

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA E
RACIONALIDADE ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE ETANOL
COM A APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY**

MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Março de 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA E
RACIONALIDADE ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE ETANOL
COM A APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY**

MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN

Orientador: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim
Co-orientador: Prof. Dr. Celso E. Lins de Oliveira

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

H194d Halmeman, Maria Cristina Rodrigues, 1976-
 Determinação de indicadores de eficiência e racionalidade energética na produção de etanol com a aplicação da lógica *fuzzy* / Maria Cristina Rodrigues Halmeman. - Botucatu: [s.n.], 2012
 ix, 85 f. : il. color., fots. color., gráfs. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012
 Orientador: Odivaldo José Seraphim
 Co-orientador: Celso E. Lins de Oliveira
 Inclui bibliografia

1. Etanol. 2. Lógica *fuzzy*. 3. Eficiência energética. 4. Cana-de-açúcar processada. 5. Energia - Utilização racional. I. Seraphim, Odivaldo José. II. Oliveira, Celso E. Lins de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA E
RACIONALIDADE ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE ETANOL
COM A APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY"

ALUNA: MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN

ORIENTADOR: PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM



PROF. DR. LUIZ ANTONIO ROSSI

PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON



PROF. DR. LUIS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO



PROF. DR. LUIZ ANTONIO PEREA

Data da Realização: 01 de março de 2012.

*Ao meu esposo e amigo, pelo carinho e apoio em todos os
momentos da vida.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela constante presença em minha vida.

Ao Professor Dr. Odivaldo José Seraphim, pela orientação, apoio e amizade construída nos momentos importantes de nossa convivência.

Ao professor Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho por todas as valiosas colaborações, amizade, apoio e incentivo.

Ao amigo Luiz Antonio Perea, pelo exemplo de profissionalismo, amizade e atenção.

A todos os professores, amigos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao esposo Radames Juliano Halmeman, pela paciência, ternura, compreensão e incentivo, sempre ao meu lado.

A todos os meus familiares que me apoiaram na busca de mais esta realização.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XI
1 RESUMO.....	1
1.1 SUMMARY	3
2 INTRODUÇÃO	5
2.1 Objetivo geral	6
2.2 Objetivos específicos	6
3. REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA	7
3.1 Agroindústria da cana-de-açúcar	7
3.2 Eficiência energética.....	10
3.4 Indicadores de eficiência energética.....	21
3.5 Parâmetros que interferem no uso da energia elétrica	24
3.5.1 Fator de carga	24
3.5.2 Fator de potência	25
3.6 Lógica Fuzzy	26
3.6.1 Conjuntos fuzzy	28
3.6.2 Regras e variáveis lingüísticas.....	29
3.6.3 Sistema de inferência <i>Fuzzy</i>	30
3.6.4 Programas computacionais	32
4 MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1 Material.....	34
4.1.1 Caracterização das usinas	34
4.1.2 Setores analisados nas usinas	35
4.2 Métodos	40

4.2.1 Coleta de dados para a caracterização das usinas	41
4.2.2 Medições elétricas e determinação dos indicadores de eficiência energética	42
4.2.3 Demanda e consumo de energia por setor e na produção de etanol	42
4.2.4 Fator de potência médio para produção de etanol	44
4.2.5 Determinação dos índices de desempenho	46
4.2.5.1 Consumo elétrico específico na produção do etanol	46
4.2.5.2 Índice de eficiência em produtividade.....	47
4.2.5.3 Índice específico de energia gerada na produção do etanol	47
4.2.5.4 Índice proporcional de consumo de energia na produção do etanol.....	48
4.2.6 Análise estatística	48
4.2.7 Modelagem do controlador <i>Fuzzy</i> para a análise da eficiência	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1 Medições elétricas	54
5.1.1 Demanda média e consumo de energia por setor e na produção de etanol	54
5.1.2 Fator de potência médio na produção de etanol	59
5.1.3 Fator de carga nos setores das usinas e na produção do etanol	61
5.2 Análise dos índices de desempenho	63
5.3. Análise estatística	65
5.4. Modelagem do controlador Fuzzy para a análise da eficiência.....	67
6 CONCLUSÕES.....	77
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Principais produtores da cana-de-açúcar no mundo	8
Tabela 02. Mecanismos voluntários de fomento à eficiência energética em alguns países	12
Tabela 03. Cenário de referências do setor sucroalcooleiro, expansão da produção de cana-de-açúcar, recuperação da palha, uso do bagaço para hidrólise e oferta da biomassa residual.....	15
Tabela 04. Potencial de cogeração, situação e previsão de acordo com pressão da caldeira (bar) para o estado de São Paulo.	20
Tabela 05. Valores médios característicos das usinas para o período analisado	35
Tabela 06. Definição das funções de pertinência das variáveis de entrada.....	50
Tabela 07. Definição das funções de pertinência das variáveis de entrada.....	51
Tabela 08. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos <i>fuzzy</i> para a geração da base de regras.....	52
Tabela 09. Relação percentual da contribuição do consumo de energia na produção do etanol.....	59
Tabela 10. Demanda média, fator de potência e fator de potência médio da produção do etanol ..	60
Tabela 11. Dados sobre o fator de carga nos setores e fator de carga médio para produção do etanol	62
Tabela 12. Análise dos índices de desempenho	63
Tabela 13. Análise descritiva dos dados de (<i>C</i>) e (<i>FP</i>) relativos ao período de 48 horas	65
Tabela 14. Média e desvio padrão das variáveis (<i>C</i>) e (<i>FP</i>), no qual, para cada variável, valores seguidos de mesma letra não diferem ao nível de significância de 5 %.....	66
Tabela 15. Análise descritiva dos dados (<i>FC</i>) e (<i>FP</i>) relativos ao período de 48 horas de medições	67
Tabela 16. Base de regras do sistema baseado em regras <i>Fuzzy</i>	69
Tabela 17. Classificações das usinas em estudo, por setores, conforme o índice <i>fuzzy</i> de eficiência e racionalidade e sua associação com o conjunto <i>Fuzzy</i> de maior grau de pertinência ..	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Esquema de um sistema de cogeração industrial	14
Figura 02. Cogeração com ciclo de <i>Rankine</i>	16
Figura 03. Cenário de evolução da estrutura do processamento de cana-de-açúcar, segundo as tecnologias de geração de eletricidade.	18
Figura 04. Triângulo retângulo de potência.....	25
Figura 05. Funções de pertinência para a variável temperatura	29
Figura 06. Estrutura geral de um sistema <i>fuzzy</i>	31
Figura 07. Fluxograma básico do processamento da cana-de-açúcar	35
Figura 8. Analisador Saga 4500 utilizado para coleta de dados na usina USA.....	38
Figura 9. Esquema de ligação das medições realizadas com o analisador SAGA na usina USA	39
Figura 10. Esquema de ligação das medições realizadas com o analisador SAGA nas usinas USB e USC.....	40
Figura 11. Fluxograma para desenvolvimento da metodologia.	41
Figura 12. Sistema baseado em regras <i>Fuzzy</i> para determinação do Índice de Eficiência e Racionalidade ($IEfic_{rac}$) no setor sucroalcooleiro.	49
Figura 13. Funções de pertinência definidas para os conjuntos <i>fuzzy</i> da variável de entrada	50
Figura 14. Funções de pertinência definidas para os conjuntos <i>fuzzy</i> da variável de saída índice <i>fuzzy</i> de eficiência e racionalidade.....	51
Figura 15. Comportamento da potência ativa trifásica no setor da recepção	55
Figura 16. Comportamento da potência ativa trifásica no setor da moagem	55
Figura 17. Comportamento da potência ativa trifásica no setor de caldeiras.	56
Figura 18. Comportamento da potência ativa trifásica no setor de atividades auxiliares	56
Figura 19. Comportamento da potência ativa trifásica no setor de destilarias.	57
Figura 20. Energia consumida nos setores da usina USA	58
Figura 21. Energia consumida nos setores da usina USB	58
Figura 22. Energia consumida nos setores da usina USC	59
Figura 23. Fator de potência médio para os cinco setores analisados durante um período de 48	

horas	61
Figura 24. Fator de carga para os cinco setores analisados durante um período de 48 horas	62
Figura 25. <i>Boxplot</i> para dados amostrais de (C) e (FP)	66
Figura 26. <i>Boxplot</i> para dados amostrais do (FC) e (FP)	67
Figura 27. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável de entrada (FC)	68
Figura 28. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável de entrada (FP)	68
Figura 29. <i>Índice Fuzzy de IEfic_{rac}</i> representado tridimensionalmente as possíveis avaliações energéticas em relação aos fatores de carga e potência das usinas do setor sucroalcooleiro	72
Figura 30. Mapa de contorno da superfície do <i>Índice Fuzzy de IEfic_{rac}</i>	72
Figura 31. Utilização do método de inferência de <i>Mamdani</i> , para (FC) e (FP) no ponto P1....	73
Figura 32. Utilização do método de inferência de <i>Mamdani</i> , para o (FC) e (FP) no ponto P2. .	74
Figura 33. Utilização do método de inferência de <i>Mamdani</i> , para o (FC) e (FP) no ponto P3 ..	74
Figura 34. Indicação do maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> “Médio” do ponto P1	75
Figura 35. Indicação do maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> “Alto” do ponto P2	75
Figura 36. Indicação do maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> “Baixo” do ponto P3	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADEME	Agence de'Environnement et de la Maîtrise de Energie.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARENA	Agência Regional da Energia da Região Autónoma dos Açores (exemplo)
BEN	Balanço Energético Nacional
CEE	Consumo Específico de Energia
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EREN	Energy Efficiency and Renewable Energy Network
EST	Energy Saving Trust
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IEA	<i>Internacional Energy Agency</i>
IEE	indicadores de eficiência energética
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
kVA	potência aparente - quilovolt-ampère
kVar	potência reativa - quilovolt-ampère-reativo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MME	Ministério de Minas e Energia
OEE	Office of Energy Efficiency
PNE	Planejamento Nacional de Energia
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformadores de Potência
USA	Usina A
USB	Usina B
USC	Usina C
UDOP	União dos Produtores de Energia
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar

1 RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com expansão de produção acelerada nos últimos anos, movida principalmente, pela elevação do consumo doméstico de etanol e açúcar. O estado de São Paulo concentra a maior quantidade de canaviais do país. O setor sucroalcooleiro produz energia térmica e elétrica suficientes para seus processos de produção e excedentes de energia elétrica que podem ser comercializados. Por esse motivo é necessário estabelecer indicadores energéticos capazes de verificar quais usinas possuem processos eficientes na geração e no consumo de energia elétrica.

Desse modo, o objetivo do trabalho foi estabelecer índices de eficiência e racionalidade com base na geração, consumo de energia elétrica, produção de etanol e quantidade de cana-de-açúcar processada para três usinas do setor sucroalcooleiro, utilizando-se análises estatísticas e lógica fuzzy.

A aplicação da análise estatística e lógica fuzzy, baseando-se no Fator de Potência (FP) e no Fator de Carga (FC) indicaram a eficiência e racionalidade na forma de utilização da energia elétrica.

As três usinas analisadas possuem grande potencial de produção e exportação de açúcar e etanol e estão localizadas na região Centro-Oeste do estado de São Paulo. Os dados coletados na safra 2008/2009 permitiram a avaliação da utilização da energia elétrica em cinco setores de cada usina e estabelecer parâmetros para avaliar o desempenho

energético, de forma a classificar sua situação de acordo com as variáveis linguísticas: “Muito Ruim”, “Ruim”, “Médio”, “Bom” e “Muito Bom”, conforme um sistema de controle baseado na lógica *fuzzy*.

A classificação mostrou que a usina USA teve desempenho satisfatório para os setores de recepção e extração do caldo. A usina USB mostrou-se mais eficiente e racional para os setores de caldeira e destilarias. A usina USC, para o setor de extração do caldo, expressou um desempenho excelente (classificação alta), mas o mesmo setor na usina USB revelou-se classificado como baixo.

Conclui-se que uma usina pode ter classificação satisfatória em um ou mais setores e insatisfatória em outros, ou vice-versa. O método computacional baseado na lógica *fuzzy* permitiu estabelecer o índice de eficiência e racionalidade ($IEfic_{rac}$), possibilitando a comparação de vários setores de diferentes usinas simultaneamente. Assim, é possível que os gestores do setor sucroalcooleiro verifiquem a eficiência do uso de energia nos setores das usinas entre si e também comparem com setores de outras usinas.

DETERMINATION OF INDICATORS ENERGETIC EFFICIENCY AND RATIONALITY IN THE PRODUCTION OF ETHANOL WITH THE APPLICATION OF FUZZY LOGIC

Botucatu, 2012. 85 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)- Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARIA CRISTINA RODIGUES HALMEMAN

Adviser: ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM
CELSO E. LINS DE OLIVEIRA

1.1 SUMMARY

Brazil is the largest producer of sugar cane in the world, with expansion of production accelerated in recent years, driven mainly by rising domestic consumption of ethanol and sugar. The state of São Paulo has the largest amount of sugar plantations in the country. The alcohol sector produces sufficient thermal and electrical energy for its processes of production and exceeding electricity that can be commercialized. For this reason is necessary to establish energy indicators, it show if the plants have efficient processes in the generation and power consumption.

Thus, the objective was establish indices of efficiency and rationality based on generation, power consumption, ethanol production and quantity of sugar cane processed for three plants of this sector, using statistical and fuzzy logic.

The application of statistical analysis and fuzzy logic, based on Power Factor (PF) and Load Factor (CF) showed the efficiency and rationality in the form of electrical energy is used.

The plants analyzed have great potential for production and export of sugar and ethanol, they are in the Midwestern, state of São Paulo. The data collected in the season 2008/2009 allowed the evaluation of the use of electricity in five sectors of each plant and establishing criteria for assessing the energy performance in order to classify their situation

according to the linguistic variables: "Very Poor" "Bad," "Medium," "Good" and "Very Good" as a control system based on fuzzy logic.

Classification showed that the plant called USA had a satisfactory performance for the areas of reception and extract the juice. The USB power plant was more efficient and rational for the sectors of boiler and distilleries. The plant USC for the juice extraction industry, expressed an excellent performance (high rating), but the same sector at the mill USB proved classified as low.

The results showed that a plant can be rated satisfactory in one or more sectors and unsatisfactory in other sectors, or vice versa. The computational method based on fuzzy logic allowed to establish the level of efficiency and rationality ($IEfic_{rac}$), enabling the comparison of various sectors of different plants simultaneously. Thus it is possible that the managers of sugar cane sector check the efficiency of energy use in sectors of plants with each other and compare with other plants.

Keywords: rational use of energy, energy efficiency, performance indicators.

2 INTRODUÇÃO

Com a crise de energia elétrica e o racionamento de energia elétrica em 2001, o Brasil enfrentou restrições no consumo de energia e algumas mudanças ocorreram para a melhoria do setor. Uma das melhorias foi o estímulo promovido pelo governo brasileiro ao uso de fontes alternativas de energia.

Conforme Anselmi (2009), nos últimos 10 anos aumentou a demanda por energia elétrica no país e conseqüentemente o interesse pela venda e geração de bioeletricidade. Devido a esse interesse, diversas modificações nos processos de produção como a eletrificação de picadores e moendas, substituição de caldeiras e turbinas, melhorias para redução do consumo de vapor no processo, entre outras, tem sido feitas para que aumente a quantidade de excedentes de eletricidade que podem ser comercializados.

A eficiência energética consiste na relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. Deste modo, busca-se adequar os equipamentos nos processos industriais para que atinjam sua máxima eficiência. Normalmente as avaliações indicam que são necessárias modificações, atualizações e aplicação de procedimentos que identifiquem parâmetros que interferem no uso da energia elétrica, promovendo uma melhora na relação entre a quantidade de energia empregada e consumida em uma determinada atividade.

Os índices de desempenho e eficiência energética são estabelecidos através de relações e de variáveis que podem ser usadas ao nível macro e micro com o objetivo

de monitorar as variações e desvios na eficiência energética em alguns setores ou na indústria.

A complexidade dos sistemas em usinas de açúcar e etanol, a variedade de equipamentos, as configurações de equipamentos produtores e consumidores de energia entre outros fatores tornam a tarefa de análise da eficiência energética complexa. A utilização da lógica *fuzzy* pode auxiliar nessa tarefa.

Portanto esse trabalho tem como objetivo estabelecer índices de eficiência e racionalidade com base na geração e consumo de energia elétrica na produção de etanol em três usinas do setor sucroalcooleiro.

2.1 Objetivo geral

Estabelecer índices de eficiência e racionalidade com base na geração, consumo de energia elétrica, produção de etanol e quantidade de cana-de-açúcar processada, em três usinas do setor sucroalcooleiro, utilizando-se análises estatísticas e lógica *fuzzy*.

2.2 Objetivos específicos

Obter dados sobre potência ativa, consumo de energia, fator de potência e fator de carga para analisar os parâmetros que interferem na eficiência energética da produção de etanol

Estabelecer índices de desempenho do consumo elétrico específico e índice proporcional de consumo de energia na produção de etanol.

Estabelecer o índice de faturamento eficiente e racional com uso de modelagem matemática e análise estatística na produção de etanol.

