaça. Assim, evita a poluição do meio ambiente, o solo e os cursos d'água, e têm a possibilidade de usar um combustível ecologicamente correto nas aplicações existentes. Além disso, em lugares isolados, sem energia elétrica, poderia usar este combustível para gerar sua própria energia elétrica.

Neste trabalho, por estar sendo utilizado apenas um terço da capacidade da microdestilaria, decidiu-se calcular os indicadores econômicos considerando uma produção de 16 h dia⁻¹, ou seja, dois turnos de trabalho. Neste caso, o investimento inicial foi o mesmo, mas os custos de operação dobraram. Nas Tabelas 9 e 10 observam-se os fluxos de caixa para as 16 h dia⁻¹ de operação.

Tabela 9 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 16 h dia⁻¹

Tempo	Entradas	Saídas	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Acumulado	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Acumulado Descontado
(ano)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
0	0,00	105.800,00	-105.800,00	-105.800,00	-105.800,00	-105.800,00
1	367.500,00	253.041,33	114.458,67	8.658,67	102.195,24	-3.604,76
2	367.500,00	253.041,33	114.458,67	123.117,33	91.245,75	87.640,99
3	367.500,00	253.041,33	114.458,67	237.576,00	81.469,42	169.110,40
4	367.500,00	253.041,33	114.458,67	352.034,67	72.740,55	241.850,96
5	367.500,00	253.041,33	114.458,67	466.493,33	64.946,92	306.797,88
6	367.500,00	253.041,33	114.458,67	580.952,00	57.988,32	364.786,20
7	367.500,00	253.041,33	114.458,67	695.410,67	51.775,29	416.561,49
8	367.500,00	253.041,33	114.458,67	809.869,33	46.227,94	462.789,42
9	367.500,00	253.041,33	114.458,67	924.328,00	41.274,94	504.064,37
10	367.500,00	253.041,33	114.458,67	1.038.786,67	36.852,63	540.916,99
Total	3.675.000,00	2.636.213,33	1.038.786,67	5.131.426,67	540.916,99	2.985.113,94

Tabela 10 - Fluxo de caixa do projeto de microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 16 h dia⁻¹

Tempo	Entradas	Saídas	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Acumulado	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Acumulado Descontado
(ano)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
0	0,00	55.300,00	-55.300,00	-55.300,00	-55.300,00	-55.300,00
1	367.500,00	206.703,00	160.797,00	105.497,00	143.568,75	88.268,75
2	367.500,00	206.703,00	160.797,00	266.294,00	128.186,38	216.455,13
3	367.500,00	206.703,00	160.797,00	427.091,00	114.452,13	330.907,26
4	367.500,00	206.703,00	160.797,00	587.888,00	102.189,40	433.096,66
5	367.500,00	206.703,00	160.797,00	748.685,00	91.240,54	524.337,20
6	367.500,00	206.703,00	160.797,00	909.482,00	81.464,76	605.801,96
7	367.500,00	206.703,00	160.797,00	1.070.279,00	72.736,40	678.538,36
8	367.500,00	206.703,00	160.797,00	1.231.076,00	64.943,21	743.481,57
9	367.500,00	206.703,00	160.797,00	1.391.873,00	57.985,01	801.466,58
10	367.500,00	206.703,00	160.797,00	1.552.670,00	51.772,33	853.238,91
Tota	3.675.000,00	2.122.330,00	1.552.670,00	8.235.535,00	853.238,91	5.220.292,40

Com base nos dados contidos nas Tabelas 9 e 10, foram determinados os indicadores econômicos do projeto (ver Tabelas 11 e 12). Neste caso, as duas opções estudadas são viáveis economicamente. Na opção 1, comparando com a condição anterior 8 h dia⁻¹, a TIR aumentou de 52,82% para 108,11% e o tempo de retorno de capital descontado (TRCD) diminuiu de 2,25 para 1,04 anos. Na opção 2, a TIR aumentou de 144,87% para 290,77% e o TRCD diminuiu de 0,77 para 0,39 ano. Portanto, constata-se que, economicamente, é melhor a microdestilaria operar durante 16 h dia⁻¹.

Tabela 11 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana com produção de 16 h dia⁻¹

Indicador	Valor
Valor Presente Líquido - VPL (R\$)	540.916,99
Taxa Interna Retorno - TIR (%)	108,11
Tempo de Retorno do Capital Descontado – TRCD (ano)	1,04

Tabela 12 - Indicadores econômicos do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça com produção de 16 h dia⁻¹

Indicador	Valor
Valor Presente Líquido - VPL (R\$)	853.238,91
Taxa Interna Retorno - TIR (%)	290,77
Tempo de Retorno do Capital Descontado – TRCD (ano)	0,39

Analisou-se a participação de cada atividade no custo final de produção do álcool combustível para este caso e os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Indicadores de participação de cada atividade no custo final de produção do álcool combustível para as duas opções analisadas

Opção 1		Opção 2	
Item	Indicadores	Item	Indicadores
Matéria-prima	82,64%	Matéria-prima	84,88%
Investimento	6,89%	Investimento	4,52%
Mão-de-obra	9,57%	Mão-de-obra	6,00%
-----	-----	Lenha	3,70%
Manutenção	0,39%	Manutenção	0,26%
Energia elétrica	0,52%	Energia elétrica	0,65%

Para a opção 1, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 1,11 por litro. O custo da matéria-prima foi considerado como sendo R\$ 55,00 por tonelada, mas se este custo diminuísse em 50%, o custo de produção do álcool combustível diminuiria para R\$ 0,65 por litro.

Para a opção 2, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,88 por litro. O custo da matéria-prima foi considerado como sendo 50% do total das entradas no projeto em relação à venda do álcool combustível, mas se o custo dos resíduos da cachaça não fosse considerado, o custo de produção do álcool combustível diminuiria para R\$ 0,13 por litro.

Realizou-se uma análise de sensibilidade para ver como se comportavam os indicadores econômicos. Para isto, variou-se a taxa de desconto, o preço de venda do álcool e a porcentagem de investimento inicial, cujos resultados encontram-se nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Análise de sensibilidade do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima o caldo de cana – opção 1

Variação no preço de venda do álcool combustível						
Preço do Álcool (R\$·L⁻¹)	Produção de 8 h dia⁻¹			Produção de 16 h dia⁻¹		
	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)
0,50	-477.582,79	-	-	-843.387,65	-	-
0,75	-304.544,71	-	-	-497.311,49	-	-
1,00	-131.506,63	-	-	-151.235,33	-	-
1,25	41.531,45	20,97	5,89	194.840,83	49,38	2,42
1,50	214.569,53	52,82	2,25	540.916,99	108,11	1,04
1,75	387.607,61	82,33	1,40	886.993,15	166,07	0,67
2,00	560.645,69	111,42	1,01	1.233.069,32	223,97	0,50

Variação na porcentagem de investimento do projeto						
Investimento (%)	Produção de 8 h dia⁻¹			Produção de 16 h dia⁻¹		
	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)
50,00	270.458,50	108,11	1,04	596.805,96	217,37	0,52
75,00	242.514,01	71,46	1,63	568.861,48	144,56	0,77
100,00	214.569,53	52,82	2,25	540.916,99	108,11	1,04
125,00	186.625,05	41,33	2,92	512.972,51	86,17	1,33
150,00	158.680,56	33,41	3,67	485.028,03	71,46	1,63