Estabelecer índice *fuzzy* de eficiência e racionalidade com base no fator de carga, potência e faturamento eficiente e racional para os setores das usinas analisadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A cana-de-açúcar ocupa local de destaque na economia brasileira. Especialmente no estado de São Paulo que produz energia na forma de açúcar, etanol e eletricidade.

As usinas são autogeradoras de eletricidade e algumas exportam excedentes de energia elétrica.

As tecnologias utilizadas foram evoluindo, desde a década de 70, e atualmente com a possibilidade de exportação de eletricidade há a necessidade de novas maneiras para avaliar a eficiência energética das usinas. Os sistemas são complexos o que torna a avaliação complicada e necessária. Deste modo, é preciso estabelecer procedimentos que auxiliem na conservação e produção de energia.

Nesta revisão serão apresentados os seguintes temas: agroindústria da cana-de-açúcar e seu potencial energético para geração de energia elétrica, eficiência energética e indicadores de eficiência e lógica fuzzy.

3.1 Agroindústria da cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, respondendo por aproximadamente 39% do comércio mundial de açúcar, seguido pela Índia, China, México

e Tailândia. A produção de cana-de-açúcar está em expansão acelerada nos últimos anos, movida, principalmente, pela elevação do consumo doméstico de etanol e açúcar. As usinas brasileiras trabalham com 80% da cana-de-açúcar proveniente de terras próprias ou arrendadas e 20% fornecidos por cerca de 60 mil produtores independentes, em geral pequenos produtores (SCHLESINGER et al. 2010).

Na Tabela 01, há um comparativo com a produção, área cultivada e a produtividade para o cultivo da cana-de-açúcar para os principais países produtores, conforme Anuário Brasileiro da Cana-de-Açúcar (2008).

Tabela 01. Principais produtores da cana-de-açúcar no mundo

Países	Área (ha)	Produção (toneladas)	Produtividade (toneladas ha⁻¹)
Brasil	6.711.779	514.079.729	76,59
Índia	4.900.000	355.520.000	72,56
China	1.235.500	106.316.000	86,05
México	680.000	50.680.000	74,53
Tailândia	1.010.287	64.364.682	63,71
Paquistão	1.029.000	54.752.000	53,21
Colômbia	450.000	40.000.500	88,89
Austrália	420.000	36.000.000	85,71
Indonésia	350.000	25.200.000	72,00
Estados Unidos	357.539	27.750.600	77,62
Filipinas	400.000	25.300.000	63,25
África do Sul	420.000	20.500.000	48,81

Fonte: Anuário brasileiro da cana-de-açúcar (2008)

Nota-se que a produtividade no Brasil é acima da média dos principais produtores mundiais de cana-de-açúcar que é 72 toneladas por hectare. De acordo com Távora (2011) na safra 2008/2009, a cana-de-açúcar ocupou uma área de 7,0 milhões de hectares, sendo 84,8% na região Centro-Sul e 15,2% na região Norte-Nordeste, com produção de 571,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar.

Conforme Schlesinger et al. (2010) as áreas a serem plantadas com cana-de-açúcar para os próximos anos podem variar. Pesquisas do Instituto de Economia Agrícola (IEA) mostram que para a safra de 2015/2016 o Brasil poderá ter uma área de cana-de-açúcar de 12,2 milhões de hectares, com processamento de 902,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e uma produção de 26 bilhões de litros de etanol.

De acordo com os resultados divulgados sobre as áreas cultivadas com cana-de-açúcar, por meio de imagens de satélites de sensoriamento remoto, realizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), o total de áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região Centro-Sul corresponde a 8,6 milhões de hectares e para o estado de São Paulo em 645 municípios, correspondendo na safra de 2011/2012 a aproximadamente 5,4 milhões de hectares (CANASAT, 2011).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), há 436 unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia, das quais 302 unidades são mistas, ou seja, produzem açúcar e etanol, 11 exclusivamente açucareiras e 123 produtoras de etanol. Do total de unidades produtoras, 197 se localizam no estado de São Paulo (MAPA, 2011d).

Conforme Neves e Conejero (2007) o sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é complexo. As usinas produtoras dependem de fornecedores de cana-de-açúcar e bens de capital. Os produtos, etanol, açúcar e energia, são enviados para distribuidores de combustíveis, distribuidores de energia elétrica, indústria de alimentos, atacado e varejo, e *tradings* exportadoras. Os subprodutos são destinados às indústrias, atacado e varejo e as usinas utilizam os resíduos como vinhaça e como biofertilizantes.

De acordo com projeções de produção da cana-de-açúcar entre 2010/2011 a 2020/2021, a produção de cana-de-açúcar deve se expandir a taxas elevadas em todos os estados considerados. Em São Paulo a produção deve aumentar em 132,5 milhões de toneladas. Para atender a esse crescimento, a área no estado deve aumentar em 29,2% no final do período das projeções.

Conforme Plano Decenal de Energia 2020 haverá um aumento de 160,71% na demanda brasileira por etanol entre 2011 e 2020, período no qual a procura pelo combustível deverá subir de 28 bilhões de litros para 73 bilhões de litros. A demanda por etanol hidratado, deverá saltar de 15,5 bilhões de litros para 55,9 bilhões de litros em dez anos (BRASIL/MME, 2011b).

Para Tolmasquin (2011) o aumento da participação dos produtos da cana-de-açúcar, em 2008, ultrapassou a da hidroeletricidade e se tornou a segunda mais importante fonte de nosso país. Entretanto, em 2010, os derivados da cana-de-açúcar atingiram

cerca de 18% da matriz energética, fruto do aumento do uso de etanol no setor de transportes. Ainda ressalta que o etanol deverá triplicar a produção nos próximos 10 anos, alcançando 73 bilhões de litros em 2020.

Com o crescimento da produção de etanol aumenta também a disponibilidade de bagaço e, conseqüentemente, o potencial de venda do excedente de energia elétrica gerado pelas usinas. O uso desse combustível passará a deter a maior fatia na absorção da biomassa da cana-de-açúcar no setor energético, seja pelo aumento da oferta da matéria-prima, seja pela maior dinâmica do mercado de combustíveis líquidos frente ao de açúcar.

A quantidade de energia que poderá ser gerada com a cana-de-açúcar adicional que seria produzida deve levar em conta os seguintes elementos: a decisão de plantar cana-de-açúcar e produzir açúcar e/ou etanol é uma questão privada de interesse empresarial; a produção de bagaço na moagem da cana-de-açúcar é uma decorrência da natureza e não uma escolha; a queima do bagaço para produzir vapor e energia hidráulica e mecânica é uma exigência do processo de fabricação. Porém, a decisão de gerar eletricidade de forma mais, ou menos, eficiente na queima do bagaço é uma decisão estratégica de interesse público, ou seja, estruturar novas unidades de fabricação de açúcar e/ou etanol com equipamentos de baixo rendimento não atende ao interesse do país e não deve fazer parte de qualquer política oficial de incentivo (BRASIL, 2011a p.123).

3.2 Eficiência energética

Para Kucukali e Baris (2010) o aumento dos custos de energia estão relacionados às mudanças climáticas, dependência de combustíveis fósseis escassos e necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias energéticas para atender a crescente demanda, esses são os principais fatores que levam os países a se preocuparem com a segurança do abastecimento energético.

Os autores ressaltam que o aumento da população, a industrialização e a urbanização continuarão crescendo e a necessidade de recursos naturais e energia em médio e longo prazo são indispensáveis. De acordo com *Internacional Energy Agency* (IEA), até o ano de 2030 a demanda de energia total do mundo será 50% maior do que no ano de 2005.

Deste modo, programas de conservação de energia são importantes para

melhorar a eficiência na utilização da energia. De acordo com Wu et al. (2007) em Taiwan, devido à escassez de recursos energéticos, mais de 97% da demanda de energia depende de importações de países estrangeiros. A fim de garantir e estabilizar a oferta interna foi implementado um programa nacional denominado Programa de Promoção, Conservação e Eficiência da Energia, iniciado pelas empresas e serviços públicos.

De acordo com Hull, Gallachoir e Walker (2009), a União Européia está adotando políticas de eficiência energética para a utilização final de energia com previsão de resultados para o período de 2008 a 2016. Os investimentos em eficiência são considerados impulsionadores a melhorar a competitividade industrial, segurança do abastecimento energético e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

No Brasil, o marco regulatório para a melhoria da eficiência energética ocorreu em 2001, com a Lei nº 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. As ações governamentais para promover a eficiência energética começaram a ter maior evidência partir dos anos setenta, decorrente das crises energéticas desse período. Do mesmo modo, com a redução dos preços relativos do petróleo a partir de meados dos anos oitenta, esses programas passaram por uma retração, salvo nos casos onde se identifica um planejamento governamental com estratégias de médio e longo prazo. Entretanto a partir de 2002, os elevados custos de produção de energia em quase todos os países motivaram as pesquisas para reduzir as perdas energéticas e melhorar o desempenho dos sistemas energéticos (BRASIL/MME, 2007a).

Conforme estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), Eletrobrás e Programa de Conservação de Energia Elétrica (2009) no Brasil a indústria não é prioridade nos programas governamentais de eficiência energética, embora seja o maior consumidor. O setor industrial responde por 40,7% de toda energia consumida no Brasil (BEN, 2008).

O estudo também ressalta que economizar energia com ações de eficiência energética no setor industrial gera benefícios para toda a sociedade. Na análise de 217 projetos de eficiência energética, apenas 13 correspondem aos setores industriais e verificou-se que o custo médio do MWh economizado foi de R\$ 79,00 por MWh considerando o custo marginal de expansão do sistema de energia elétrica, possibilitando ao governo e ao empresário direcionar recursos para outras prioridades. A Tabela 02 mostra alguns exemplos de

fomento à eficiência energética em alguns países, os quais foram selecionados considerando seu potencial de aplicação à realidade brasileira.

Tabela 02. Mecanismos voluntários de fomento à eficiência energética em alguns países

País	Instituição responsável	Mecanismos
Canadá	OEE, Office of Energy Efficiency	Programa de informações sobre eficiência energética de aparelhos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, para orientar sua aquisição. Programa “RenoSense” e Fundo “Energuide”, para estimular melhorias de eficiência energética nos planos de reforma de residências.
França	ADEME, Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie	Programas de informações sobre uso de energia nas edificações (aquecimento e iluminação). Programa de gerenciamento ambiental e de energia em plantas industriais. Programa de processamento de lixo industrial e armazenamento de água residual. Programa de disseminação de tecnologias de eficiência energética e de mínimo impacto ambiental.
Reino Unido	EST, Energy Saving Trust	Iniciativas de <i>marketing</i> , promovendo a eficiência energética como um meio moderno e socialmente aceitável de poupar dinheiro. Centros de informação (Energy Efficiency Advice Centres - EEAC), para fornecer orientações na área energética para consumidores domésticos e pequenos empresários. Promoção de substituição de equipamentos (aquecedores de água, sistemas de iluminação, sistemas de aquecimento, unidades de cogeração) com descontos e financiamento.
Estados Unidos	EREN, Energy Efficiency and Renewable Energy Network	Programa Federal de Gerenciamento de Energia (Federal Energy Management Program) coordena a relação interagências e com o setor privado para fornecer mecanismos de financiamento ao setor privado, treinamento, auditorias e demonstração de tecnologias para poupar energia e água.

Fonte: (BRASIL/MME,2007a)

Para Godoi e Oliveira Junior (2009) a eficiência energética abrange um conjunto de conceitos e ações de racionalização, que levam à redução do consumo de energia, sem perdas na quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos, ou no conforto disponibilizado pelos sistemas energéticos utilizados. Os processos industriais que envolvem ações de racionalização devem conduzir à eficiência no uso final da energia, introdução eficiente ao sistema de controle de processos para gestão das cargas, substituição de sistemas/equipamentos obsoletos e ineficientes, recuperação de energia, entre outros.

De acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética (2001) melhorar a eficiência significa reduzir o consumo da energia primária necessário para um determinado serviço. A redução pode acontecer em qualquer etapa da cadeia produtiva. Assim, é relevante aprimorar o conhecimento quantitativo do uso da energia e das estimativas de potencial e fomentar as políticas energéticas, facilitando para que os agentes no mercado desenvolvam suas estratégias empresariais.

3.3 Eficiência energética e produção de energia no setor sucroalcooleiro

Conforme Ramos et al., (2003) até a década de oitenta a ineficiência energética dos sistemas de cogeração eram evidentes, começando pela baixa eficiência das caldeiras, pois o bagaço era considerado um rejeito indesejado dentro do processo de produção de açúcar e etanol. Entretanto, atualmente existem tecnologias melhores e um grande espaço para o aumento da eficiência e expansão destes sistemas, principalmente no que se refere a cogeração voltada para a venda de excedentes de energia às concessionárias.

De acordo com Brandão (2004), a cogeração é definida como um processo de produção e exploração consecutiva (simultânea) de três fontes de energia, a elétrica, a mecânica e térmica, a partir de um sistema que utiliza o mesmo combustível permitindo aperfeiçoar e melhorar a eficiência nos sistemas de conversão e utilização de energia.

Em instalações industriais, com consumo de calor e eletricidade, deve-se prever a interligação com a concessionária de energia elétrica, para manter o suprimento em caso de paralisação do sistema de cogeração. Assim, é interessante para a indústria comercializar a eletricidade excedente, como exemplificado na Figura 01.

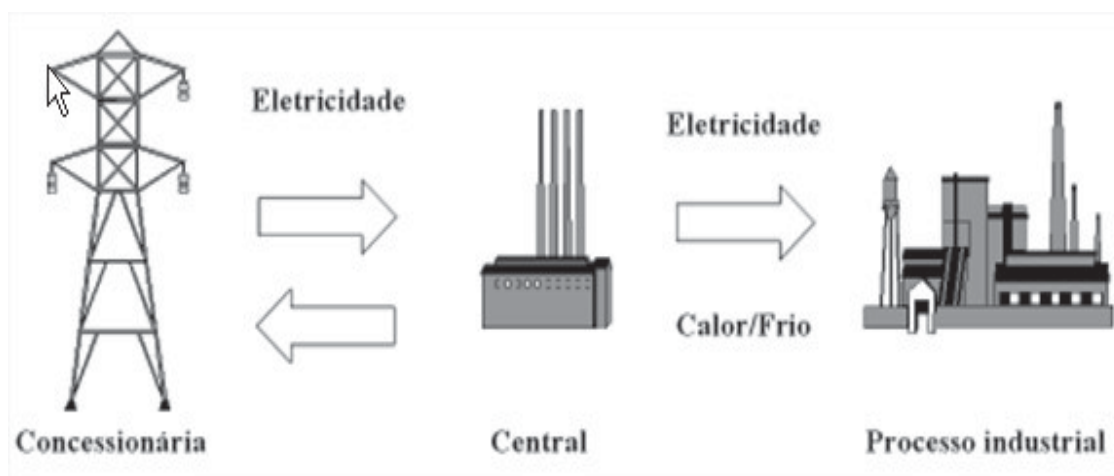


Figura 01. Esquema de um sistema de cogeração industrial
 Fonte: (LORA; NASCIMENTO 2004)

Conforme Koblitz (2007) os procedimentos para o aumento da geração elétrica no setor sucroalcooleiro estão atrelados: ao aumento da eficiência, da pressão e da temperatura das caldeiras; implantação de turbinas de contra-pressão e condensação.

Conforme União dos Produtores de Energia (UDOP, 2011), cada tonelada de cana-de-açúcar tem um potencial energético equivalente ao de 1,2 barril de petróleo. Em média, 55% da cana-de-açúcar brasileira é transformada em etanol, 45% em açúcar e o bagaço de cana-de-açúcar é usado para produzir a energia elétrica. Outros derivados podem ser produzidos, como: papel, plásticos, produtos químicos, entre outros.

Um estudo realizado para a safra 2009/2010, ressalta que o funcionamento de uma unidade de produção sucroalcooleira requer o uso de três tipos de energia: térmica, utilizada no cozimento do açúcar e/ou na destilação do álcool etílico; mecânica, utilizada na maior parte das unidades para mover as moendas que, por um processo de desfibramento e compressão, retiram o caldo da cana e a sacarose nele presente; e a energia elétrica para a iluminação, funcionamento dos motores e bombas d'água que movimentam todo o sistema industrial, além de fazer funcionar o sistema chamado de ferti-irrigação, esse sistema consiste no aproveitamento da vinhaça líquida resultante da destilação do etanol, aplicando-a nos canaviais (BRASIL, 2011a).

A consecução desses três tipos de energia é feita através da queima do bagaço em fornalhas que aquecem as caldeiras para a produção de vapor. A quantidade e a

temperatura máxima do vapor obtido dependem da capacidade e resistência das caldeiras. A tradição brasileira definiu um padrão de caldeira com pressão nominal de 2,06 Mpa. Essas caldeiras, em número compatível com a dimensão da unidade, produzem a quantidade de vapor necessária para fazer funcionar todo o complexo industrial e incinera todo o bagaço produzido nas moendas a cada safra, sem deixar excedentes para a safra subsequente que tenderiam a se transformar em problemas ambientais. Esse processo tradicional sempre garantiu a funcionalidade do sistema, a auto-suficiência energética da unidade com a ausência de resíduos sem destino. No Planejamento Nacional de Energia, conforme mostra a foram estudadas inferências sobre possíveis cenários de produção de cana-de-açúcar, resíduos industriais e palha.