Variação na taxa de desconto do projeto						
Taxa de Desconto (%)	Produção de 8 h dia⁻¹			Produção de 16 h dia⁻¹		
	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)
0,00	461.203,33		1,87	1.038.786,67		0,92
3,00	377.865,34		1,95	870.555,64		0,95
6,00	311.519,39		2,04	736.625,75		0,98
9,00	258.083,33	52,82	2,14	628.756,54	108,11	1,01
12,00	214.569,53		2,25	540.916,99		1,04
15,00	178.765,85		2,37	468.641,57		1,07

Tabela 15 - Análise de sensibilidade do projeto da microdestilaria de álcool combustível que utiliza como matéria-prima os resíduos da cachaça – opção 2

Variação no preço de venda do álcool combustível						
Preço do Álcool (R\$·L ⁻¹)	Produção de 8 h dia ⁻¹			Produção de 16 h dia ⁻¹		
	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)
0,50	51.331,01	32,00	3,83	161.086,59	68,89	1,69
0,75	137.850,05	61,30	1,91	334.124,67	124,59	0,90
1,00	224.369,09	89,36	1,28	507.162,75	180,01	0,62
1,25	310.888,13	117,50	0,96	680.200,83	235,39	0,48
1,50	397.407,17	114,87	0,77	853.238,91	290,77	0,39
1,75	483.926,21	172,57	0,65	1.026.276,99	346,15	0,32
2,00	570.445,25	200,26	0,56	1.199.315,07	401,53	0,28

Variação na porcentagem de investimento do projeto						
Investimento (%)	Produção de 8 h dia ⁻¹			Produção de 16 h dia ⁻¹		
	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)
50,00	426.619,46	290,77	0,39	882.451,20	582,54	0,19
75,00	412.013,31	193,51	0,58	867.845,06	388,03	0,29
100,00	397.407,17	144,87	0,77	853.238,91	290,77	0,39
125,00	382.801,03	115,66	0,97	838.632,77	232,42	0,48
150,00	368.194,88	96,14	1,18	824.026,63	193,51	0,58

Variação na taxa de desconto do projeto						
Taxa de Desconto (%)	Produção de 8 h dia ⁻¹			Produção de 16 h dia ⁻¹		
	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)	VPL (R\$)	TIR (%)	TRCD (ano)
0,00	745.920,00		0,69	1.552.670,00		0,34
3,00	628.156,91		0,71	1.316.331,03		0,35
6,00	534.404,89		0,73	1.128.179,92		0,36
9,00	458.895,57	144,87	0,75	976.640,11	290,77	0,37
12,00	397.407,17		0,77	853.238,91		0,39
15,00	346.813,78		0,79	751.702,94		0,40

Analisando-se os dados da Tabela 14 para a opção 1 (caldo de cana), com a microdestilaria funcionando durante 8 h dia⁻¹, conclui-se que o projeto torna-se viável economicamente a partir das seguintes condições:

- Quando o preço de venda do álcool for R\$ 1,25 por litro, para o qual é possível obter uma TIR de 20,97%, um TRC de 5,89 anos e um VPL de R\$ 41.531,45;
- Para qualquer variação de investimento inicial proposta, obtendo uma TIR de 33,41%, TRC de 3,67 anos e um VPL de R\$ 158.680,56, para um investimento de 150% do investimento inicial; e

- Para qualquer variação na taxa de desconto, obtendo uma TIR de 52,82%, um TRC de 2,37 anos e um VPL de R\$ 178.765,85, para uma taxa de desconto de 15%.

Com a microdestilaria funcionando durante 16 h · dia⁻¹, conclui-se que o projeto torna-se viável economicamente a partir das seguintes condições:

- Quando o preço de venda do álcool for R\$ 1,25 por litro, para o qual é possível obter uma TIR de 49,38%, um TRC de 2,42 anos e um VPL de R\$ 194.840,83;
- Para qualquer variação de investimento inicial proposta, obtendo uma TIR de 71,46%, TRC de 1,63 anos e um VPL de R\$ 485.028,03, para um investimento de 150% do investimento inicial; e
- Para qualquer variação na taxa de desconto, obtendo uma TIR de 108,11%, um TRC de 1,07 anos e um VPL de R\$ 468.641,57, para uma taxa de desconto de 15%.

Analisando-se os dados da Tabela 15, para a opção 2 (resíduos da cachaça), tanto para a microdestilaria funcionando durante 8 h dia⁻¹ quanto 16 h dia⁻¹, conclui-se que o projeto é viável economicamente para todas as variações propostas.

A produção de álcool em microdestilaria resulta numa boa opção econômica para os agricultores que têm à disposição deles cana-de-açúcar e resíduos de cachaça e é possível melhorar ainda mais os indicadores econômicos, levando-se em consideração que, às vezes, o agricultor conta com parte de investimento inicial e que os custos de produção da cana-de-açúcar seriam mais baixos. Além disso, também seria possível armazenar os resíduos de cachaça e aproveitar a microdestilaria o ano todo.

4 CONCLUSÕES

O projeto de microdestilaria foi viável economicamente para os dois tempos de operação propostos. Os parâmetros financeiros melhoraram quando utilizados como matéria-prima dos resíduos de cachaça.

Considerando R\$ 55,00 por tonelada de cana, quando se utilizou o caldo de cana como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 1,19 por litro, quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹, e de R\$ 1,11 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

Considerando R\$ 27,50 por tonelada de cana, quando se utilizou o caldo de cana como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,73 por litro, quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹, e de R\$ 0,65 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

Considerando o custo dos resíduos da cachaça como sendo 50% do total das entradas no projeto em relação à venda do álcool combustível (R\$ 0,75 por L produzido de álcool combustível), quando se utilizou o resíduo da cachaça como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,93 por litro quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹ e de R\$ 0,88 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

Considerando que o produtor de cachaça tem a sua disposição os resíduos de cabeça e cauda, quando se utilizou o resíduo da cachaça como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,18 por litro quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹ e de R\$ 0,13 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, V. R. Coopercana: um símbolo de persistência e esperança. In: MORENO, C.; ORTIZ, L. **Construindo a Soberania Energética e Alimentar**. Experiências autônomas de produção de combustíveis renováveis da agricultura familiar e de enfrentamento do agronegócio da energia. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra/Brasil. Disponível em: <<http://www.natbrasil.org.br/Docs/publicacoes/cartilhaabaixa.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2012.
- BRASIL. Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009. Regulamenta a Lei no 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/231844/decreto-6871-09#art2>>. Acesso em: 11 out. 2012.
- BRASIL. Projeto de Lei do Senado nº 252, de 2011. **Cria o Programa de Microdestilarias de Álcool e Biocombustíveis – Promicro e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/ordemdodia/arquivos/avulso/2011/PLS201100252_01.pdf>. Acesso em: 11 out. 2012.
- COSTA, J. B.; RUTZ, S.; FREITAS, L. N. de. **Produção de álcool combustível em micro destilarias**. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/livro/Agroenergia_2007/Agroener/trabalhos/Comunicado_2_OK/basso_1.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2012 ano base 2011**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 282 f. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 29 out. 2012.
- GRFA. **Global Ethanol Production to Reach 85.2 Billion Litres in 2012**. Disponível em: <http://www.globalrfa.com/pr_062612.php>. Acesso em: 10 out. 2012.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos estudos - CEBRAP**, São Paulo, n. 78, July 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 nov. 2012.

MOREIRA, M. G; BOIZIO, R. C. **Análise comparativa dos custos de cana-de-açúcar: produção independente x usina de açúcar e álcool**. Custos e @gronegocio online, v. 8, n. 2, abr./jum. 2012. Disponível em: <<http://www.custoseagronegocioonline.com.br>>. Acesso em: 10 nov. 2012.