Tabela 03. Cenário de referências do setor sucroalcooleiro, expansão da produção de cana-de-açúcar, recuperação da palha, uso do bagaço para hidrólise e oferta da biomassa residual.

Brasil	2005	2010	2020	2030
Produção de cana-de-açúcar (10 t.ano ⁻¹)	431,4	518,4	849,2	1.141,2
Área Plantada (milhões de ha)	5,6 6	6,9 1	10,6	13,9
Produção de açúcar (10 ⁶ t.ano ⁻¹)	28,5 3	32,0	52,0	78,0
Produção de etanol (10 ⁶ m ³ .ano ⁻¹)	16,5 2	24,0	48,0	66,60
Oferta Mássica de Biomassa do Setor Sucroalcooleiro				
Resíduos do setor sucroalcooleiro (10 ⁶ t.ano ⁻¹)	118,6	142,6	233,5	313,8
Cana-de-açúcar (bagaço) 10 ⁶ t.ano ⁻¹)	58,2	70,0	114,6	154,1
Cana-de-açúcar (palha) (10 ⁶ t.ano ⁻¹)	60,4	72,6	118,9	159,8
Cenário de Recuperação da Palha no Campo				
Recuperação da palha (10 ⁶ t.ano ⁻¹)		3,6	17,7	32,0
Proporção da palha total (%)		5,0%	14,9%	20%
Cenário de oferta da biomassa				
Resíduos do Setor Sucroalcooleiro (10 ⁶ t.ano ⁻¹)	57,8	73,3	132,3	185,8
Destinação da Biomassa				
Hidrólise e outros usos (10 ⁶ t.ano ⁻¹)		0,3	17,7	18,7
Sistemas geradores de energia – eletricidade e calor	57,8	73,0	114,6	167,1

Fonte: Correa Neto (2008)

A oferta de biomassa do setor foi associada à capacidade de produção existente de cana-de-açúcar e à capacidade de produção adicional, que deverá ser expandida como nas projeções.

Esta opção reflete o entendimento de que novas áreas de produção

agrícola serão implantadas para o atendimento da capacidade de processamento adicional, para produção de açúcar e etanol, e serão implementadas incorporando os novos paradigmas tecnológicos do setor, onde a mecanização da cultura e a recuperação da palha apresentem maiores viabilidades, de forma a permitir o aproveitamento econômico dessa biomassa, seja como combustível ou como matéria-prima para produção de energia.

Para Côrrea Neto (2001), Brasil (2005) pode-se destacar no setor sucroalcooleiro, que as plantas de cogeração mais comuns são concebidas com caldeira e turbina a vapor, utilizando o ciclo termodinâmico de *Rankine*. Na Figura 02 o combustível, fonte de toda a energia produzida pela planta, é direcionado para queima numa caldeira e o vapor gerado, de alta pressão, é levado a uma turbina a vapor, de contrapressão ou de condensação com extração, que aciona o gerador elétrico.

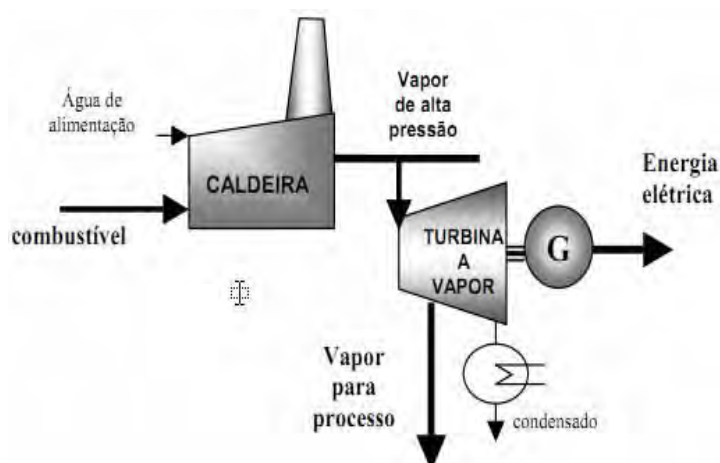


Figura 02. Cogeração com ciclo de *Rankine*
Fonte: Brasil (2005)

A cogeração no Brasil está concentrada nos setores industriais sucroalcooleiro, de papel e celulose, siderurgia e petroquímica. Estes segmentos possuem resíduos de seus processos que utilizados como combustíveis em caldeiras, com a cogeração de energia e calor (LORA e NASCIMENTO, 2004). Já a participação da cogeração com o objetivo de gerar eletricidade em determinados países como a Dinamarca, Finlândia, Holanda, Letônia e Rússia atingem um patamar de 30% da geração total (IEA, 2009).

Para Brasil (2005), a cogeração apresenta diversos aspectos que atraem as empresas para esta alternativa. Primeiramente destacam-se a redução de custos operacionais,

visto que em muitas empresas a participação do custo de energia no custo final do produto pode ser muito grande e a possibilidade de aumentar a eficiência no aproveitamento da energia adquirida ser atraente. Outro ponto importante está na confiabilidade, já que um sistema de cogeração é, na prática, um sistema de autoprodução de energia elétrica, obtida com equipamentos reconhecidamente confiáveis e com combustíveis cujo fornecimento não está tão sujeito aos tipos de interrupções que, em certos lugares, ocorrem no suprimento de energia elétrica.

Considerando os resultados em base úmida, para cada 100 toneladas de cana-de-açúcar no campo, cerca de 20 toneladas é formada pelas folhas e ponteiros e 80 toneladas por colmos industrializáveis. Essa relação é bastante variável no decorrer da safra em função da variedade, estágio de desenvolvimento vegetativo e clima. Os colmos da cana-de-açúcar na época de colheita apresentam umidade em torno de 70% e a umidade das folhas verdes entre 60 e 80%, dependendo da quantidade de ponteiros existentes. A umidade das folhas mortas podem variar de menos de 10% até quase 30%, dependendo das condições climáticas na ocasião da amostragem. No campo, a palha apresenta diversos benefícios agrônômicos e algumas desvantagens; na indústria a palha pode se tornar fonte de energia, o que também exige tecnologia e investimento. Os resultados verificados nos ensaios realizados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), mostram que em média tem-se 140 kg de palha em base seca por tonelada de colmos de cana-de-açúcar (CTC, 2010).rever paragrafo

Maiores quantidades de bagaço e a substituição de caldeiras poderão gerar maiores quantidades de energia com ganhos de eficiência energética. Atualmente cerca de 56% da área cultivada com cana-de-açúcar é colhida mecanicamente no estado de São Paulo (UDOP, 2010).

Embora o setor sucroalcooleiro demonstre excelente potencial de cogeração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais, a produção de energia elétrica para a venda às concessionárias ainda é incipiente, e a falta de medidas como a adoção de tecnologias para o aumento da eficiência, expansão destes sistemas de geração de energia, programação regular de leilões específicos para essa fonte, bem como, soluções definitivas para os problemas de conexão, tem dificultado as decisões de investimento por parte dos empreendedores.

De acordo com estudo realizado sobre a Matriz Energética 2030 (2007),

entre as possibilidades tecnológicas consideradas, o ciclo de cogeração a vapor com turbinas de contrapressão é o que apresenta melhores perspectivas de aplicação, tendo em vista que os sistemas de atendimento energético em usinas sucroalcooleiras são, necessariamente, ciclos de cogeração *topping* a vapor, devido à necessidade de atendimento às demandas energéticas do processo.

Os ciclos com turbinas de contrapressão privilegiam a eficiência energética pela elevação da eficiência geral da caldeira, dos níveis de pressão e de temperatura desse vapor, que passa a patamares de 80 a 100 kgf cm⁻², podendo atingir valores de 150 a 180 kgf cm⁻².

A longo prazo, os ganhos de eficiência no processo produtivo com as melhorias nas tecnologias, as turbinas a vapor podem apresentar melhores especificações fluído-mecânicas e termodinâmicas, com maior número de estágios e melhores desempenhos.

A Figura 03 apresenta a evolução da estrutura do parque de processamento de cana-de-açúcar segundo as tecnologias de geração de energia elétrica.

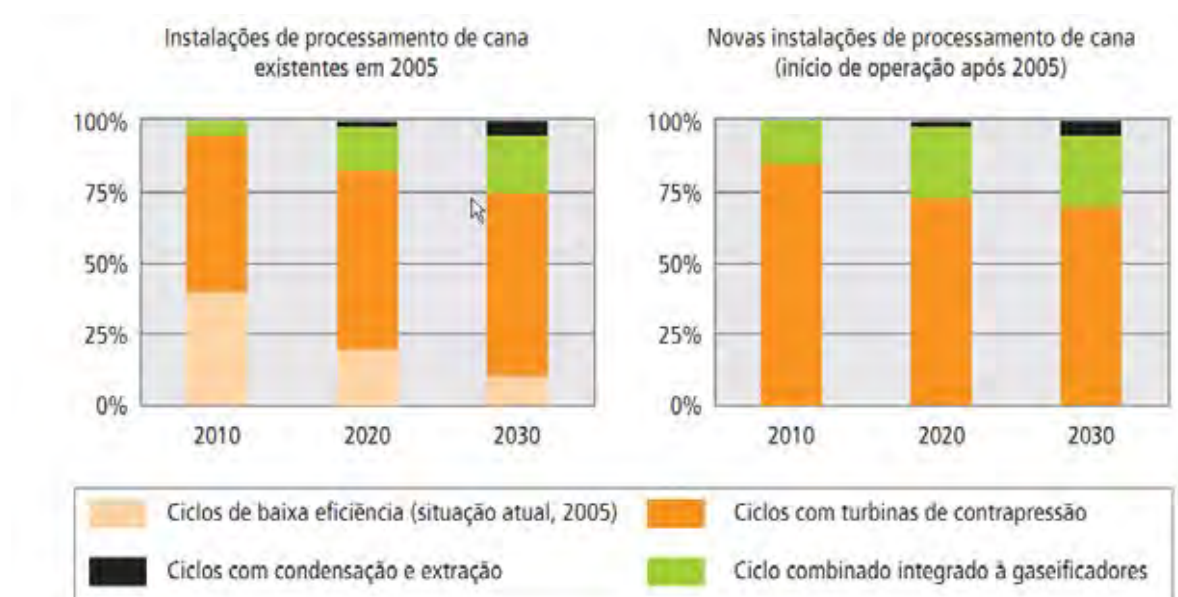


Figura 03. Cenário de evolução da estrutura do processamento de cana-de-açúcar, segundo as tecnologias de geração de eletricidade.

Fonte: (MME e EPE, 2007b)

Portanto, passou-se a repensar o consumo de vapor de processo, e na

substituição de acionamentos mecânicos de baixa eficiência (turbinas a vapor de simples estágio) por motores elétricos, na substituição das turbinas de simples estágio para múltiplos estágios e na geração de energia elétrica através de máquinas térmicas mais eficientes; de múltiplos estágios, podendo ou não ser de extração-condensação (ROCHA, 2010).

O autor ressalta que somente 22% das usinas, aproximadamente 88 unidades comercializam os seus excedentes de energia elétrica, sendo 54 centrais de cogeração exportando energia elétrica para a rede dentro do estado de São Paulo e 34 centrais em outros 11 estados.

Somente em São Paulo, a reserva de cana-de-açúcar permitiria enviar 4.800 MW médios para a rede em 2017/2018, valor 20% superior ao atualmente gerado em todo o complexo da Companhia Energética de São Paulo.

De acordo com Fonseca (2007) para dimensionar os equipamentos em usinas sucroalcooleiras visando a produção de energia elétrica, deve-se verificar que a geração de energia em grande parte tem caráter sazonal e o sistema também precisa ser projetado para o período de entressafra, no qual as obras de ampliação não são, necessariamente, as mesmas previstas para a safra.

De acordo com informações descritas no Plano Nacional de Energia- (PNE 2030) sobre os mecanismos de promoção para eficiência energética, o uso racional do bagaço constitui uma típica solução de geração distribuída. Os locais das usinas de açúcar e etanol são geralmente próximos aos centros de consumo elétrico, com capacidade para produzir de 20 a 200 MW cada uma, conforme a região, com características de produção e diferentes tecnologias industriais (MME; EPE, 2007b).

Em estudos realizados por Silva (2010) as projeções das quantidades de bagaço e do potencial de energia que pode ser gerada com uma tonelada de cana-de-açúcar são:

- 82,3 a 85,5 L de etanol, (ANDRIETTA, 2009);
- 250 kg de bagaço, (UNICA, 2009);
- 204 kg de palha e pontas, (CASTRO et al., 2009)

Em média, cada tonelada de cana-de-açúcar processada requer cerca de 12 kWh de energia elétrica (KITAYAMA, 2008; BITTENCOURT, 2008).A quantidade de

energia produzida (kWh) por tonelada de bagaço de cana-de-açúcar, pode variar dependendo do grau tecnológico de cada usina.

Conforme Castro, Dantas e Brandão (2009) a tecnologia que hoje é adotada em vários projetos *greenfield* é a tecnologia de extra-condensação, que permite gerar significativos excedentes de energia elétrica a baixos custos. Esta tecnologia é capaz de produzir em torno de 96 kWh por tonelada de cana-de-açúcar processada, dos quais, em média, 80 kWh podem ser exportados. Estes números têm como base apenas a utilização do bagaço de cana, ao se adicionar a queima da palha é possível gerar até 200 kWh por tonelada de cana-de-açúcar processada (KITAYAMA, 2008).

Na cana-de-açúcar. Tabela 04, têm-se o potencial de cogeração do estado de São Paulo, situação e previsão de energia excedente em usinas que utilizam bagaço da cana-de-açúcar. Tabela 04. Potencial de cogeração, situação e previsão de acordo com pressão da caldeira (bar) para o estado de São Paulo.

Pressão Caldeira (Bar)	Consumo interno (kWh.tc ⁻¹)	Energia excedente (kWh.tc ⁻¹)	Participação de cana (%)				Energia Excedente 2020 (GWh)
			2006	2010	2015	2020	
21	35	1,6	46	40	25	12	99,7
42	35	18	11	10	9	8	747,4
60	40	40	35	40	40	40	8.304
90	50	95	8	12	20	40	19.722
							28.873,1

Fonte: (NEGRI, 2009).

Comentara a tabela

Conforme Hollanda (2007), ainda há resistência por parte das concessionárias de energia elétrica em patrocinar o emprego de equipamentos mais eficientes para seus consumidores. As empresas estão cada vez mais conscientes de que a ineficiência no uso final de seus consumidores tende a ser um péssimo negócio em longo prazo e de que há mecanismos que podem transformar estas imperfeições de mercado em receita.

Uma das principais dificuldades associadas a qualquer programa de conservação de uso final de energia, no entanto, é o de medir e avaliar o gasto de energia que

deixa de acontecer. A idéia é difícil de ser absorvida em um ambiente de negócios em que a receita depende da venda de kWh.

Para realizar o gerenciamento dos recursos energéticos de uma determinada instalação industrial, é fundamental ter a disposição informações confiáveis, baseadas em dados coletados em tempo real e também dados históricos, enriquecidos por relatórios analíticos e gráficos, que facultem o perfeito acompanhamento das condições técnicas e econômicas das instalações em estudo.

3.4 Indicadores de eficiência energética

No setor industrial, a eficiência energética (η) pode ser medida pela quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada do produto (PATTERSON, 1996; DOMANSKI, 2011), definida pela Equação 1:

$$\eta = \frac{\text{saídas úteis de processo}}{\text{energia de entrada em um processo}} \quad (1)$$

Para Tanaka (2008) o rendimento energético na indústria se dá pela relação entre as entradas de matéria-prima e insumos energéticos e as saídas úteis (descontando as perdas no processo como de materiais e energia). Conforme Patterson (1996) saídas úteis de um sistema ou processo não são necessariamente uma produção de energia, podem ser toneladas de produto, algum resultado fisicamente definido ou saídas em termos de preços de mercado.

Para Ferreira (1994), os indicadores energéticos podem ser definidos como macro-indicadores (quando caracterizam a eficiência de um país ou região) e micro-indicadores (quando caracterizam a eficiência de uma empresa, edifício ou habitação). Esses indicadores podem ser divididos em função dos seus objetivos em duas categorias:

- Indicadores descritivos: quando caracterizam a situação de eficiência energética sem procurar justificativa para as causas ou desvios;

- Indicadores explicativos: quando explicam as razões pelas quais se deram variações ou desvios nos indicadores descritivos, ou seja, ajudam a identificar a contribuição dos vários efeitos que podem ser tecnológicos, estruturais ou comportamentais nas variações da eficiência energética.

Conforme Patterson (1996) e Tanaka (2008), a eficiência energética é um conceito fundamental para países desenvolvidos, com objetivos competitivos, comercial, industrial e de segurança energética. Para os autores, há quatro grupos de indicadores que podem ser usados para monitorar mudanças em eficiência energética, são eles: indicadores termodinâmicos; indicadores físico-termodinâmicos; indicadores econômico-termodinâmicos; indicadores econômicos.

De acordo com Abreu, Oliveira e Guerra (2010) o principal objetivo dos indicadores energéticos na indústria é proporcionar um entendimento maior da influência técnico-econômica no total do consumo final de energia e individualmente dos subsetores ou filiais.

De acordo com Bor (2008) os indicadores físico-termodinâmicos e econômico-termodinâmicos são ferramentas utilizadas em trabalhos relacionados com Indicadores de Eficiência Energética (IEE) e faz-se necessário para o Consumo Específico de Energia (CEE) necessária para calcular o IEE.

Estudos mostram que o indicador de CEE pode ser utilizado em diferentes fronteiras de sistemas para avaliar a eficiência energética, destacados, por exemplo, na comparação internacional de eficiência energética de diferentes segmentos industriais na avaliação de eficiência energética da indústria de papel e celulose de oito países, na comparação de indicadores físicos e econômicos para o consumo de energia na indústria de ferro e aço em sete países (em um trabalho destinado a monitorar a melhoria da intensidade energética (FARLA; BLOK, 2000);

Para Ferreira (1994) os indicadores de eficiência energética são estabelecidos através de relações e de variáveis que podem ser usadas ao nível macro e micro com o objetivo de monitorar variações e desvios na eficiência energética dos sistemas.

Para Yamada, Kato e Porto (1998) o setor de planejamento e controle da produção em usinas sucroalcooleiras envolve o inter-relacionamento de todos os seus componentes, da área agrícola à industrial.

Conforme Filgueira, Pinto e Rodrigues (2006) o uso de medidores de energia servem como base para o projeto de combate ao desperdício de energia e devem possuir, no mínimo, os seguintes recursos:

- Memória de massa para armazenamento de dados;
- Possibilidade de medição em sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos;
- Controle de demanda e fator de potência;
- Ligação direta a sinais de tensão e corrente provenientes dos circuitos secundários dos transformadores de corrente (TC's) e dos transformadores de potência (TP's);
- Monitoramento das formas de onda de tensão e corrente em tempo real;
- Relógio e calendário;
- Registro de falhas no fornecimento de energia e de acionamentos da proteção com data e hora em que ocorreram.

A elevada competitividade no setor sucroalcooleiro tem desencadeado um processo de modernização das plantas industriais de unidades produtoras de açúcar, etanol e energia. Além da preocupação ambiental, as novas plantas, preparadas para futuras expansões estão compromissadas com a melhoria de performance, evoluções tecnológicas, inovações no processo e até mesmo aspectos associados à responsabilidade social. A bioeletricidade é o terceiro produto e relaciona-se diretamente com caldeiras de alta pressão, acionamentos elétricos e outras alterações na configuração das usinas, que passam a ser chamadas também de centrais energéticas.

Conforme Domanski (2011) os motores elétricos são equipamentos utilizados em larga escala na indústria, sendo o princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico, converter energia elétrica em energia mecânica, ou no processo inverso funciona como gerador. Um bom dimensionamento se dá quando o fator de carregamento for maior que 75%, sendo que o máximo rendimento do motor não é em plena carga, mas em algum ponto entre 80% e 90%. Em motores sobre-dimensionados sem necessidade para sua aplicação, deve ser feito uma análise econômica para sua substituição. Nesta análise leva-se em

consideração que a economia pela redução das perdas ao longo da vida residual do motor existente, deve ser suficiente para pagar o investimento em um motor novo (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2007).

3.5 Parâmetros que interferem no uso da energia elétrica

3.5.1 Fator de carga

De acordo com Cremasco (2008) o fator de carga é o índice que mostra se a energia elétrica está sendo utilizada de forma racional por um determinado consumidor.

O fator de carga é um índice obtido através da relação entre a demanda média (kWh) e a demanda máxima medida (kWh), durante um período de tempo definido, conforme Equação 2:

$$\text{Fator de Carga} \frac{\text{Demanda média}}{\text{Demanda máxima medida}} = \quad (2)$$

O fator de carga varia de 0 a 1 e, quanto maior este índice, mais adequado e racional é o uso da eletricidade (HORTELAN ANTONIO, 2007)

Devido à relação existente entre energia (kWh), demanda média

$$\text{Demanda Média} \times \text{Tempo} \Rightarrow \text{Demanda Média} = \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo}} =$$

conforme Equação 3:

$$\text{Energia}$$

$$\text{Fator de Carga} \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo} \times \text{Demanda máxima medida}} = \quad (3)$$

3.5.2 Fator de potência

O indicador de fator de potência é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Ele indica a eficiência no uso da energia, assim um alto fator de potência indica uma eficiência alta e inversamente, um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética (CANEPPELE, 2011).

Um triângulo retângulo é frequentemente utilizado para representar as relações entre potência ativa (kW), potência reativa (kVAr) e potência aparente (kVA), conforme a Figura 04.

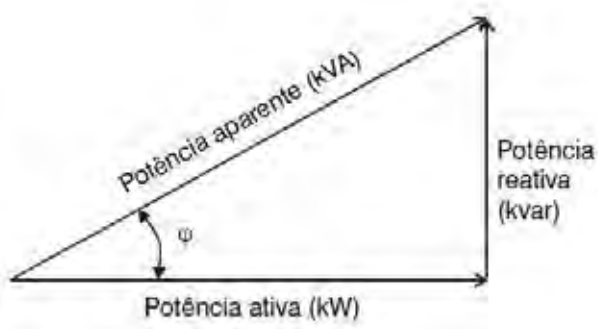


Figura 04. Triângulo retângulo de potência

Pode-se considerar o fator de potência como a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período específico, conforme mostra a Equação 4.

$$FP = \left(\frac{P}{\sqrt{(P)^2 + (Q)^2}} \right) \quad (4)$$

Em que:

FP = valor do fator de potência;

P = potência ativa, em [kW];

Q = potência reativa, em [kVAr].

De acordo com Guelfi (2007), Cremasco (2008), a potência ativa é

aquela que produz trabalho útil, expressa em quilowatt (kW). A potência aparente é a potência total absorvida por uma instalação elétrica, usualmente expressa em quilovolt-ampère (kVA) e é obtida da soma geométrica da potência ativa com a potência reativa.

A potência reativa é aquela utilizada para criar o fluxo magnético necessário ao funcionamento dos equipamentos industriais (motores, transformadores, reatores, entre outros.) sendo usualmente expressa em quilovolt-ampère-reativo (kVAr).

Conforme Companhia Energética de São Paulo (CESP, 1990), o fator de potência, quando mantido a índices inferiores a 92% provoca diversos inconvenientes, entre eles, um acréscimo na conta de energia elétrica. Os componentes dos sistemas elétricos (geradores, circuitos de transmissão e distribuição, transformadores, instalações internas dos consumidores entre outros) quando operados com excesso de potência reativa, comprometem desnecessariamente a componente ativa da potência total ou aparente. Assim as principais causas do baixo fator de potência são:

- motores operando a vazio;
- motores superdimensionados;
- transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas;
- nível de tensão acima do normal.

Quando o fator de potência é corrigido e elevado para 0,92 ou mais, utiliza-se a energia de forma mais eficiente e econômica, ou seja: melhora o aproveitamento da energia elétrica para geração de trabalho útil, diminuem as variações de tensão (oscilações), melhora o desempenho dos equipamentos com menos consumo, aumenta a vida útil dos equipamentos, os condutores tornam-se menos aquecidos, diminuindo as perdas de energia elétrica na instalação, devido à liberação de carga e a capacidade dos transformadores alcança melhor aproveitamento (COPEL, 2005).

3.6 Lógica Fuzzy

Historicamente as primeiras aplicações práticas da lógica *fuzzy* foram implementadas em controles de processos baseados nas teorias de Zadeh (ZADEH, 1965).

Conforme Zadeh (1965), a teoria dos conjuntos *fuzzy* tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a formulação e solução de problemas bastante complexos ou mal formulados sob o ponto de vista das técnicas convencionais.

Segundo Shaw e Simões (1999), a lógica *fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque *fuzzy* tem valor prático, tornando possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

Há diversos cenários em que modelos matemáticos exatos, criados a partir de fenômenos empíricos, falham em fazer previsões. Alguns aspectos da realidade apresentam pouca exatidão, em alguns casos, pouca necessidade de exatidão (SILVA et al., 2005).

A complexidade dos sistemas em usinas de açúcar e etanol, a variedade de equipamentos e tipos de equipamentos, a variabilidade de configurações de equipamentos produtores e consumidores de energia entre outros fatores tornam a tarefa de análise da eficiência energética complicada. A utilização da lógica *fuzzy* pode auxiliar nessa tarefa.

Segundo Souza (2004), muitos fenômenos são compreendidos através de simulações que representam determinado comportamento em um sistema específico, podendo ser analisado por simulações clássicas ou através de simulações que utilizem os sistemas inteligentes (programas de computador que respondem aos dados de entrada, dando respostas baseadas na lógica do raciocínio humano). No entanto, quando se trata de sistemas complexos com a mesma finalidade, como usinas de açúcar e etanol, mas que operam com diferentes configurações essa tarefa torna-se inviável para ser feita de forma matematicamente exata.

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais abrangente, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o número um representa completa pertinência e o número zero indica uma completa exclusão. Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica. O objetivo da lógica *fuzzy* é gerar uma saída lógica a partir de um conjunto de entradas não precisas, com ruídos ou até

mesmo faltantes. Desse modo, apresenta as seguintes características em relação a outras técnicas de controle:

- Robusta, pois não requer entradas precisas;
- Fácil de modificar, pois é baseada em regras;
- Controle de sistemas não-lineares sem modelo matemático;
- Solução mais rápida e barata em alguns casos;
- Implementável facilmente em microprocessadores.

A *fuzzyficação* é o processo de transformação da entrada em graus de pertinência ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação ou adjetivação da entrada, ou seja, é a transformação de um número ou conjunto da lógica tradicional em um conjunto *fuzzy*. Por exemplo, um questionário pode perguntar por nomes de todas as pessoas com mais de 1,80 m de altura. A *fuzzyficação* deste questionário pode produzir um conjunto *fuzzy* compreendendo todas as pessoas consideradas altas, ou seja, maior que 1,80 m.

3.6.1 Conjuntos fuzzy

Conforme Bando (2002), estudos de associações, relações ou interações entre elementos de diversas classes, são de grande interesse na análise e compreensão de muitos fenômenos do mundo real. Matematicamente, o conceito de relação é formalizado a partir da teoria de conjuntos. Uma relação clássica descreve a inter-relação entre dois ou mais objetos e, sendo um conjunto, é representada por sua função característica.

Conforme Tanscheit (2004) e Peixoto (2005), na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Dado um conjunto A em um universo X , os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Desse modo, pode ser expresso pela função característica f^A :

$$f^A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

Conforme Zadeh (1965), é possível generalizar a função característica de modo a obter um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* A em um universo X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$, e representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \quad x \in X$$

Assim, $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com o conjunto A . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, com diferentes graus de pertinência.

Conforme Peixoto (2005), as funções de pertinência *fuzzy* representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. Desse modo uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores de uma variável em seu conjunto universo. O universo de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir.

3.6.2 Regras e variáveis lingüísticas

Uma variável lingüística assume valores que são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável lingüística assumindo valores “baixa”, “média”, e “alta”. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 05:

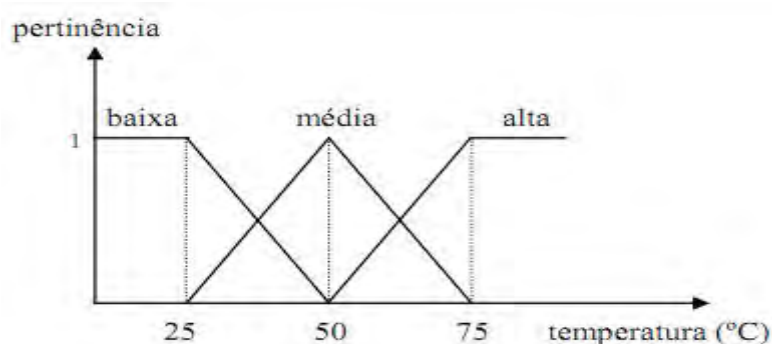


Figura 05. Funções de pertinência para a variável temperatura

Fonte: Peixoto (2005)

De modo geral, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem específica, construídas a partir de termos primários, por exemplo, “alto”, “baixo”, “pequeno”, “médio”, “grande”, “zero”, entre outros e de conectivos lógicos como negação “não”, conectivos “e” e “ou”, de modificadores como “muito”, “pouco”, “levemente”, “extremamente” e de delimitadores como parênteses.

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definida. Assim, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais (PEIXOTO, 2005).

3.6.3 Sistema de inferência *Fuzzy*

Basicamente, um sistema baseado em regras *fuzzy* possui quatro componentes: um processador de entrada (ou *fuzzificador*), um conjunto de regras linguística, um método de inferência *fuzzy* e um processador de saída (ou *defuzzificador*), gerando um número real como saída (RIBACIONKA, 1999; PEIXOTO, 2005). A Figura 06 mostra um sistema *fuzzy* à arquitetura de sistemas baseados em regras *fuzzy*.

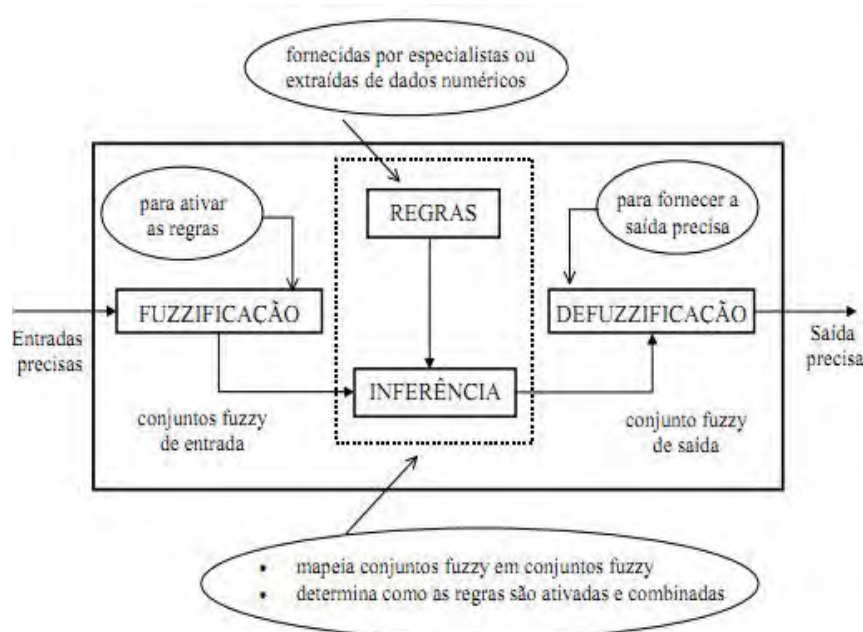


Figura 06. Estrutura geral de um sistema *fuzzy*
Fonte: Tanscheit (2004)

Conforme Tanscheit (2004) neste sistema de inferência *fuzzy*, consideram-se entradas não-*fuzzy*, ou precisas resultantes de medições ou observações (conjuntos de dados, por exemplo), que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disto, é necessário efetuar-se um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de *fuzzificação*. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação.

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência no estágio de *defuzzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação. Isto é necessário pois para aplicações práticas são requeridas saídas precisas. No caso de um sistema de controle, se efetuado por um sistema de inferência *fuzzy* (ou controlador *fuzzy*), este deve fornecer à planta dados ou sinais precisos, já que a apresentação de um conjunto *fuzzy* à entrada da planta não teria significado algum.

Para Shaw, Simões (1999) e Peixoto (2005) a *fuzzificação* é o processo pelo qual os valores de entrada do sistema são convertidos para conjuntos *fuzzy*, com as faixas de valores onde estão definidos. Considera-se um mapeamento do domínio de números reais

para o domínio *fuzzy*. A *fuzzificação* representa que há atribuições de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. A *fuzzificação* pode ser entendida como pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo o número de valores a serem processados.

Conforme Amendola, Souza e Barros (2004, p.9), um sistema *fuzzy* é uma função de R^n em R , construída de alguma maneira específica. Os módulos que seguem indicam a metodologia para a construção desta função:

Módulo de *fuzzificação* é o que modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos *fuzzy*. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência;

Módulo da base de regras é o que constitui o núcleo do sistema. É neste módulo onde se armazenam as variáveis e suas classificações linguísticas;

Módulo de inferência é onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema *fuzzy* já que ele fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada *fuzzy*; e

Módulo de *fuzzificação* que traduz o estado da variável de saída *fuzzy* para um valor numérico.

3.6.4 Programas computacionais

Existem diversos programas de computador disponíveis para aplicação e o uso da lógica *fuzzy*. Pode-se encontrar desde programas prontos para criar as regras até ambientes onde o usuário pode criar um programa mais específico para o problema que deseja abordar.

De acordo com Cremasco (2008) e Canepelle (2011) um dos programas mais conhecidos e utilizados é o MATLAB, que visa uma linguagem de alto nível. Ele integra

computação, visualização e programação em um ambiente acessível, onde problemas e soluções são expressos em notação matemática.

Há outros similares como o Mathematica, o Mapple e o SciLab, sendo este último um programa de distribuição livre. Para o uso exclusivo com sistemas *fuzzy* há o *Fuzzy Tech*.

Os programas computacionais fornecem possibilidades aos usuários de utilizar seu modo padrão de regras *fuzzy* através de um programa executável ou seu modo para desenvolvimento de programas mais específicos através da programação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

A escolha das usinas, localizadas na região Centro-Oeste do estado de São Paulo, justifica-se por serem empresas com potencial de produção e exportação de produtos como o açúcar e etanol e de cogeração de energia.