NOGUEIRA, R. M. **Análise Técnica e Econômica da Produção Sustentável de Álcool Combustível, Aguardente e Leite, a partir da Cana-de-Açúcar**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

ORTEGA, E.; WATANABE, O.; CAVELETT, O. **A produção de etanol em micro e mini-destilarias**. 2006. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/mini-usina-Ortega_000fxf2i83n02wyiv80soht9hu9eu0yp.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2012.

RAMBO, A. G. **A produção de bio-energia por agricultores familiares – o projeto de microdestilarias de etanol nos Coredes fronteira noroeste e Missões – RS**. 2008. Estudos de caso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/pgdr/ipode/estudos_de_caso/bioenergia/a_producao.pdf> Acesso em: 07 mar. 2012.

RAMBO, A. G.; FILLIPI, E. E.; LIMA, S. K. Desenvolvimento territorial: programa nacional de produção e uso do biodiesel x projeto microdestilarias. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. **Anais...** 46., 2008, Rio Branco, Acre. 18 f. Disponível em: <<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/108598/2/265.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2012.

ROSADO, J.; COELHO, H. M.; FEIL, N. F. **Análise da viabilidade econômica da produção de bio-etanol em microdestilarias**. Estudo de viabilidade técnico-econômica independente. 2008. 33 f. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/guest5b121/microdistillery-feasibility-study-brazil>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

SILVA, J. S. **Produção de álcool na fazenda e em sistema cooperativo**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2007. 168 f.

SILVA, J. S. **Produção de álcool na fazenda: equipamentos, sistemas de produção e usos**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2011. 390 f.

SOUZA, A. M. **Sustentabilidade e viabilidade econômica de um projeto de microdestilaria de álcool combustível em um grupo de agricultores do assentamento gleba XV de novembro**. 2010. 116 f. Dissertação – UNICAMP, Campinas, SP, 2010.

UDOP. **Valores de ATR e Preço da Tonelada de Cana-de-açúcar**. Disponível em: <http://www.udop.com.br/cana/tabela_consecana_saopaulo.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2012.

WESCHENFELDER, S. C. **Aplicação do custeio baseado em atividades na determinação do custo de produção de etanol a partir do sorgo sacarino em pequena unidade de produção**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Santa Maria, RS, 2011.

CAPÍTULO 4
ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO ÁLCOOL COMBUSTÍVEL

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da agricultura sempre esteve associado à capacidade do homem em produzir energia para trabalhar a terra. O aumento da produtividade e a qualidade dos alimentos devem-se às pesquisas agropecuárias e às tecnologias avançadas empregadas nas operações de plantio, colheita, pré-processamento, armazenamento e transporte.

No Brasil, o acesso à eletricidade nas zonas rurais tem aumentado durante os últimos anos. Segundo IBGE (2012), em 2010, 56,59 milhões de um total de 57,32 milhões de residências permanentes estavam ligadas à rede de energia elétrica. Isto representa uma taxa de eletrificação de 98,73%. Dos restantes, ou seja, 1,27% das residências que não possuem eletricidade, 1,04% são residências de zonas rurais. As regiões com a mais baixa taxa de eletrificação são a Norte e a Nordeste, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 - Residências sem energia elétrica nas diferentes regiões do Brasil

Regiões	Urbana		Rural		Total	
	Número de Residências	Percentual de Residências %	Número de Residências	Percentual de Residências (%)	Número Total de Residências	Percentual Total (%)
Norte	19128	0,48	232088	5,84	251216	6,32
Nordeste	61911	0,41	277207	1,86	339118	2,27
Sudeste	28992	0,12	37308	0,15	66300	0,26
Sul	15543	0,17	16453	0,19	31996	0,36
Centro-Oeste	7663	0,18	32379	0,75	40042	0,92
Brasil	133237	0,23	595435	1,04	728672	1,27

Fonte: IBGE, 2012.

Em muitas localidades, a ausência de energia elétrica é o principal entrave ao desenvolvimento microrregional, fazendo com que milhões de brasileiros vivam com altos níveis de pobreza. O programa do governo federal Luz para Todos trouxe importantes contribuições para a melhoria da qualidade de vida de muitos brasileiros. Porém, este programa não contempla o fornecimento de energia com potência elétrica suficiente para permitir que o desenvolvimento regional possa ser contabilizado

monetariamente pelos economistas. O programa Luz para Todos visa à universalização do uso da energia elétrica a todas as moradias rurais do Brasil, com pontos de luz e tomadas. A localização remota e isolada das comunidades atendidas por este programa, a baixa densidade demográfica e o baixo poder aquisitivo destas oneram os custos das redes de energia elétrica e desestimulam investimentos em eletrificação rural pelo setor elétrico. Apesar do mérito deste programa, é preciso dar ao homem do campo condições para trabalhar a terra e promover o desenvolvimento sustentável local com geração de emprego e renda.

A necessidade da eletrificação rural não é questionada e a polêmica gira em torno da forma como a eletrificação é feita. A grande questão é comparar os custos de fornecimento por meio de rede de distribuição com os custos de outras opções de geração de suprimento de energia elétrica.

Os sistemas energéticos convencionais, caracterizados pela centralização da produção e da distribuição, nem sempre se apresentam como a melhor opção para atender a área rural. Basicamente, isto se deve ao alto nível de dispersão dessas áreas e à baixa demanda por energia, tendo em vista que as atividades econômicas dessas populações, em geral, são muito reduzidas, assim como o consumo de energéticos. Outros fatores, como a dificuldade de acesso às propriedades, o tamanho das propriedades e a baixa renda familiar também contribuem para a inviabilidade técnico-econômica da extensão da rede de energia elétrica para certas áreas.

Dessa forma, o custo da geração de energia elétrica para o setor rural é elevado, pois, na maioria das vezes, a sua transmissão e distribuição acabam se tornando mais dispendiosas do que a própria geração. Sendo assim, outras opções devem ser consideradas, como a geração descentralizada utilizando recursos energéticos renováveis que ofereçam vantagens com uma relação menos degradante com o meio ambiente e a utilização de materiais e mão de obra disponíveis no local.

Sistemas integrados de produção de alimentos e energia podem reverter este quadro e recompor e fortalecer a agricultura familiar. A produção e utilização de energia no próprio local eliminam os custos com linhas de transmissão e sua manutenção. Inoue (2008) relata que a geração de energia elétrica por motores a diesel se agrava ainda mais em locais que têm custo de transporte do combustível elevado, devido às condições precárias das estradas no período de chuvas ou quando o nível dos rios baixa no período da seca.

A geração descentralizada constitui uma situação nova para as concessionárias acostumadas com o sistema convencional de geração, transmissão e distribuição de

energia elétrica. Nesta modalidade, o custo de atendimento e as tarifas de manutenção não podem ser praticados nos valores habituais, o que pode incorrer em novos custos administrativos e operacionais para a empresa (DI LASCIO; BARRETO, 2009). Os autoprodutores de energia poderiam assumir essa tarefa. A geração de energia por parte dos autoprodutores em 2011 apresentou crescimento de 5,5% com relação ao ano anterior, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas (EPE, 2012). Este valor só não foi maior por falta de incentivo, divulgação e flexibilização da legislação para outras fontes de energia renováveis, como a proveniente do etanol.

Fernandes (2000) avaliou técnica e economicamente a gaseificação de capim-elefante para eletrificação rural. Para isso, utilizou um gaseificador de leito fluidizado com uma taxa de 100 kg h^{-1} , o qual foi acoplado a um gerador. O grupo gerador trabalhou de maneira híbrida misturando 70% de gás de biomassa e 30% de diesel. O estudo mostrou valores para o custo de eletricidade produzida entre R\$ 0,165 e R\$ 0,225 por kWh, os quais indicaram a viabilidade do projeto como uma opção para eletrificação rural.