Considerando a produção e comercialização, as usinas estão ligadas a um grupo de unidades industriais que produzem energia que é comercializada no sistema nacional de distribuição de energia elétrica. Os dados coletados nas usinas terão o sigilo mantido como parte do acordo para a execução das pesquisas. Para cada usina foi atribuída uma sigla: USA, USB e USC.

4.1.1 Caracterização das usinas

Na Tabela 05 são mostradas as informações técnicas sobre as usinas, considerando o período de 48 horas de produção nos meses de julho a dezembro, durante a safra 2008/2009.

Tabela 05. Valores médios característicos das usinas para o período analisado

Descrição das usinas	USA	USB	USC
Moagem de cana-de-açúcar [t]	70.609	20.217	17.238
Produção de Etanol [l]	3.013.000	813.350	628.303
Resíduo gerado (Bagaço) [t.h ⁻¹]	709,17	210,83	89,78

4.1.2 Setores analisados nas usinas

Em cada usina, os cinco setores selecionados para avaliação foram: recepção, moagem, caldeiras, atividades auxiliares/tratamento do caldo e destilarias. Na Figura 07 tem-se fluxograma básico do processamento da cana-de-açúcar.

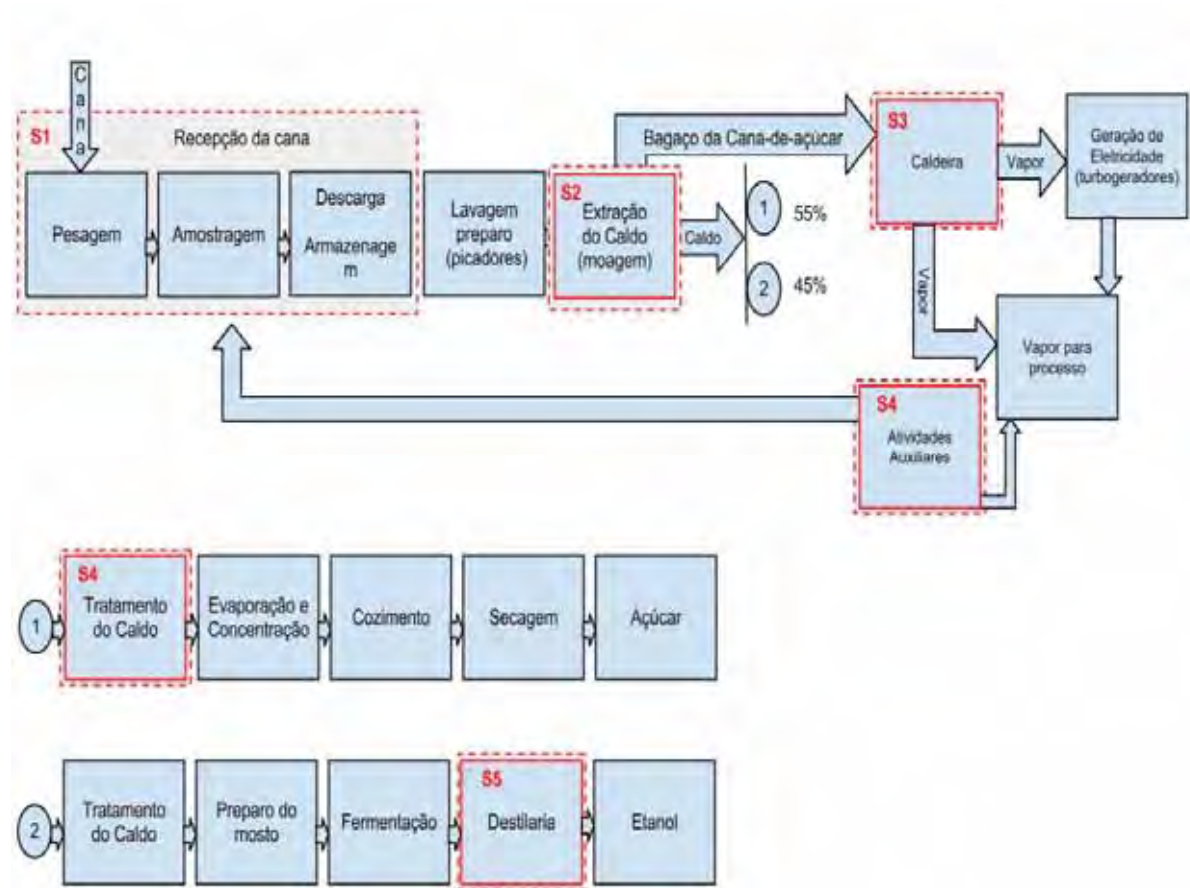


Figura 07. Fluxograma básico do processamento da cana-de-açúcar

Setor de recepção: ao chegar a cana-de-açúcar na usina seu peso é

determinado em toneladas. Após a amostragem é descarregada em uma mesa alimentadora e é feita a retirada das impurezas carregadas do campo, principalmente da areia, argila, palha e pedras, em seguida é feita a lavagem e finalmente segue para a moagem;

Setor de moagem: após o preparo, a cana desfibrada é enviada à moenda para ser moída e extrair o caldo. Na moagem a cana desfibrada é exposta entre rolos submetidos a uma determinada pressão expulsando o caldo do interior das células. Este processo é repetido, realizando a embebição cuja função é embeber o interior das células da cana diluindo o açúcar ali existente e com isso aumentando a eficiência da extração, conseguindo-se assim extrair aproximadamente 96% do açúcar contido na cana. O caldo extraído vai para o processo de tratamento do caldo e o bagaço para as caldeiras.

Setor de caldeiras: o bagaço resultante da moagem da cana é usado como combustível para gerar vapor, movimentar o gerador de eletricidade, turbinas de acionamento dos picadores, moendas e outros dispositivos mecânicos, além de fornecer calor para o processo (FERREIRA, 2008);

Setor de tratamento do Caldo: todas as usinas tem o setor tratamento do caldo, ele compreende as operações de: caleagem; sulfitação (quando caldo para fabricação de açúcar); aquecimento; decantação e filtração. Na usina USA, o tratamento do caldo era atendido pelo setor de atividades auxiliares que também compreende a geração de ar - comprimido. Desse modo o setor 4 na usina USA, denominado de atividades auxiliares, enquanto na USB e USC tratamento de caldo.

Setor de destilarias: o vinho que vem da fermentação possui, em sua composição, 7° a 10°GL (% em volume) de álcool, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. O álcool presente neste vinho é recuperado por destilação, processo que utiliza diferentes pontos de ebulição das substâncias voláteis para separá-las.

4.1.3 Equipamentos utilizados nas medições elétricas

Os equipamentos analisadores e registradores eletrônicos da marca Saga possibilitam a leitura de dados em sistemas elétricos monofásicos ou trifásicos que sejam equilibrados ou não. Os aparelhos são portáteis para uso em redes de distribuição elétrica, podem ser instalados expostos ao tempo ou em cabines primárias e em circuitos diversos de baixa tensão, sem necessidade de desligamento do circuito, desde que atendam as portarias do DNAEE e da ANEEL. SÃO medidores individuais, ou seja, efetuam a leitura de um único circuito elétrico por instalação.

Para armazenar dados os equipamentos possuem memória de massa interna (RAM) que permite registrar os dados de medição sem a necessidade de transferência imediata dos dados do equipamento para o microcomputador ou leitor portátil.

Para facilitar o uso em campo, os analisadores possuem memória suficiente para registrar até dez campanhas de medição sem necessidade de transferência dos dados. É denominada campanha, o período de até uma semana em que o analisador pode ficar instalado em um circuito registrando dados em sua memória. Pode ser feita a programação da data e hora de início da coleta de dados e o intervalo de tempo entre um registro e outro, por exemplo, a cada 15 minutos.

Para transferir os registros efetuados conecta-se o aparelho com um cabo M1000 via porta serial a um microcomputador ou leitor coletor portátil M1000, que é fornecido como parte integrante dos analisadores das famílias SAGA 4000 e 4500.

Após a aquisição dos dados (descarregar) é utilizado um programa de computador chamado PLA WIN para ler as campanhas armazenadas e compor um arquivo para cada campanha, a análise pode ser feita no próprio programa ou exportando-se os dados para uma planilha de cálculos.

Em cada leitura têm-se os seguintes registros:

- Tensão em cada fase, em Volts;
- Corrente por fase, em Ampére;
- Potência ativa trifásica (Pt) e por fase, em kW;
- Potência reativa trifásica (Qt) e por fase, em kVAr;
- Potência aparente trifásica (St), em kVA; e

- Fator de potência trifásico (FPt) e por fase

Para realizar as medições, foram utilizados 5 equipamentos Analisadores de Energia Landys+Gyr SAGA. Na Figura 8, observa-se a instalação de um analisador Saga 4500 na rede trifásica de alta tensão, 13.800 V, da usina USA.



Figura 8. Analisador Saga 4500 utilizado para coleta de dados na usina USA

As coletas de dados elétricos na usina USA foram feitas no sistema de alimentação de cabines de alta tensão com sensores de corrente e a alimentação da tensão através de transformadores de potência de 13800/116 Volts. Na Figura 9 apresenta-se o esquema de ligação realizado com analisador SAGA na usina USA.

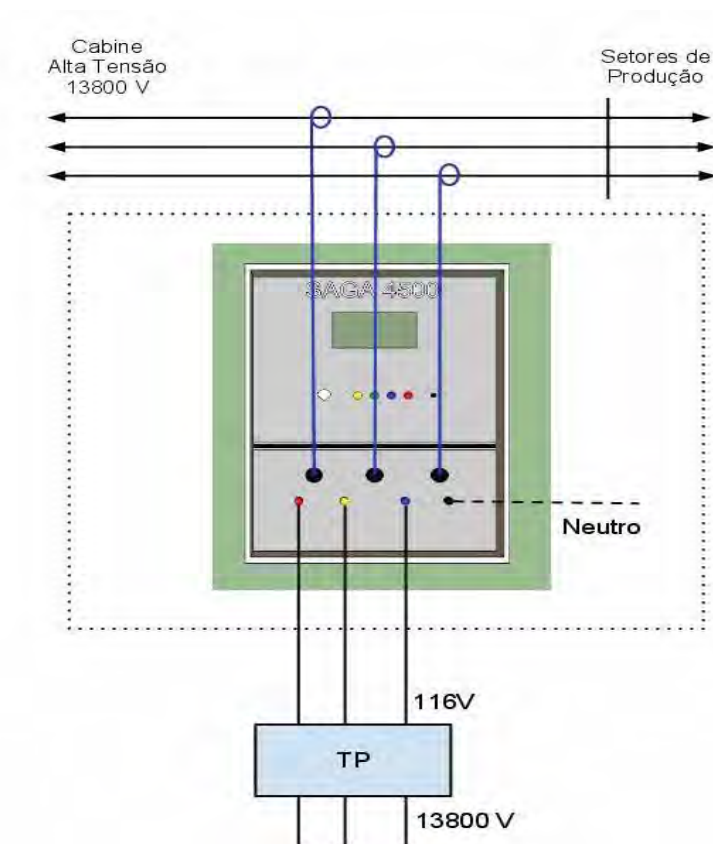


Figura 9. Esquema de ligação das medições realizadas com o analisador SAGA na usina USA

Para as coletas de dados elétricos nas usinas USB e USC, foram utilizados o sistema de alimentação no circuito secundário dos transformadores em 220 Volts, tanto para os sensores de corrente como a alimentação de tensão, conforme a Figura 10.

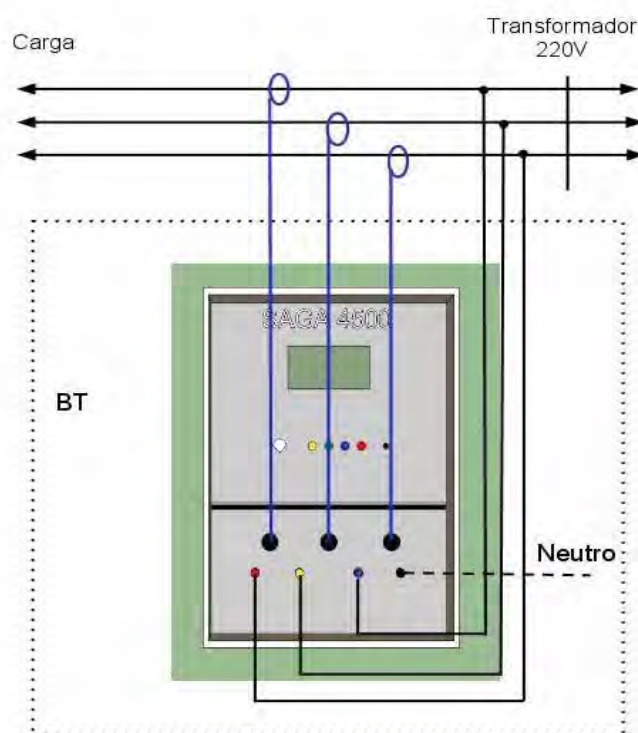


Figura 10. Esquema de ligação das medições realizadas com o analisador SAGA nas usinas USB e USC

As coletas de dados nas usinas foram realizadas de modo a obter dados médios de funcionamento no período da safra, visando caracterizar o consumo médio de energia e a respectiva geração.

4.2 Métodos

O procedimento utilizado envolve as seguintes etapas: coleta de dados para caracterização das usinas, realização das medições, análise dos dados da produção, determinação das variáveis e dos índices de desempenho energético e escolha das variáveis para aplicação do modelo *fuzzy*. O fluxograma da Figura 11 mostra esse procedimento.

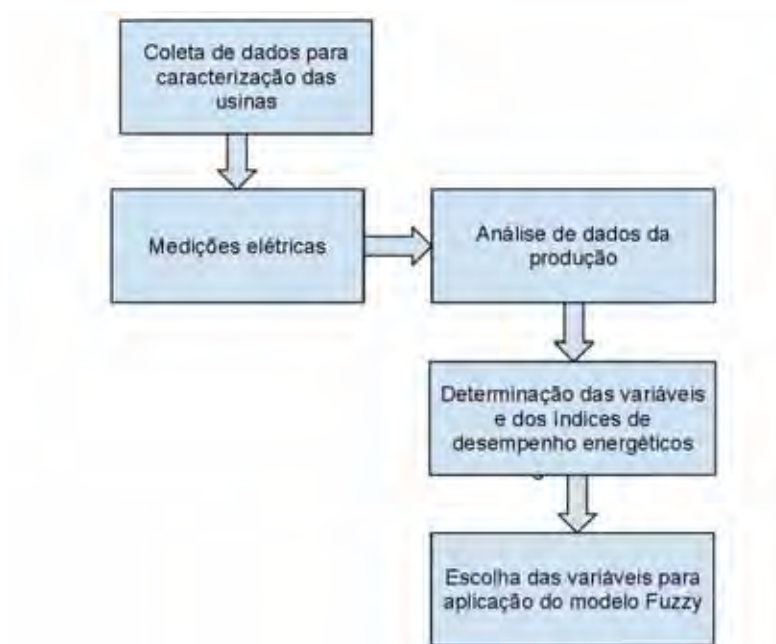


Figura 11. Fluxograma para desenvolvimento da metodologia.

4.2.1 Coleta de dados para a caracterização das usinas

Inicialmente foram enviados ofícios às diretorias das usinas informando sobre o escopo do trabalho de pesquisa e após aprovação foi definido o cronograma de trabalho. Nesta etapa houve a participação dos engenheiros e técnicos responsáveis pela manutenção e gerenciamento da produção de açúcar, etanol e energia elétrica em entrevistas e reuniões.

As coletas de dados nas usinas foram realizadas de modo a obter dados médios de funcionamento no período da safra em que foi realizada a aquisição de dados, visando caracterizar o máximo consumo e a máxima geração. Foram ainda coletados dados de controle interno: quantidade de cana-de-açúcar processada, energia gerada, produção de etanol, considerando todos simultâneos ao período medido, conforme dados cedidos pelas usinas USA, USB e USC, necessários para análise dos índices de desempenho.

4.2.2 Medições elétricas e determinação dos indicadores de eficiência energética

Os analisadores de energia foram instalados nos setores de produção em circuitos de alta tensão e baixa tensão no período de três a cinco dias, e foi escolhido um período de 48 horas de máxima demanda, para realização dos cálculos. Quando necessário foram realizadas medições simultâneas em mais de um setor ou alimentador para se somarem os resultados.

O analisador foi programado para fazer leituras de dados em intervalos de 15 minutos (padrão resolução 465 da ANEEL). Foram realizadas medições individualizadas para cada setor da produção, envolvendo o processo de produção de açúcar e etanol em função dos diagramas elétricos.

As medições foram realizadas no período de julho a dezembro de 2008, coincidindo com o pico da safra na região. Os parâmetros elétricos medidos foram: tensão em cada fase, em Volts; corrente por fase, em Ampére; potência ativa trifásica (Pt) e por fase, em kW; potência reativa trifásica (Qt) e por fase, em kVAr; potência aparente trifásica (St), em kVA; e fator de potência trifásico (FPt) e por fase.