Pedreira et al. (2006) buscaram identificar os parâmetros que influenciam na determinação do custo da energia gerada pela Cooperativa de Agroenergia, produzida por meio do processo de gaseificação utilizando biomassa (caroço do açaí) em comunidades ribeirinhas, estabelecendo qual o preço mínimo de suprimento de energia à Concessionária local, de forma a manter o equilíbrio econômico-financeiro da Cooperativa. Para tal, foram simulados custos para vários fatores de carga, com ou sem subsídios. O sistema de geração teve uma capacidade instalada de 80 kW. A quantidade necessária do insumo energético correspondeu a 72 kg da biomassa seca responsável pela geração de 75 kWh de eletricidade. Os resultados gerados indicam que o arranjo mais viável economicamente para a Cooperativa de Agroenergia seria a modalidade de Produtor Independente de energia subsidiado com a conta consumo de combustível (CCC), pois a geração pode operar com fatores de carga na ordem de 0,35 para que o custo final da energia esteja compatível ao comercializado no mercado.

Freitas et al. (2006), no estudo do projeto NERAM, realizaram a análise preliminar do custo de geração de energia elétrica por meio do sistema de gaseificação do caroço de açaí. O resultado da análise de viabilidade econômica mostrou que esse custo é de R\$ 0,23 por kWh (considerando a sub-rogação da CCC), o que representa quase um terço do custo de geração de energia a partir de uma planta a diesel.

Segundo Souza, Pereira e Pavan (2004), o custo de produção da energia elétrica com aproveitamento do biogás é composto do capital investido na construção e

manutenção do biodigestor e sistema motor/gerador, sendo que o biodigestor representa cerca de R\$ 200,00 por suíno e o conjunto motor gerador R\$ 440,00 por kW. Para a instalação de um conjunto motor gerador de 40 kW seriam necessários 258 suínos (matrizes) para uma produção de $200 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de biogás, operando durante 10 horas por dia. Caso a operação da planta fosse somente durante o horário de ponta (4 horas), a fim de aliviar o sistema, seriam necessários 103 suínos (matrizes). O conjunto motor gerador pode ser utilizado no horário de ponta com um custo do biogás de R\$ 190,00 por MWh, utilizando biogás a um custo de R\$ 0,21 por m^3 . Tomando como base 10 horas diárias, o custo obtido foi de R\$ 130,00 por MWh.

Coelho (2004) trabalhou com um grupo gerador de 115 kW, funcionando com óleo de dendê e gerou energia elétrica durante 6 horas diárias a um custo de R\$ 0,38 por kWh. Inoue (2008), utilizando óleo diesel em um grupo gerador a diesel com potência de 6 kVA, obteve um custo de R\$ 1,29 por kWh, muito superior aos praticados pela Companhia energética de Minas Gerais - CEMIG.

Soares, Vieira e Nascimento (2000) usaram um moto-gerador a diesel com um custo de investimento de US\$ 250,00 (duzentos e cinquenta dólares) por kW instalado e encontraram que o óleo de dendê pode ser competitivo com o diesel se o gerador tiver potência relativamente alta e se existir uma diferença de preço substancial em favor do óleo de dendê. Para uma potência de 100 kW obtiveram custos de R\$ 0,38 por kWh para o óleo diesel, e R\$ 0,31 por kWh para o óleo de dendê. Por outro lado, esta situação, na prática, tende a ser restrita, uma vez que os geradores utilizados em localidades isoladas são de pequeno porte, por volta de 40 kW ou menor. Para ampliar as oportunidades de utilização do óleo de dendê como combustível, é necessário diminuir a frequência e os custos de manutenção do motor associados à operação com o dendê.

Silva (2012) utilizou um gerador trifásico a diesel de 12,5 kVA e concluiu que o preço do kWh foi de R\$ 1,12.

Segundo Silva (2007), o custo de produção de álcool em sistema cooperativo é de R\$ 0,65 por litro. Rosado, Coelho e Feil (2008) encontraram custos de produção de álcool de, aproximadamente, R\$ 0,70 por litro em microdestilarias com capacidade de produção de 35 L h^{-1} .

O tempo de vida útil de um grupo gerador de energia elétrica se expressa em horas de funcionamento e depende muito da potência. Para grupos pequenos têm-se valores de 10.000 horas, situando-se em 25.000 para grupos maiores da ordem de 25 kVA (AMADOR, 2000). Segundo Krill (2012), a vida útil da maioria dos grupos

geradores encontrados no mercado é de, aproximadamente, 20.000 horas de funcionamento. Este valor pode variar em função da manutenção, revisões e qualidade dos materiais empregados.

Segundo Amador (2000), uma vez cumprido o número de horas de funcionamento, restam várias possibilidades: substituir todo o grupo, substituir o motor ou recondicionar o motor. O custo do recondicionamento do motor pode ser expresso como um percentual do custo de investimento inicial do grupo gerador, estando entre 10 e 25% deste valor. Sendo assim, é mais econômico recondicionar o motor.

Localidades remotas ou isoladas, com exclusão elétrica, mas com potencial agrícola, assim como assentamentos de colonos podem, juntamente com prefeituras, sindicatos, SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas), empresas de energia e universidades, transformarem-se em pequenos núcleos produtivos capazes de abastecerem mercados locais e promoverem o desenvolvimento microrregional a partir da energia produzida no próprio local por meio de culturas energéticas como a cana-de-açúcar. Se for considerado que a geração de energia localizada dispensa as linhas de transmissão, que têm custos elevados, e sua manutenção, fica ainda mais evidente a vantagem da geração descentralizada.

Nas referências estudadas não foi encontrada alguma que relatasse o uso de álcool combustível para produzir energia elétrica. Nesse sentido, objetiva-se realizar uma análise econômica dos custos de produção de energia elétrica utilizando-se dois grupos geradores de energia elétrica a etanol, sendo um monofásico e outro trifásico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes componentes:

- **Grupo Gerador 1 (GG 1):** um gerador monofásico a etanol de 10 kVA/220V, sendo este constituído de um motor de combustão a gasolina de quatro tempos, de dois cilindros em V, modificado para operar com etanol, associado a um gerador da marca BRANCO, modelo B4T-10.000. Foi considerado um consumo específico de combustível de 0,9 L por kWh.
- **Grupo Gerador 2 (GG 2):** um gerador trifásico a etanol de 42 kVA/220V, sendo este constituído de um motor de combustão à gasolina, de seis cilindros, do mesmo tipo utilizado em uma caminhonete FORD F1000,

modificado para operar com etanol, associado a um gerador da marca WEG, modelo GTA162AIVD, com os terminais de saída conectados na configuração estrela, provido de sistemas de excitação de campo e controle de velocidade automáticos. Foi considerado um consumo específico de combustível de 0,7 L por kWh.

- Álcool combustível produzido na fazenda. Neste estudo foi adotado o preço do álcool combustível de R\$ 0,70 por litro.

A Figura 1 mostra uma fotografia dos dois grupos geradores utilizados neste trabalho.



(a)



(b)

Figura 1 - Grupos geradores: (a) Grupo gerador a álcool de 10 kVA; (b) Grupo gerador a álcool de 42 kVA.

Neste estudo, foi considerado um tempo de funcionamento diário de 4 e 8 horas, e uma vida útil de, aproximadamente, 5 e 10 anos, para o GG 1 e para o GG 2 respectivamente. Considerando um tempo de amortização de 10 anos para o GG 1 e de 20 anos para o GG 2, é necessário recondicionar cada motor uma vez.