4.2.3 Demanda e consumo de energia por setor e na produção de etanol

Para caracterizar os processos de produção de etanol relacionados aos cinco setores, tanto a demanda quanto o consumo de energia foram calculados considerando o consumo de caldo e quantidade de cana-de-açúcar processada. A repartição do caldo é feito na proporção de 45% para a produção de etanol e 55% para a produção do açúcar como é usualmente feito nas usinas.

A usina USA possui um setor de atividades auxiliares, que constitui um diferencial na distribuição elétrica. O consumo de energia destinado à produção de etanol corresponde a 50% e destinado a produção de açúcar a 50%. Nas usinas USB e USC este setor não é separado dos demais e possuem um setor denominado de tratamento de caldo.

Para os cálculos da demanda média e do consumo de energia

envolvendo a produção de etanol, considerando o período de 48 horas, foi utilizada a Equação 5 para a usina USA e a Equação 6 para as usinas USB e USC.

$$D_{ET} = (D_R + D_M + D_C) \times 0,45 + (D_{AA} \times 0,55) + D_D \quad (5)$$

$$D_{ET} = (D_R + D_M + D_C + D_{TC}) \times 0,45 + D_D \quad (6)$$

Em que:

D_{ET} = Demanda média do etanol, em [kW];

D_R = Demanda média do setor de recepção, em [kW];

D_M = Demanda média do setor da moagem, em [kW];

D_C = Demanda média do setor das caldeiras, em [kW];

D_{TC} = Demanda média do setor de tratamento de caldo, em [kW];

D_{AA} = Demanda média do setor das atividades auxiliares, em [kW];

D_D = Demanda média do setor da destilaria, em [kW];

Nas denominações acima, ficam estabelecidas formulações diferentes da demanda média do etanol (D_{ET}) para as diferentes usinas.

Apesar da usina USA não ter o setor denominado tratamento de caldo, o qual está distribuído entre as atividades auxiliares e moagem, quando aplicadas as Equações 7 e 8, automaticamente o consumo de energia referente à produção de etanol fica embutido através de todos os setores.

O consumo de energia para a produção do etanol é calculado com a mesma distribuição das porcentagens de rateio entre as produções de açúcar e etanol. Para o cálculo do consumo de energia envolvendo a produção de etanol, considerando o período de 48 horas, foram utilizadas as Equações 7 para a usina USA e as Equação 8 para as usinas USB e USC.

$$C_{ET} = (C_R + C_M + C_C) \times 0,45 + (C_{AA} \times 0,5) + C_D \quad (7)$$

$$C_{ET} = (C_R + C_M + C_C + C_{TC}) \times 0,45 + C_D \quad (8)$$

Em que:

C_{ET} = Consumo de energia para a produção do etanol, em [kWh];

C_R = Consumo de energia do setor de recepção, em [kWh];

C_M = Consumo de energia do setor da moagem, em [kWh];

C_C = Consumo de energia do setor das caldeiras, em [kWh];

C_{TC} = Consumo de energia do setor de tratamento de caldo, em [kWh];

C_{AA} = Consumo de energia do setor das atividades auxiliares, em [kWh];

C_D = Consumo de energia do setor da destilaria, em [kWh];

4.2.4 Fator de potência médio para produção de etanol

Para o cálculo do fator de potência médio para a produção do etanol

FP_{ET} , foi utilizada a Equação 9 para a usina USA e a Equação 10 para as usinas USB e USC.

$$FP_{ET} = \frac{(D_R \times FP_R + D_M \times FP_M + D_C \times FP_C) \times 0,45 + (D_{AA} \times FP_{AA}) \times 0,05 + D_D \times FP_D}{D_{ET}} \quad (9)$$

$$FP_{ET} = \frac{(D_R \times FP_R + D_M \times FP_M + D_C \times FP_C + D_{TC} \times FP_{TC}) \times 0,45 + D_D \times FP_D}{D_{ET}} \quad (10)$$

Em que:

FP_{ET} = Fator de potência médio para a produção do etanol.

Para o cálculo do fator de carga dos setores das usinas, utiliza-se a

Equação 11:

$$FC_s = \frac{C_s}{D_{\max s} \cdot t} \quad (11)$$

Em que:

FC_s = fator de carga por setor;

C_s = consumo de energia por setor, em [kWh];

$D_{\max s}$ = demanda máxima por setor, em [kW];

t = tempo de medição (48 horas), em [h].

Para o cálculo do fator de carga na produção do etanol, utiliza-se a

Equação 12:

$$FC_{ET} = \frac{C_{ET}}{D_{ET \max}} \times t \quad (12)$$

Em que:

FC_{ET} = fator de carga na produção do etanol;

$C_{ET \max}$ = consumo de energia na produção do etanol, em [kWh];

Para o cálculo da demanda máxima, utiliza-se a Equação 13 para a usina USA e Equação 14 para as usinas USB e USC

$$D_{ET \max} = (D_{\max R} + D_{\max M} + D_{\max C}) \times 0,45 + (D_{\max AA} \times 0,5) + D_{\max D} \quad (13)$$

$$D_{ET \max} = (D_{\max R} + D_{\max M} + D_{\max C} + D_{\max TC}) \times 0,45 + D_{\max D} \quad (14)$$

Em que:

$D_{ET \max}$ = demanda máxima, considerando as demandas máximas por setor, em [kW];

t = tempo de medição (48 horas), em [h].

4.2.5 Determinação dos índices de desempenho

Os valores de demanda média e de consumo de energia na produção do etanol dado pelas Equações 05 a 14 serão utilizados para determinação dos índices de desempenho das três usinas.

4.2.5.1 Consumo elétrico específico na produção do etanol

Foram considerados dois índices de consumo elétrico específico na produção do etanol, sendo:

CEE_1 - dado pela relação do consumo da energia consumida na produção do etanol por tonelada de cana-de-açúcar processada, calculado pela Equação 15 e considerou-se rateio de 45%.

CEE_2 - dado pela relação energia total consumida na produção do etanol em kWh pela quantidade de etanol produzido no período em m³, conforme Equação 16.

$$CEE_1 = \frac{C_{ET}}{C_{Pet}} \quad (15)$$

$$CEE_2 = \frac{C_{ET}}{V_{ET}} \quad (16)$$

Em que:

CEE_1 = consumo elétrico específico na produção de etanol, em $[kWh.t^{-1}]$;

CEE_2 = consumo elétrico específico na produção de etanol, em $[kWh.m^{-3}]$;

C_{ET} = consumo de energia na produção do etanol, em $[kWh]$;

C_{pet} = quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção do etanol, considerando o rateio de 45%; em $[t]$;

V_{ET} = volume produzido de etanol, em $[m^3]$.

4.2.5.2 Índice de eficiência em produtividade

Relacionando-se os índices CEE_1 e CEE_2 , pode-se obter o índice em produtividade, dado em litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar processada na produção do etanol conforme a Equação 17:

$$I_{EP} = \frac{CEE_1}{CEE_2} = \frac{C_{ET} \times V_{ET}}{C_{ET} \times C_{pet}} = \frac{1000 \cdot V_{ET}}{C_{pet}} \quad (17)$$

Em que:

I_{EP} = Índice de eficiência em produtividade, $[l. t^{-1}]$

4.2.5.3 Índice específico de energia gerada na produção do etanol

O índice específico de energia gerada na produção do etanol (IE_g) é a relação da energia gerada por quantidade total de cana-de-açúcar processada total, conforme Equação 18.

$$IE_g = \frac{E_{gerada}}{C_p} \quad (18)$$

Em que:

IE_g = Índice específico de energia gerada na produção do etanol, em [kWh. t⁻¹];

E_g =Energia gerada, [kWh];

C_p = Quantidade total de cana-de-açúcar processada no período; em [t];

4.2.5.4 Índice proporcional de consumo de energia na produção do etanol

O índice proporcional de consumo de energia na produção do etanol, em [%], representa a relação percentual entre a energia consumida na produção do etanol e a energia total gerada, conforme Equação 19:

$$IP_{ce} = \frac{C_{ET}}{E_g} \times 100 \quad (19)$$

Em que:

IP_{ce} = Índice proporcional de consumo de energia na produção do etanol, em [%]

4.2.6 Análise estatística

As variáveis analisadas foram: energia consumida (C), fator de potência (FP). Para a análise estatística, adotou-se o delineamento de blocos casualizados, em arranjo fatorial 3×5 , composto das três empresas sucroalcoleiras e 5 setores de consumo energético sendo: recepção (1), moagem (2), caldeiras (3), atividades auxiliares/tratamento de caldo (4) e destilaria (5) totalizando 15 tratamentos, sendo cada grupo composto por 192 repetições (2 dias $\times$ 24 horas $\times$ 4 aferições por hora).

A análise de variância (Anova) foi realizada para comparação dos grupos, com posterior comparação entre as médias pelo teste de *Tukey*.

Vale ressaltar que foi estabelecido para todos os testes um nível de significância de $\alpha = 0,05$. Para uma descrição adequada das variáveis em relação aos tipos de variáveis nas diferentes usinas e setores, foi realizada uma análise descritiva para apresentação de resultados em valores de médias e desvio padrão, além da criação de gráfico tipo *BoxPlot*.

4.2.7 Modelagem do controlador *Fuzzy* para a análise da eficiência

As informações de eficiência e racionalidade relativas aos setores foram compostas por 2 grupos de dados, identificadas por: fator de carga (Fc) e fator de potência (Fp)

Para uma descrição adequada das variáveis foi realizada uma análise estatística descritiva destes dados criando-se gráficos do tipo *BoxPlot* e determinando também os quartis de tais grupos.

Para a criação de um sistema baseado em regra *fuzzy*, foi necessário definir um processador de entrada (ou *fuzzificador*), um conjunto de regras linguísticas, um método de inferência *fuzzy* e um processador de saída (ou *defuzzificador*), que gera um número real como saída. A Figura 12 mostra o sistema baseado em regras *fuzzy* proposto.

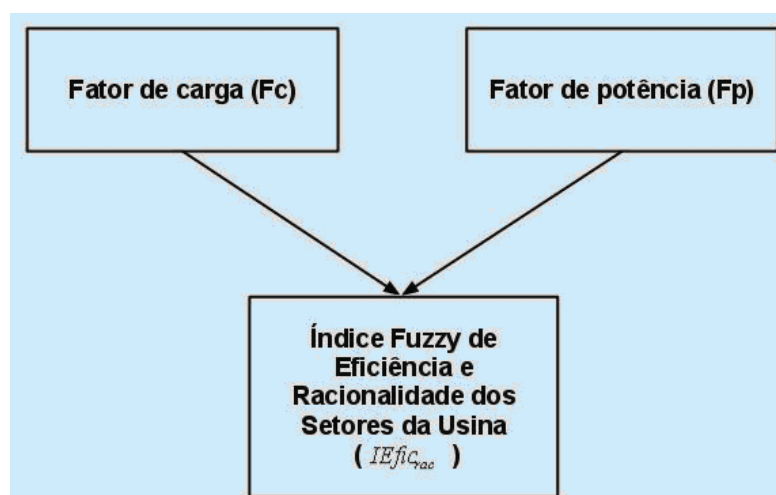


Figura 12. Sistema baseado em regras *Fuzzy* para determinação do Índice de Eficiência e Racionalidade $IEfic_{rac}$ no setor sucroalcooleiro.

As variáveis de entrada do sistema baseado em regras *fuzzy* proposto foram: (*fc*) e (*FP*) dos setores das usinas.

Para cada variável, foram definidas 5 funções de pertinência denominadas “Muito Baixa” (MB), “Baixa” (B), “Média” (M), “Alta” (A) e “Muito Alta” (MA), definidas de acordo com a Tabela 06 e Figura 13.

Os quartis dos grupos de dados são representados por Q1, Q2 e Q3, além da utilização dos valores máximos e mínimos, e também de limites inferiores e superiores definidos por números respectivamente menores a maiores que o mínimo e máximo, possibilitando a utilização do sistema para até outros períodos não avaliados de operação dos setores.

Tabela 06. Definição das funções de pertinência das variáveis de entrada.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
“Muito Baixa” (MB)	Trapezoidal	[- 1, 0, Mínimo, Q1]
“Baixa” (B)	Triangular	[Mínimo, Q1, Q2]
“Média” (M)	Triangular	[Q1, Q2, Q3]
“Alta” (A)	Triangular	[Q2, Q3, Máximo]
“Muito Alta” (MA)	Trapezoidal	[Q3, Máximo, 1, 2]

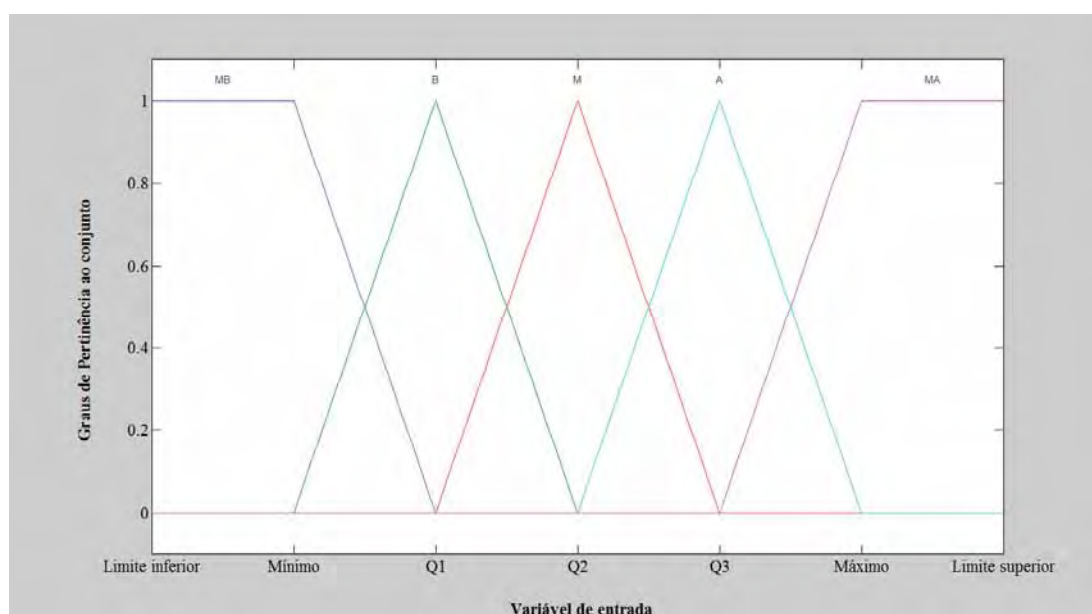


Figura 13. Funções de pertinência definidas para os conjuntos *fuzzy* da variável de entrada

A variável de saída do sistema *fuzzy* foi denominada índice *fuzzy* de eficiência e racionalidade ($IEfic_{rac}$), gerando um número real no intervalo $[0,1]$. As funções de pertinência desta variável possuíram as mesmas denominações das funções da variável de entrada e foram todas do tipo triangulares, sendo que os conjuntos MB e MA eram representados por funções com suporte 0,25 e os conjuntos B, M e A eram com suporte 0,5, de acordo com a Tabela 7 e Figura 14.

Tabela 7. Definição das funções de pertinência das variáveis de entrada.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
“Muito Baixa” (MB)	Triangular	$[-1; 0; 0,25]$
“Baixa” (B)	Triangular	$[0; 0,25; 0,5]$
“Média” (M)	Triangular	$[0,25; 0,5; 0,75]$
“Alta” (A)	Triangular	$[0,5; 0,75; 1]$
“Muito Alta” (MA)	Triangular	$[0,75; 1; 2]$

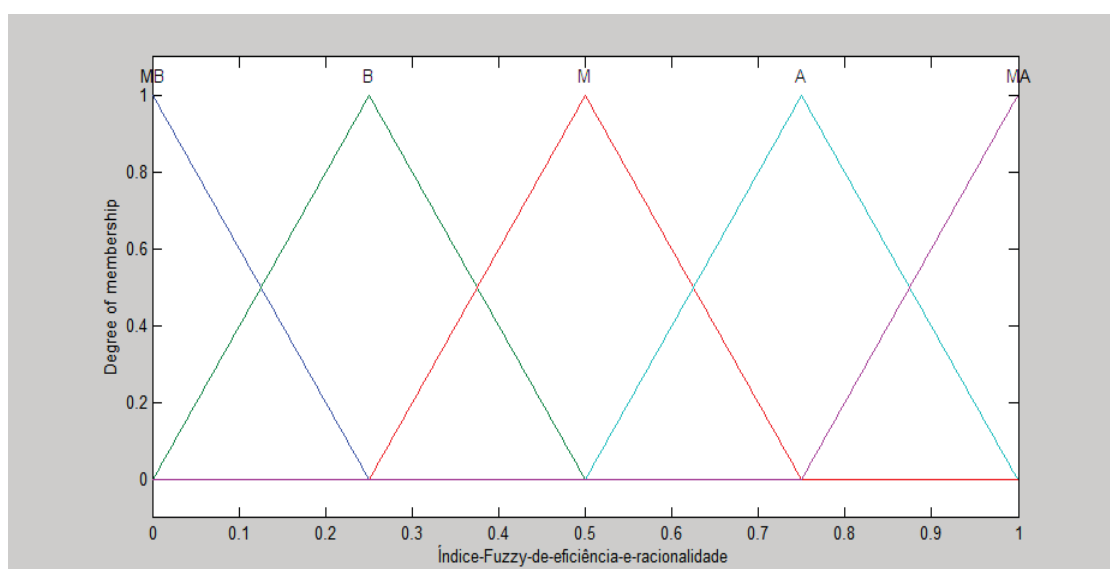


Figura 14. Funções de pertinência definidas para os conjuntos *fuzzy* da variável de saída índice *fuzzy* de eficiência e racionalidade

Para a obtenção da base de regras do sistema *fuzzy*, considerou-se as 25 (5×5) combinações entre os conjuntos *fuzzy* das duas variáveis de entrada. A classificação de

cada combinação foi feita com auxílios de especialistas da área energética.

A Tabela 8 mostra os pontos de cada variável assim considerada e as combinações dos conjuntos *fuzzy* descritas.

Tabela 8. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a geração da base de regras

Combinações das variáveis de entrada na Base de Regras			
<i>FC</i>		<i>FP</i>	
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado
MB	Mínimo	MB	Mínimo
MB	Mínimo	B	Q1
MB	Mínimo	M	Q2
MB	Mínimo	A	Q3
MB	Mínimo	MA	Máximo
B	Q1	MB	Mínimo
B	Q1	B	Q1
B	Q1	M	Q2
B	Q1	A	Q3
B	Q1	MA	Máximo
M	Q2	MB	Mínimo
M	Q2	B	Q1
M	Q2	M	Q2
M	Q2	A	Q3
M	Q2	MA	Máximo
A	Q3	MB	Mínimo
A	Q3	B	Q1
A	Q3	M	Q2
A	Q3	A	Q3
A	Q3	MA	Máximo
MA	Máximo	MB	Mínimo
MA	Máximo	B	Q1
MA	Máximo	M	Q2
MA	Máximo	A	Q3
MA	Máximo	MA	Máximo

O método de inferência utilizado para o cálculo do valor numérico da variável de saída de acordo com a base de regras foi o de Mamdani. Com o auxílio da

ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do programa MATLAB® 7.0, Copyright 1984-2004 *The MathWorks Inc.*, foi possível criar um sistema baseado em regras *fuzzy* computacionalmente, sendo também determinada uma superfície e um mapa de contorno de representação do sistema.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Medições elétricas

A partir dos dados coletados pelos analisadores de energia foram obtidos os comportamentos das grandezas elétricas para todos os setores das usinas.

5.1.1 Demanda média e consumo de energia por setor e na produção de etanol

Na Figura 15 a Figura 19 é mostrado o comportamento da potência ativa em cada setor para as usinas analisadas referente ao período de 48 horas.

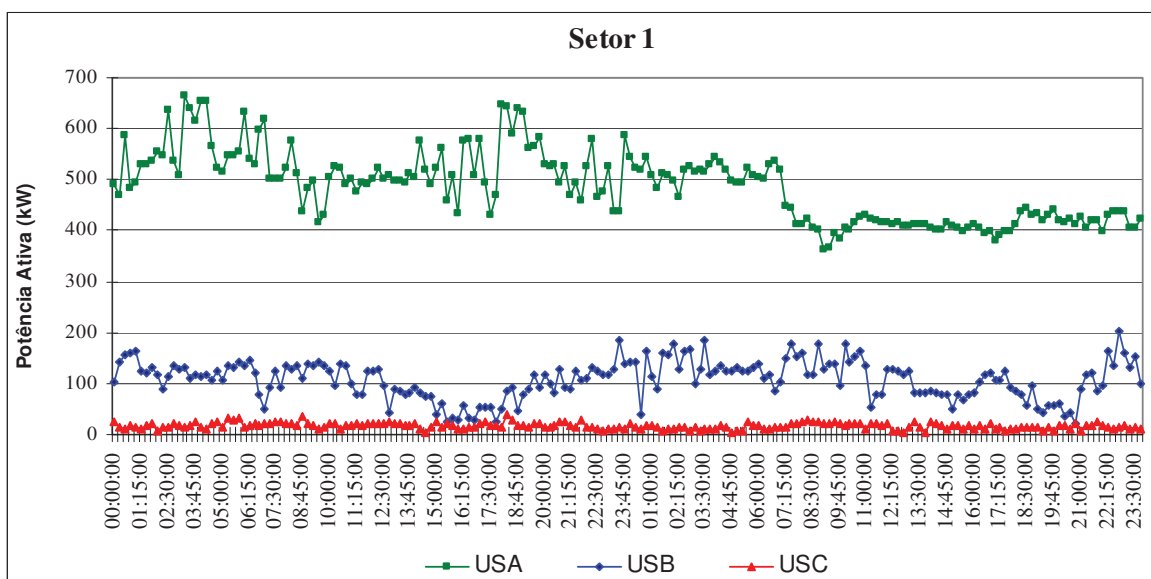


Figura 15. Comportamento da potência ativa trifásica no setor da recepção

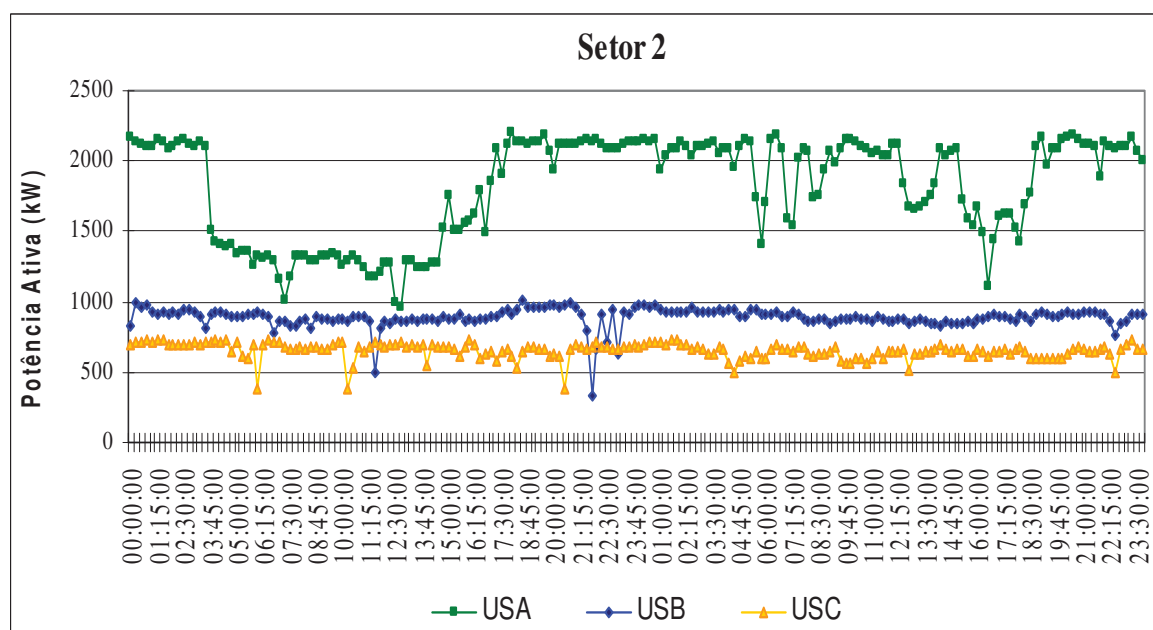


Figura 16. Comportamento da potência ativa trifásica no setor da moagem

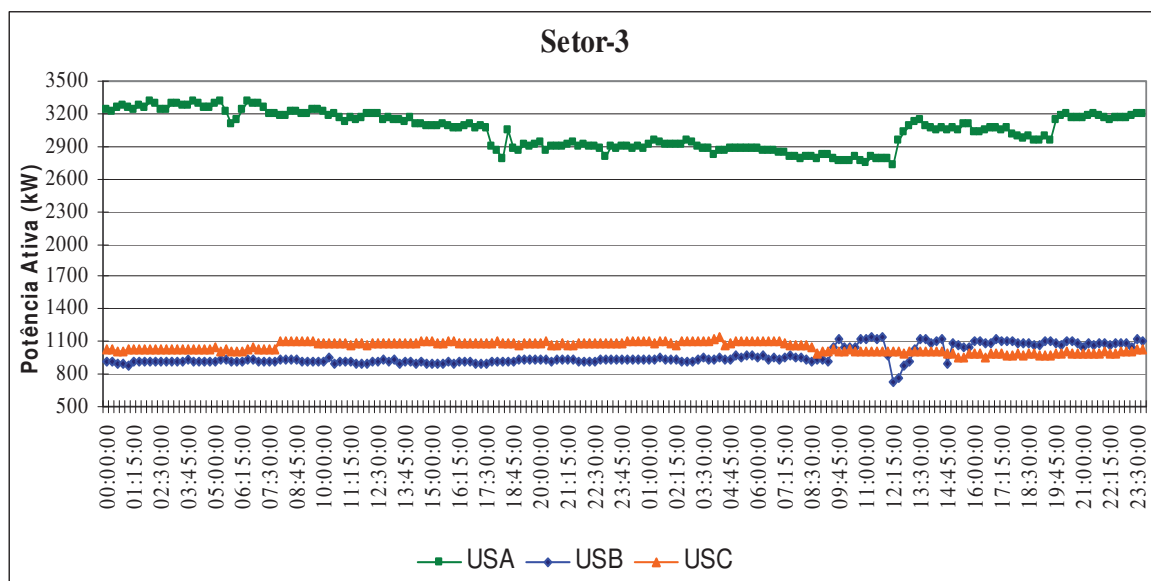


Figura 17. Comportamento da potência ativa trifásica no setor de caldeiras.

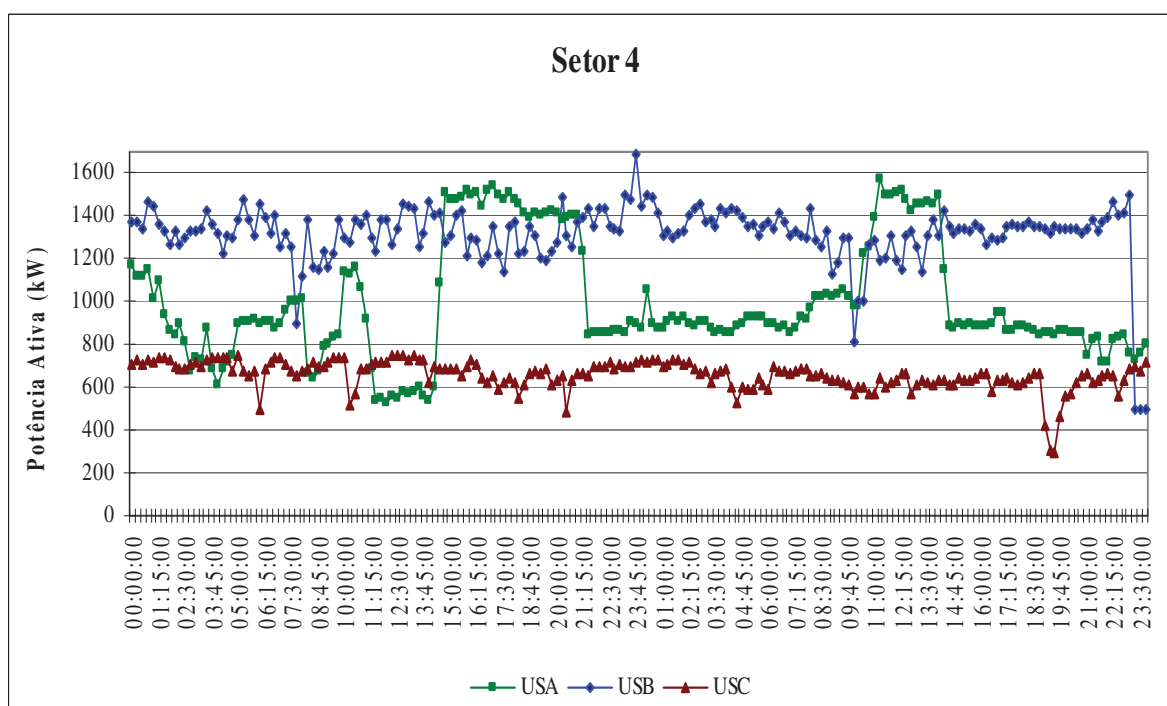


Figura 18. Comportamento da potência ativa trifásica no setor de atividades auxiliares

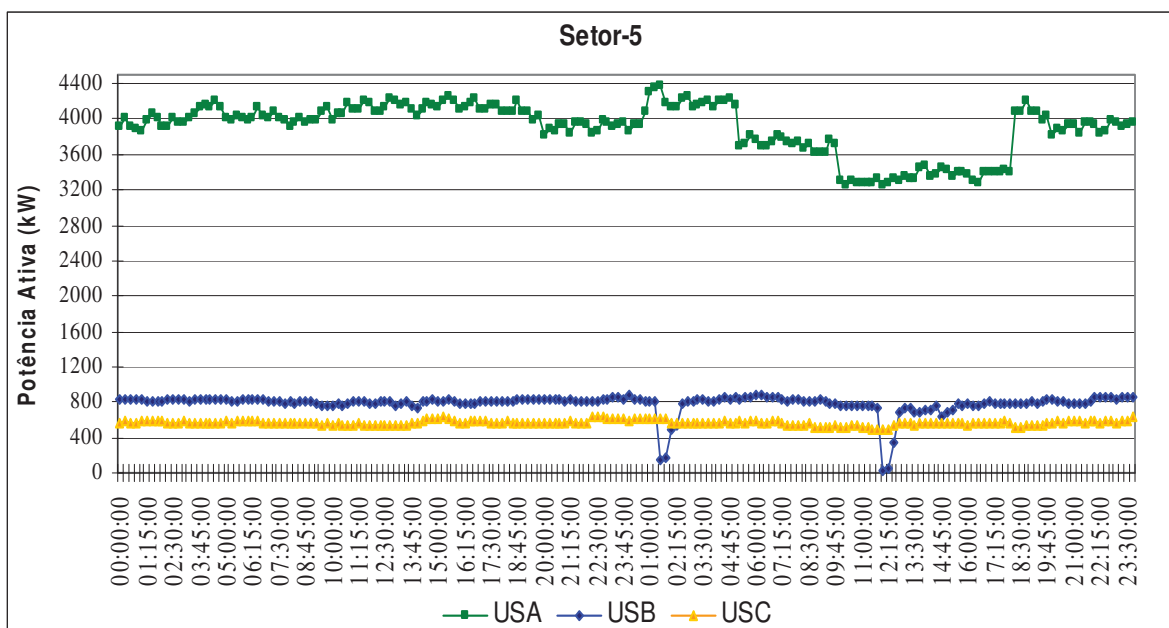


Figura 19. Comportamento da potência ativa trifásica no setor de destilarias.

Observando o comportamento da potência ativa solicitada em cada setor no processo de produção do etanol e do açúcar, pode-se notar valores bem superiores da usina USA em relação as outras duas em todos os setores.

O consumo de energia das usinas USB e USC, baseados na potência ativa estão bem próximos, em função dessas usinas terem quantidade de cana-de-açúcar processada e produção de etanol equivalentes. Dúvida equivalentes??

Estes valores estão melhor avaliados nos índices que foram calculados utilizando estes dados, os quais serão apresentados a seguir.

Na Figura 20 a Figura 22, verifica-se a porcentagem de contribuição do consumo de energia de cada setor no processo de produção do etanol das três usinas, conforme medições realizadas no período de 48 horas, considerando o rateio entre a produção de açúcar e etanol.

Pode-se observar que a recepção é o setor que tem a menor participação no consumo, variando de 1 a 3 %, porcentagens estas que estão diretamente relacionadas com as usinas que têm as maiores quantidades de cana-de-açúcar processada.