Para a análise econômica de geração de eletricidade, utilizando álcool combustível produzido na fazenda, foi, primeiramente, realizado um levantamento dos custos envolvidos na implantação e operação do sistema de geração de energia elétrica do projeto.

Foram analisados dois casos, conforme descrito a seguir, e cujos parâmetros utilizados na análise econômica são apresentados na Tabela 2.

1. Substituição de todo o grupo gerador para ter mais possibilidades de aceder a melhoras tecnológicas, considerando-se um valor residual de 25% do investimento no grupo gerador.
2. Recondicionamento do motor de cada grupo gerador uma vez, neste caso ao final da sua vida útil, não considerando um valor residual. Considerou-se um valor de recondicionamento de 25% do investimento no grupo gerador.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na análise econômica

Investimento			
Item	Unidade	GG 1 (10 kVA)	GG 2 (42 kVA)
Grupo gerador	R\$	13.000,00	21.550,00
Infra-estrutura	R\$	0,00	10.000,00
Manutenção e Operação	R\$ ano ⁻¹	650,00	10.078,00
Tempo de funcionamento	h dia ⁻¹	4	8
Energia elétrica gerada	kWh ano ⁻¹	10.220	78.840
Taxa de desconto	%	12	12
Caso 1			
Tempo de amortização	ano	5	10
Valor residual	R\$	3.250,00	5.388,00
Caso 2			
Tempo de amortização	ano	10	20
Valor residual	R\$	0	0
Valor de recondicionamento do motor	R\$	3.250,00	5.388,00

O cálculo dos custos de combustível, operação e manutenção do sistema de geração são expressos pelas Equações (1), (2) e (3)

$$C_{ac} = n t C_c P_c \quad (1)$$

em que:

C_{ac} = Custo anual do combustível, R\$ ano⁻¹;

n = Número de dias ($n = 365$ dia ano⁻¹) utilizados no ano, dia ano⁻¹;

t = Tempo de trabalho, h dia⁻¹;

C_c = Consumo de combustível, L h⁻¹; e

P_c = Preço do combustível, R\$ L⁻¹.

$$C_o = m N_t R_t \quad (2)$$

em que:

- C_o = Custo anual de operação, R\$ ano⁻¹;
- m = Número de meses ($m = 12$ mês ano⁻¹) utilizados no ano, mês ano⁻¹;
- N_t = Número total de trabalhadores, adimensional; e
- R_t = Remuneração do trabalhador, R\$ mês⁻¹;

Neste caso, foi considerada a necessidade de um operário para o GG 2, com uma remuneração de R\$ 750,00 por mês. As despesas com manutenção foram estimadas em 5% do investimento inicial do gerador.

$$C_M = 0,05 C_I \quad (3)$$

em que:

- C_M = Custo anual com manutenção, R\$ ano⁻¹; e
- C_I = Custo do investimento do grupo gerado, R\$.

A quantidade de energia elétrica gerada anualmente foi calculada utilizando a Equação (4).

$$Q_E = n t P F_c \quad (4)$$

em que:

- Q_E = Quantidade energia elétrica gerada anualmente, kWh ano⁻¹;
- n = Número de dias ($n = 365$ dia ano⁻¹) utilizados no ano, dia ano⁻¹;
- t = Tempo de trabalho, h dia⁻¹;
- P = Potencia gerador, kW; e
- F_c = Fator de carga, adimensional.

Para a análise econômica da produção de eletricidade utilizando álcool combustível produzido na fazenda foi realizada uma análise de despesas do projeto, para depois usar o Custo Anual Equivalente (CAE) e o Custo Equivalente de Eletricidade (CEE).

O CAE consiste em achar a série uniforme anual dos custos expresso pela Equação (5).

$$CAE = VP \left[\frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \right] \quad (5)$$

em que:

- CAE = Custo anual equivalente, R\$ ano⁻¹;
- VP = Valor presente dos fluxos de caixa, R\$;
- i = Taxa de juros ao ano, decimal; e
- n = Número de períodos, ano.

O CEE é definido como o custo médio anual dividido pela produção de energia elétrica média anual. Permite comparar tecnologias com diferentes tipos de investimento e distintos tempos de operação. O CEE se expressa pela Equação (6).

$$CEE = \frac{CAE}{Q_E} \quad (6)$$

em que:

- CEE = Custo equivalente de eletricidade, R\$ (kWh)⁻¹;
- CAE = Custo anual equivalente, R\$ ano⁻¹;
- Q_E = Quantidade energia elétrica gerada anualmente, kWh ano⁻¹.

No processo de tomada de decisão, por meio do uso dos cenários associados à análise de sensibilidade, busca-se examinar o impacto que variações no preço do álcool combustível, na taxa de desconto e no investimento inicial podem ocasionar no CAE e no CEE.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento dos custos associados à implantação do sistema de geração de eletricidade mostrou a necessidade de um investimento inicial em grupos geradores (GG) e galpões para a acomodação dos equipamentos. Igualmente consideraram-se os custos de combustível, manutenção e operação do sistema.

Na Figura 2, observam-se os custos relativos ao sistema de geração de eletricidade. O maior custo é devido ao combustível. Em todos os casos o combustível representa custos maiores que 60% do total e observa-se que, conforme aumenta o tempo de amortização do projeto, este custo tende a aumentar. Assim, por exemplo, para o GG 1, tem-se custos de 63,2% e 66,3% para tempos de amortização do projeto de 5 e 10 anos, respectivamente. No caso do GG 2, a porcentagem de custos devido ao combustível é maior em relação à do GG 1.

No caso do custo por inversão, observa-se que no GG 1 eles são maiores. Conforme aumenta o tempo de amortização do projeto, o custo por inversão tende a diminuir. O contrário acontece com o custo de manutenção e operação, porque estes são maiores para o GG 2 e, conforme aumenta o tempo de amortização do projeto, este custo tende a aumentar para os dois grupos geradores.

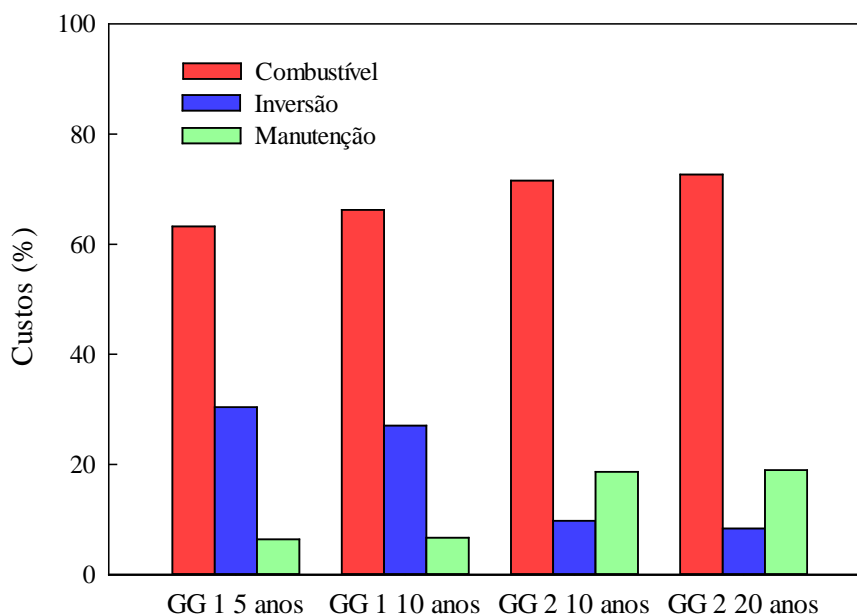


Figura 2 - Composição dos custos de geração de eletricidade com Grupos Geradores para diferentes tempos de amortização.

Foram utilizados dois métodos básicos de avaliação econômica de sistemas de geração de energia elétrica. O primeiro método calcula o custo anual equivalente do sistema e pode ser utilizado para comparar diferentes tecnologias que buscam satisfazer a uma demanda de energia determinada. O segundo método calcula o custo de eletricidade equivalente, ou seja, o custo de produção de um kWh em toda a vida útil do projeto. Ambos os métodos servem para poder discriminar entre diferentes tecnologias de geração. Os resultados para os casos propostos encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados econômicos obtidos para os casos propostos

Parâmetro	Tempo de amortização (ano)			
	GG 1		GG 2	
	5	10	10	20
CAE, R\$ ano ⁻¹	10.183,00	9.716,00	53.986,00	53.165,00
CEE, (R\$/kWh)	1,00	0,95	0,68	0,67

Nas Figuras 3, 4 e 5 observam-se os custos anuais equivalentes para as diferentes opções analisadas. Em todos os casos os CAE são maiores para o GG 2, mas se deve levar em conta que a potência anual gerada no GG 1 é menor. Além disso, o CAE permite conhecer apenas se os custos anuais são maiores ou não entre os diferentes grupos geradores.

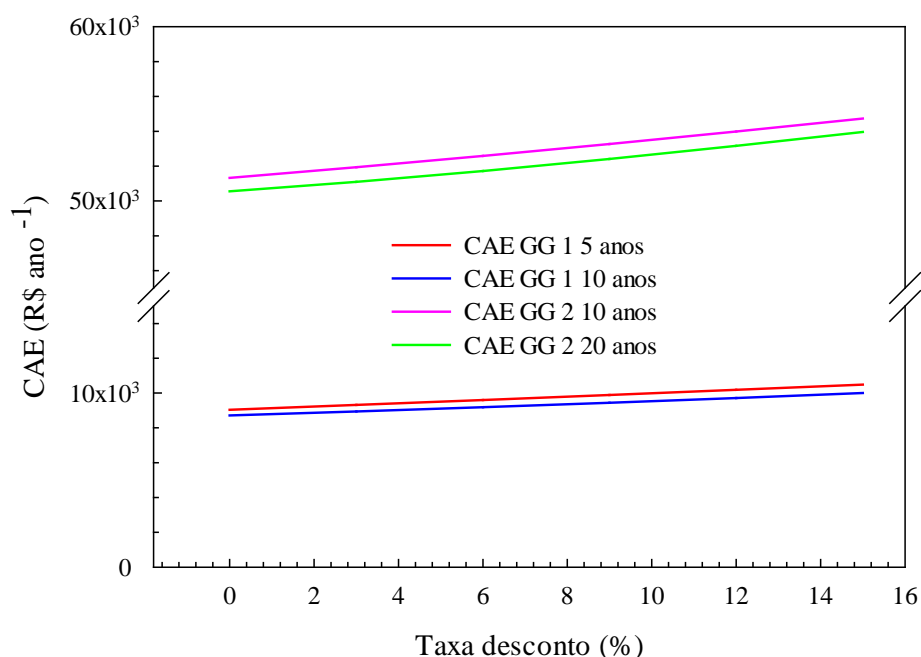


Figura 3 - Variação do Custo Anual Equivalente da geração de energia elétrica com a taxa de desconto.

Na Figura 3, observa-se que, ao aumentar a taxa de desconto, o CAE aumenta em todos os casos, mas em nenhum dos casos este aumento supera 7% para o GG 1 e 16% para o GG 2, para variações de 0 a 15% da taxa de desconto. Também se pode observar que quanto maior o tempo de amortização do projeto menor o CAE, em todos os casos.

Na Figura 4, observa-se que, quando se varia a inversão inicial, o CAE aumenta. Em nenhum dos casos este aumento supera a 110% para o GG 1 e 25% para o GG 2, para inversões de 0 a 200%. Estes dados são muito úteis para casos de comunidades isoladas que decidam ter 2 grupos geradores para assegurar a disponibilidade de eletricidade. Os grupos geradores a álcool não são encontrados frequentemente no mercado e pode ser que, com o tempo, seu preço diminua, tornando possível obter CAE mais baixos. Comparando um mesmo grupo gerador, observa-se também que, para valores de inversão maiores que 50%, o CAE é menor para um tempo de amortização maior.

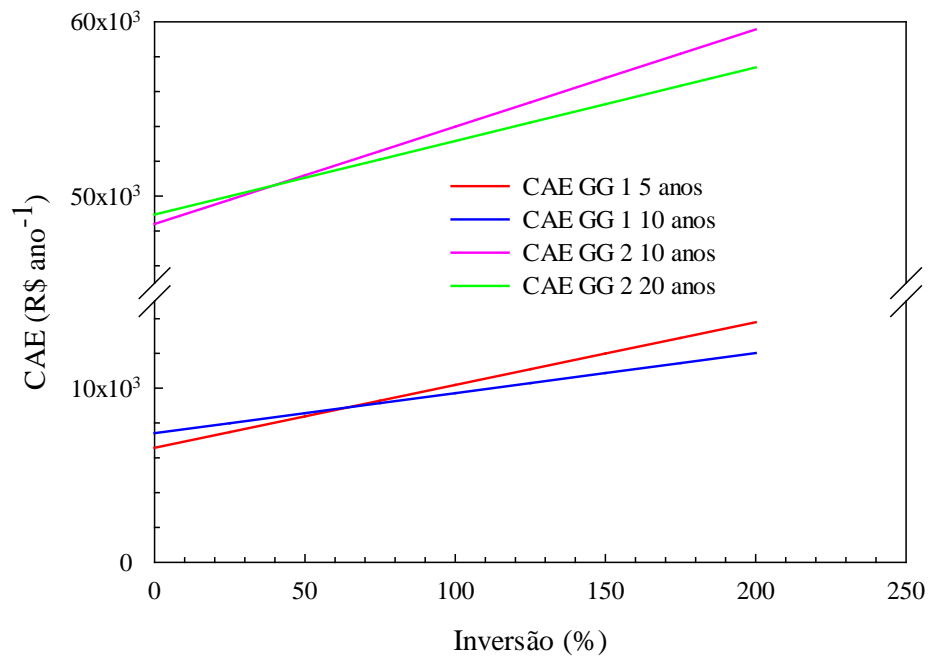


Figura 4 - Variação do Custo Anual Equivalente da geração de energia elétrica com a inversão inicial.

Na Figura 5, observa-se que, ao aumentar o preço do álcool combustível, o CAE aumenta. Em todos os casos este aumento supera a 250% para o GG 1 e 300% para o GG 2, para variações de R\$ 0,30 a R\$ 2,10 por litro. Também pode observar-se que quanto maior o tempo de amortização do projeto menor o CAE para o mesmo grupo gerador. O preço do álcool é o parâmetro que provoca maior sensibilidade no CAE.

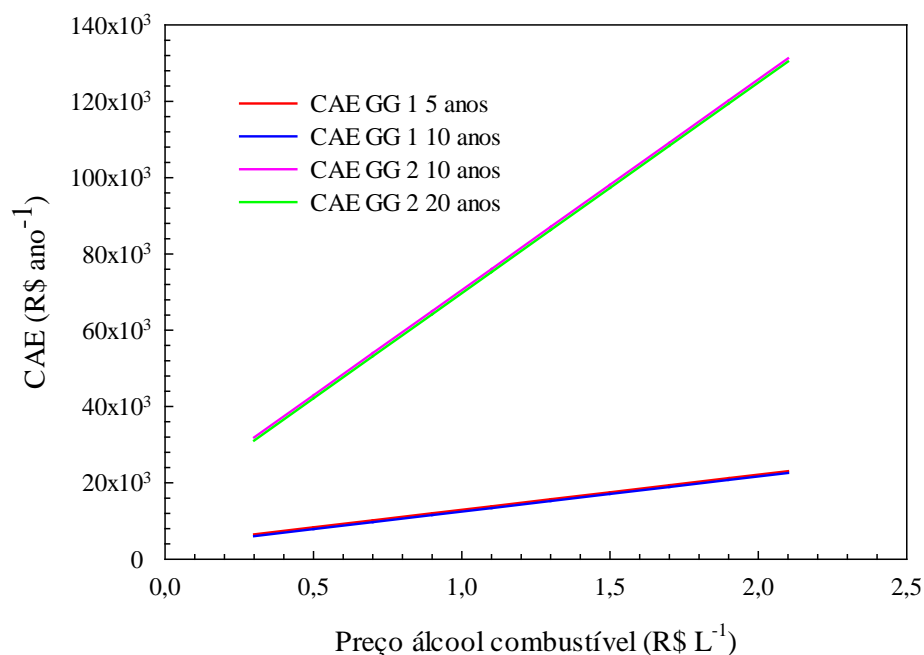


Figura 5 - Variação do Custo Anual Equivalente da geração de energia elétrica com o preço do álcool combustível.

O CEE é um parâmetro comumente utilizado para avaliar a viabilidade econômica de instalações elétricas, a fim de selecionar a melhor. O CEE leva em conta todos os custos gerados ao longo da vida útil do projeto, assim como a inversão inicial. Devido a isto, é possível utilizar o CEE para comparar diferentes fontes de geração de energia elétrica e, por sua vez, com o preço de mercado de energia elétrica.

Nas Tabelas 4, 5 e 6 encontram-se os custos equivalentes de eletricidade para as diferentes opções analisadas. Em todos os casos, os CEE são menores para o GG 2.

Tabela 4 - Efeito da taxa de desconto sobre o CEE

CEE (R\$/kWh)				
Taxa de desconto (%)	Tempo de amortização (ano)			
	GG 1		GG 2	
	5	10	10	20
0	0,88	0,85	0,65	0,64
3	0,91	0,87	0,66	0,65
6	0,94	0,90	0,67	0,66
9	0,97	0,92	0,68	0,66
12	1,00	0,95	0,68	0,67
15	1,03	0,98	0,69	0,68

Tabela 5 - Efeito da inversão sobre o CEE

CEE (R\$/kWh)				
Inversão (%)	Tempo de amortização (ano)			
	GG 1		GG 2	
	5	10	10	20
0	0,64	0,73	0,61	0,62
25	0,73	0,78	0,63	0,63
50	0,82	0,84	0,65	0,65
75	0,91	0,89	0,67	0,66
100	1,00	0,95	0,68	0,67
125	1,08	1,01	0,70	0,69
150	1,17	1,06	0,72	0,70
175	1,26	1,12	0,74	0,71
200	1,35	1,18	0,76	0,73

Tabela 6 - Efeito do preço do álcool combustível sobre o CEE

CEE (R\$/kWh)				
Preço do Combustível (R\$ L ⁻¹)	Tempo de amortização (ano)			
	GG 1		GG 2	
	5	10	10	20
0,30	0,64	0,59	0,40	0,39
0,50	0,82	0,77	0,54	0,53
0,70	1,00	0,95	0,68	0,67
0,90	1,18	1,13	0,82	0,81
1,10	1,36	1,31	0,96	0,95
1,30	1,54	1,49	1,10	1,09
1,50	1,72	1,67	1,24	1,23
1,70	1,90	1,85	1,38	1,37
1,90	2,08	2,03	1,52	1,51
2,10	2,26	2,21	1,66	1,65

O custo de geração de energia elétrica obtido utilizando álcool combustível produzido na fazenda não é competitivo quando comparado ao preço de mercado de energia elétrica no Brasil. Na Tabela 7, observa-se que a média da tarifa residencial de energia elétrica para o Brasil é de R\$ 324,64 por MWh, e a tarifa média para o meio rural brasileiro é de R\$ 216,38 por MWh. Nos casos não estão inclusos os impostos.

A Agência Nacional de energia Elétrica (ANEEL) publica, por meio de resolução, o valor da tarifa de energia, sem os tributos, por classe de consumo. Com

base nesses valores, as distribuidoras de energia incluem os tributos (PIS, COFINS, ICMS e CIP) e emitem a conta de luz que os consumidores pagam (ANEEL, 2008). Em 2007, em uma conta média de energia elétrica de R\$ 100,00, R\$ 33,45 correspondiam a encargos e tributos.

Tabela 7 - Tarifas médias de energia elétrica por classe de consumo por região (R\$/MWh), em novembro de 2011

Classe de consumo por região	Centro Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Residencial	334,92	323,53	327,94	324,02	321,54	324,64
Industrial	237,14	249,78	265,09	258,80	262,20	257,53
Comercial, Serviços e Outras	307,82	328,90	327,60	295,22	297,09	303,58
Rural	229,03	235,92	233,95	231,43	203,83	216,38
Poder Público	320,39	353,47	359,14	317,96	319,89	330,92
Iluminação Pública	173,42	193,07	190,15	175,82	160,03	177,55
Serviço Público (água, esgoto e saneamento)	231,61	218,20	240,13	215,18	213,74	216,54
Consumo Próprio	348,12	340,98	350,97	308,62	293,69	319,41
Rural Aquicultura	273,64	189,25	235,60	211,84	166,87	189,18
Rural Irrigante	195,77	152,53	344,22	176,49	222,71	172,30
Serviço Público (tração elétrica)		271,43	235,48	253,58	264,80	255,54
Totais por Região	289,47	291,23	306,88	288,20	279,29	288,25

Fonte: ANEEL, 2012.

A tarifa rural, classificada como B2, aplicada pelas concessionárias de energia elétrica nas regiões atendidas pela CEMIG, é de R\$ 236,54 por MWh e a tarifa residencial classificada como B1 é de R\$ 404,23 por MWh (CEMIG, 2012). Ambas as tarifas não incluem os impostos (ICMS, PIS/PASEP, COFINS e Contribuição de Iluminação Pública). Quando são adicionados os impostos à tarifa residencial B1 da CEMIG o seu valor chega a, aproximadamente, R\$ 0,63 por kWh. Neste caso, a geração de energia elétrica com o GG 1 e com GG 2 só é competitiva quando o preço do álcool combustível for R\$ 0,50 por litro, ou menos. Mas se deve considerar que a geração de energia localizada dispensa as onerosas linhas de transmissão e sua manutenção, o que é uma vantagem da geração descentralizada.

4 CONCLUSÕES

O custo da energia elétrica produzida com grupos geradores utilizando álcool combustível produzido em microdestilarias é atualmente maior em comparação com os custos da energia convencional, ofertada pela concessionária de energia elétrica. Dessa forma, essa tecnologia tem que ser vista apenas como uma alternativa para o suprimento energético, em áreas isoladas, onde não é possível ter outro tipo de energia. Neste caso, foram considerados preços do álcool combustível de R\$ 0,30 por L a R\$ 2,10 por L.

No caso de um produtor de aguardente que descarta os resíduos (cabeça e cauda), é possível obter o custo de produção de álcool combustível menor que R\$ 0,30 por L. Assim, o custo de geração de energia elétrica seria mais barato e tornaria esta alternativa de geração competitiva com respeito à ofertada pela concessionária. Além disso, dispensaria os custos das linhas de transmissão e distribuição.

REFERÊNCIAS

AMADOR, J. **Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los sistemas de información geográfica a la integración regional de las energías renovables en la producción descentralizada de electricidad**. 2000. 270 p. Tesis (Doctorado en Ingeniería Eléctrica) - Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2000.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2012. Disponível em: <http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?%2fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render>. Acesso em: 10 set. 2012.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Por dentro da conta de luz**: informação de utilidade pública. Brasília: ANEEL, 2008. 4. ed. 32p.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Valores de tarifa e serviços**. 2012. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/Atendimento/Paginas/ValoresDeTarifaEServicos.aspx>>. Acesso em: 10 nov. 2012.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; SILOTTO, C. E. G.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MONTEIRO, M. B. C. A. Implantação e testes de utilização de óleo vegetal como combustível para diesel geradores em comunidades isoladas da Amazônia. In: 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída – AGRENER, 2004. **Anais...** Campinas. 2004.

DI LASCIO, M. A.; BARRETO, E. J. F. **Energia e desenvolvimento sustentável para a Amazônia rural brasileira**: eletrificação de comunidades isoladas. Brasília: Ministério de Minas e energia, 2009. 190 p.

EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2012 ano base 2011**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 282 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 29 out. 2012.

FERNANDES, M. C. **Avaliação técnico-econômica da gaseificação de capim-elefante para eletrificação rural**. 2000. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2000.

FREITAS, K. T.; SOUZA, R. C. R.; SEYE, O.; SANTOS, E. C. S.; XAVIER, D. J. C.; BACELLAR, A. A. Custo de geração de energia elétrica em comunidade isolada no Amazonas: estudo preliminar do Projeto NERAM. **Revista Brasileira de Energia**, v. 12, n. 1, 2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 10 out. 2012.

INOUE, G. H. **Uso do óleo vegetal em motor estacionário de ciclo diesel**. 2008. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

KRILL - Krill Geradores. Segunda Mano. Disponível em: <http://www.krillgeradores.com/segunda_mano/>. Acesso em: 10 out. 2012.

PEDREIRA, A. C.; SOUZA, R. C. R.; XAVIER, D. J. C.; FREITAS, K. T. Estimativa do preço de comercialização da energia elétrica - estudo de caso: cooperativa de agroenergia - projeto NERAM. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100060&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 12 set. 2010.

ROSADO, J.; COELHO, H. M.; FEIL, N. F. **Análise da viabilidade econômica da produção de bio-etanol em microdestilarias**. Estudo de viabilidade técnico-econômica independente. 2008. 33 f. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/guest5b121/microdistillery-feasibility-study-brazil>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

SILVA, G. F. **Estudo comparativo da geração de energia elétrica utilizando gerador trifásico movido a etanol e a diesel**. 2012. 59 f. Monografia (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

SILVA, J. S. **Produção de álcool na fazenda e em sistema cooperativo**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2007. 168 p.

SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. G. V. Operação de um grupo gerador diesel utilizando óleo vegetal bruto como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL – AGRENER, 3, 2000. Campinas. **Anais...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200048&script=sci_arttext>. Acesso em: 11 mar. 2010.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; PAVAN, A. A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. In: ENCONTRO DE

ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004. Campinas. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000100042&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 01 set. 2010.

CONCLUSÕES GERAIS

Nas condições em que foi realizado este trabalho concluiu-se, inicialmente, que a saída 3 da coluna de destilação apresentou uma vazão de saída do álcool mais estável e com teores alcoólicos superiores às outras saídas.

Obteve-se o modelo geral que descreve o comportamento da vazão de saída da coluna em função do teor alcoólico inicial de pré-destilado na panela, do teor alcoólico destilado na saída, da altura da coluna e da temperatura na saída.

Determinou-se o consumo específico de energia mínimo necessário para evaporar o álcool presente na mistura de pré-destilados. A quantidade mínima de energia a fornecer ao sistema para evaporar o etanol presente na panela foi de 2.126,20 kJ L⁻¹ para a mistura com 15% de teor alcoólico e de 1.027,30 kJ L⁻¹ para a mistura de 75% de teor alcoólico.

Por fim, determinou-se a altura ótima usando um recheio randômico comercial para diferentes teores alcoólicos iniciais para obter álcool combustível. A mínima altura obtida foi de 2 m para anéis de *Pall* de 25 mm, para um teor alcoólico inicial de 80% e a máxima altura obtida foi de 6 m para anéis de *Pall* de 50 mm, para um teor alcoólico inicial de 8%.

Nas condições em que foram realizados os ensaios e de acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que é viável o uso de álcool combustível produzido na fazenda nos grupos geradores de energia elétrica utilizados.

Houve redução nos valores do consumo específico de combustível com o aumento da potência. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 1 foi um consumo específico de combustível de 0,90 L por kWh para uma carga de 6,86 kW quando utilizou-se álcool combustível da fazenda. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 2 foi um consumo específico de combustível de 0,62 L por kWh para uma carga de 25,99 kW quando utilizou-se álcool combustível do posto de combustível.

Houve aumento nos valores da eficiência com o aumento da potência. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 1 foi uma eficiência de 17,91% para uma carga de 6,86 kW quando utilizou-se álcool combustível da fazenda. O melhor resultado obtido para o grupo gerador 2 foi uma eficiência de 25,88% para uma carga de 25,99 kW quando utilizou-se álcool combustível do posto de combustível.

O projeto de microdestilaria foi viável economicamente para os dois tempos de operação propostos. Os parâmetros financeiros melhoraram quando utilizados como matéria-prima dos resíduos de cachaça.

Considerando R\$ 55,00 por tonelada de cana, quando se utilizou o caldo de cana como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 1,19 por litro, quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹, e de R\$ 1,11 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

Considerando R\$ 27,50 por tonelada de cana, quando se utilizou o caldo de cana como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,73 por litro, quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹, e de R\$ 0,65 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

Considerando o custo dos resíduos da cachaça como sendo 50% do total das entradas no projeto em relação à venda do álcool combustível (R\$ 0,75 por L produzido de álcool combustível), quando se utilizou o resíduo da cachaça como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,93 por litro quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹ e de R\$ 0,88 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

Considerando que o produtor de cachaça tem a sua disposição os resíduos de cabeça e cauda, quando se utilizou o resíduo da cachaça como matéria-prima, o custo de produção do álcool combustível foi de R\$ 0,18 por litro quando a microdestilaria operou durante 8 h dia⁻¹ e de R\$ 0,13 por litro quando a microdestilaria operou durante 16 h dia⁻¹.

O custo da energia elétrica produzida com grupos geradores utilizando álcool combustível produzido em microdestilarias é atualmente maior em comparação com os custos da energia convencional, ofertada pela concessionária de energia elétrica. Dessa forma, essa tecnologia tem que ser vista apenas como uma alternativa para o suprimento energético, em áreas isoladas, onde não é possível ter outro tipo de energia. Neste caso, foram considerados preços do álcool combustível de R\$ 0,30 por L a R\$ 2,10 por L.

No caso de um produtor de aguardente que descarta os resíduos (cabeça e cauda), é possível obter o custo de produção de álcool combustível menor que R\$ 0,30 por L. Assim, o custo de geração de energia elétrica seria mais barato e tornaria esta alternativa de geração competitiva com respeito à ofertada pela concessionária. Além disso, dispensaria os custos das linhas de transmissão e distribuição.