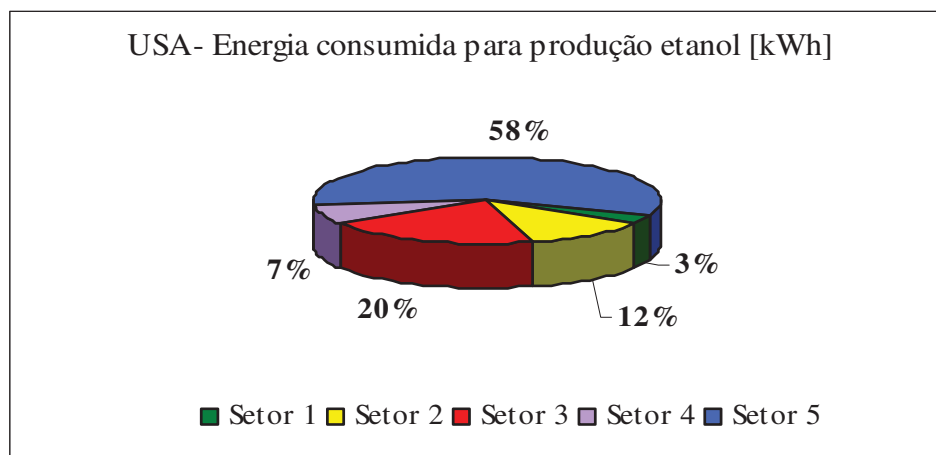


Figura 20. Energia consumida nos setores da usina USA

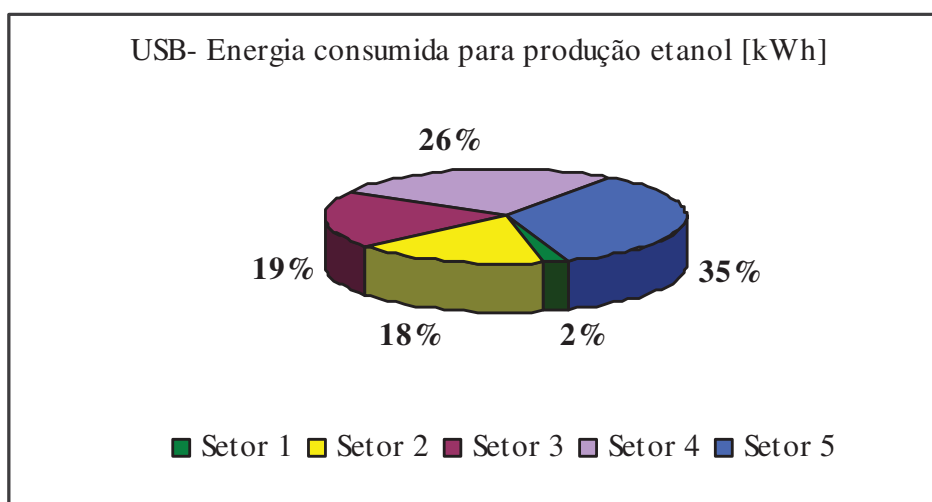


Figura 21. Energia consumida nos setores da usina USB

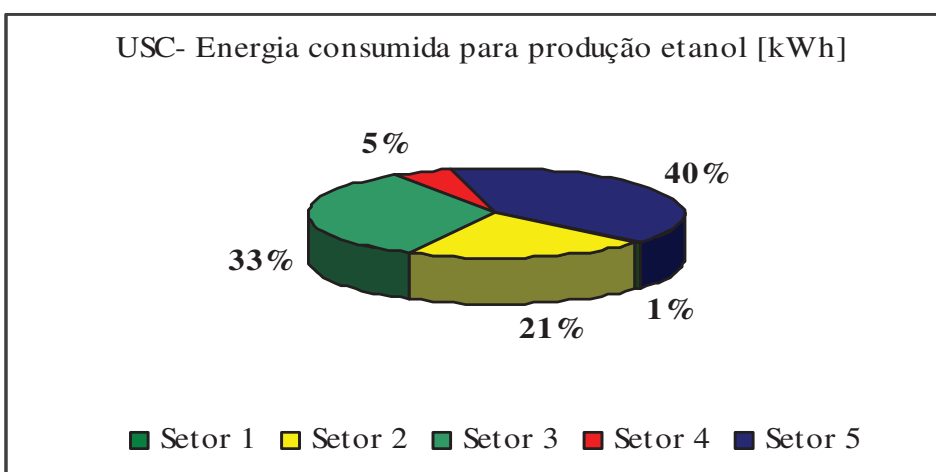


Figura 22. Energia consumida nos setores da usina USC

Os setores 2, 3 e 4, referente às três usinas, possuem valores bem diferenciados quanto a suas contribuições no rateio do consumo de energia, levando a considerar que as alimentações de energia nestes setores não são direcionadas especificamente para atender suas demandas.

Para apresentar uma relação da distribuição percentual do consumo de energia na produção de etanol referente aos 5 setores, deve-se utilizar os valores médios conforme a Tabela 9 .

Tabela 9. Relação percentual da contribuição do consumo de energia na produção do etanol

Setores	USA [%]	USB [%]	USC [%]	Média [%]
Setor 1	3	2	1	2
Setor 2	12	18	21	17
Setor 3	20	19	33	24
Setor 4	7	26	5	13
Setor 5	58	35	40	44

O setor 5, referente à destilaria, corresponde à maior porcentagem de contribuição no consumo de energia, obtendo-se uma média de 44 %, deve-se este valor por este setor representar todo processo final da produção do etanol.

5.1.2 Fator de potência médio na produção de etanol

A partir dos dados coletados pelos analisadores de energia foram obtidos os comportamentos das grandezas elétricas para os cinco setores num período de 48 horas.

Verifica-se os dados da demanda média, fator de potência médio ponderado e fator de potência na produção do etanol.

Tabela 10. Demanda média, fator de potência e fator de potência médio da produção do etanol.

Usinas	Setores	Demanda média	FP	FP _{ET}
		[kW]	Médio ponderado	
USA	1	487	0,89	0,85
	2	1817	0,95	
	3	3039	0,86	
	4	993	0,77	
	5	3897	0,84	
USB	1	108	0,59	0,83
	2	889	0,62	
	3	967	0,86	
	4	1315	0,90	
	5	783	0,87	
USC	1	17	0,59	0,84
	2	653	0,89	
	3	1049	0,81	
	4	168	0,81	
	5	566	0,83	

Em relação ao fator de potência médio de cada setor mostrado na Figura 25, observa-se entre as usinas que não há uma preocupação em fazer a correção deste fator para atingir o valor de 0,92, visto que as usinas não são penalizadas pelas concessionárias por apresentarem estes baixos valores, por gerarem sua própria energia.

Com isso, não se tem uso racional e eficiente da energia e também sobre sua qualidade. Sendo que a usina USA apresentou melhor resultado para o fator médio para produção do etanol de 0,85, valor este abaixo de 0,92, recomendado pelas normas vigentes.

Conforme Cagnon (2007) quando o fator de potência é corrigido e elevado para 0,92 ou mais, a empresa passa a utilizar energia da forma mais correta e econômica, uma vez que há redução das perdas de energia e custos de energia elétrica com liberação da capacidade do sistema.

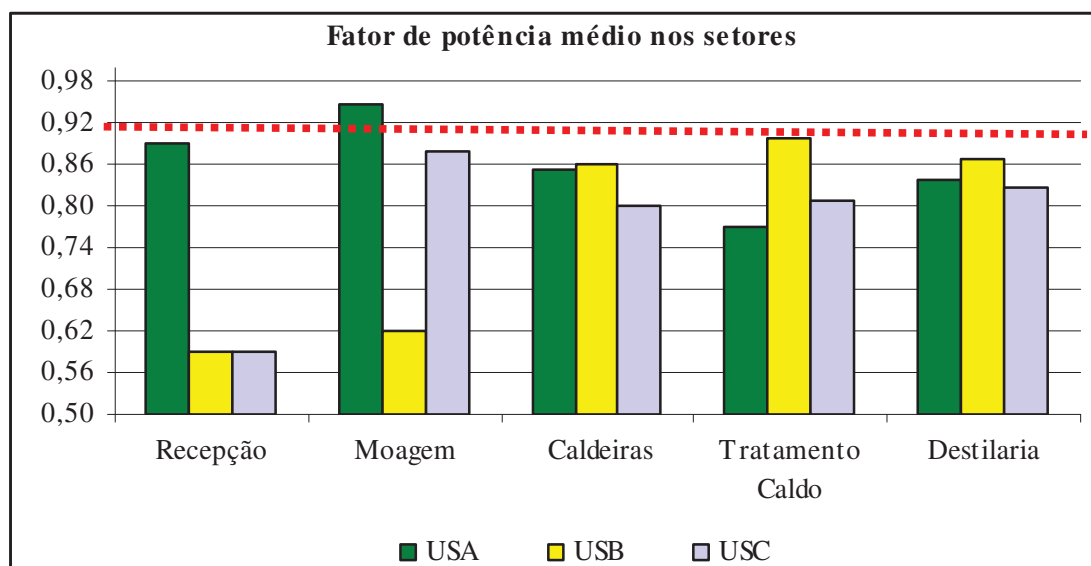


Figura 23. Fator de potência médio para os cinco setores analisados durante um período de 48 horas

5.1.3 Fator de carga nos setores das usinas e na produção do etanol

Quanto mais próximo da unidade o fator de carga indica a melhor distribuição do uso da energia em relação à demanda. Esse índice permite verificar o quanto que a energia elétrica é utilizada de forma racional. É a razão entre a demanda média, durante um determinado intervalo de tempo, e a demanda máxima registrada no mesmo período.

Conforme mostra a Tabela 11, verifica-se que o fator de carga médio apresenta valores acima de 0,8, para as três usinas, valor recomendado pelas concessionárias, sendo que a USC apresentou fator de carga de 0,9. Na Figura 24, é mostrado o fator de carga para os cinco setores das usinas.

Tabela 11. Dados sobre o fator de carga nos setores e fator de carga médio para produção do etanol

Usinas	Setores	FC	FC _{ET}
USA	1	0,73	0,86
	2	0,82	
	3	0,92	
	4	0,63	
	5	0,89	
USB	1	0,53	0,83
	2	0,88	
	3	0,84	
	4	0,78	
	5	0,88	
USC	1	0,44	0,77
	2	0,89	
	3	0,93	
	4	0,88	
	5	0,89	

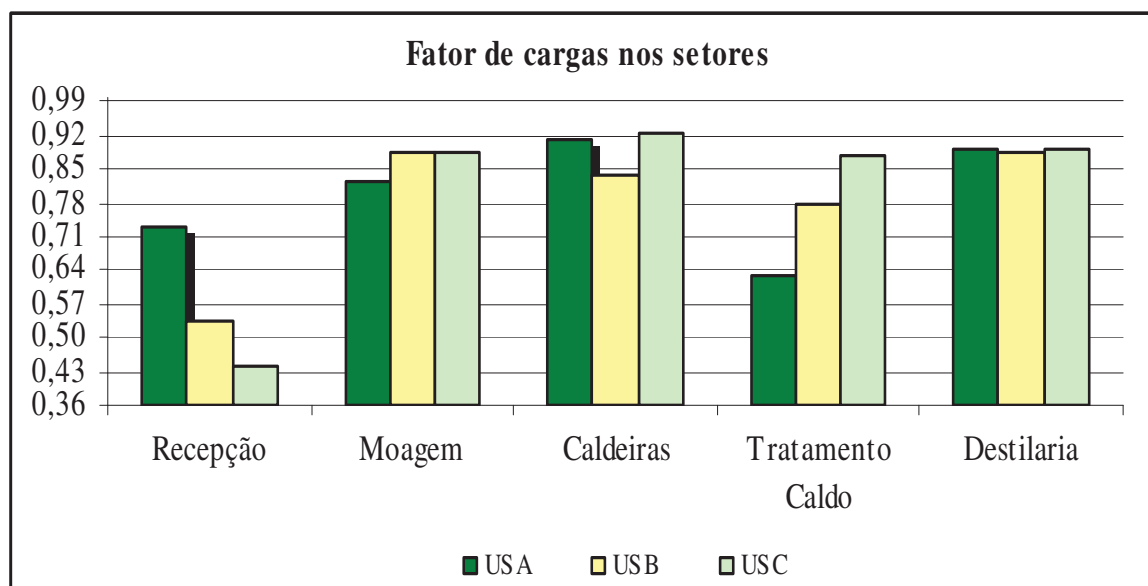


Figura 24. Fator de carga para os cinco setores analisados durante um período de 48 horas

5.2 Análise dos índices de desempenho

A partir da energia consumida nos cinco setores e a energia calculada para a produção do etanol, da quantidade de cana-de-açúcar processada, considerando o rateio de 45% do total, a quantidade de etanol produzido, da energia total gerada determinou-se os índices de desempenho para as usinas conforme Tabela 12.

Tabela 12. Análise dos índices de desempenho

Usina	C_{ET} [kWh]	E_g [kWh. t ⁻¹]	FC_{ET}	FP_{ET}	CEE_1 [kWh. t ⁻¹]	CEE_2 [kWh. m ⁻³]	I_{EP} [l. t ⁻¹]	IE_g [kWh.t ⁻¹]	IP_{CE} [%]
USA	326.288	810.741	0,86	0,85	10,3	108,3	94,8	11,48	40
USB	108.421	191.266	0,83	0,83	12	133,3	90	9,50	57
USC	67.937	195.820	0,77	0,84	8,8	108,1	81,0	11,36	35

Analisando os índices da Tabela 15 para as três usinas, pode-se elaborar uma discussão individualizada com as devidas correlações dos índices de desempenho.

A USA, possui maior consumo de energia para a produção do etanol e maior geração de energia, com melhores índices de fator de potência e consumo específico de energia (CEE_2). Em relação ao (I_{EP}), possui o melhor rendimento na produção de etanol por tonelada de cana-de-açúcar processada, atingindo valor acima da média encontrada na literatura que é de 90 l.t⁻¹. Quanto ao (IP_{CE}), que é a relação percentual entre a energia consumida na produção do etanol e a energia total gerada, ou seja, 40% foi utilizada para a produção de etanol.

A USB é a segunda usina em consumo de energia para a produção do etanol, porém a terceira em geração, com menor fator de carga, maiores consumos específicos (CEE_1 e CEE_2), utilizando a maior parte de sua energia gerada, ou seja, 57% para a produção do etanol.

Esses valores possibilitam, de acordo com Bor (2008), demonstrar o quanto não eficiente é a usina. A USB, embora tenha menor quantidade de processamento da cana-de-açúcar que a USA, teve maior consumo elétrico específico entre as três usinas.

A USC é a que possui menor consumo de energia na produção do etanol e segunda em geração e também o melhor índice (CEE_1).

Analisando as três usinas, quanto ao índice (IP_{CE}) que relaciona a energia consumida com a energia gerada, a USC apresentou a menor relação. Este valor deve-se pelo fato da usina possuir o melhor rendimento entre a energia gerada pela quantidade de cana-de-açúcar processada. Como esta usina privilegia a produção de energia elétrica para a comercialização, leva-se a concluir que este resultado do (I_{EP}) índice de produção de etanol por tonelada de cana de-açúcar processada igual a 81 l.t^{-1} abaixo do encontrado na literatura, seja o menos eficiente entre as usinas.

Para Leal (2006), a partir dos anos noventa, o setor elétrico passou por estruturas e as empresas geradoras de energia elétrica realizaram algumas mudanças que impulsionaram melhorias e investimentos em equipamentos eficientes no setor sucroalcooleiro.

Para Rodrigues (2005) que estudou a análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar, encontrou que energia gerada pela quantidade de cana processada foi em média 13 kWh.t^{-1} . Percebe-se que as três usinas apresentaram para o (CEE_1) valores abaixo do encontrado na literatura, sendo a usina USC com o menor índice, ou seja, $8,8 \text{ kWh.t}^{-1}$, sendo este um índice que demonstra a importância sobre medir a eficiência energética de usinas sucroalcooleiras.

Relacionando os índices de desempenho, pode-se notar que as usinas com o maior fator de carga apresentam menor consumo específico de energia (CEE_1), e o melhor (IE_g) e menor (IP_{CE}).

Analisando o índice específico de energia gerada na produção do etanol (IE_g) nas usinas, pode-se observar que tomando como base a literatura em que dependendo da tecnologia permite produzir em torno de 96 kWh por tonelada de cana-de-açúcar processada, dos quais, em média, 80 kWh podem ser exportados, utilizando apenas o bagaço da cana, verifica-se que as três usinas estão produzindo em média 10% desse valor, sendo que a USA é a que possui o maior índice. Este índice pode aumentar investindo em tecnologias mais eficientes tais como: substituição de caldeiras de maior pressão e instalação de novos grupos geradores.

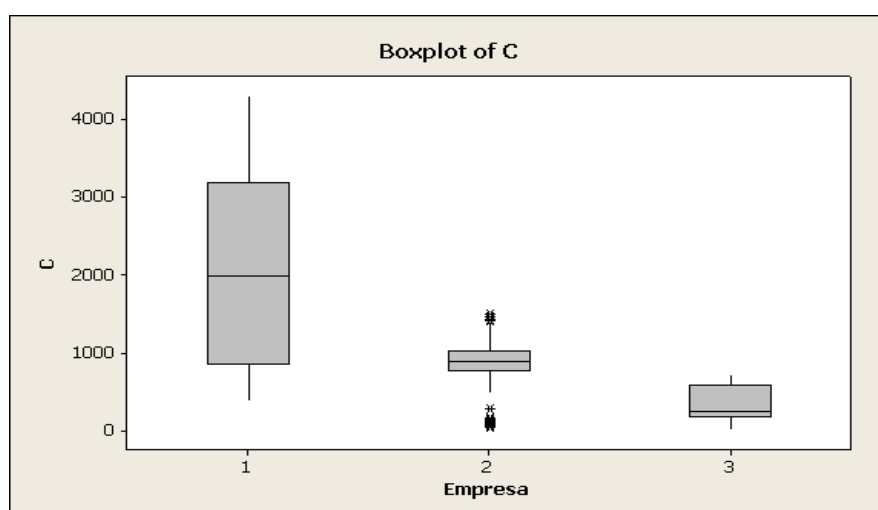
Isto pode ser notado pela quantidade de volume de bagaço de cana-de-açúcar armazenado nas usinas, os quais não são totalmente aproveitados para a geração de energia.

5.3. Análise estatística

A análise estatística descritiva das informações relativas aos parâmetros elétricos para a energia consumida (C) e fator de potência (FP) realizada nas usinas pode ser observada na Tabela 13 e Figura 25, sendo a média e demais parâmetros relativos ao período de 48 horas de medições realizadas.

Tabela 13. Análise descritiva dos dados de (C) e (FP) relativos ao período de 48 horas

Variável	Usina	Média	Desvio padrão	Mínimo	1.º quartil (Q1)	2.º quartil (Q2)	3.º quartil (Q3)	Máximo
C	USA	2042	1290	377	857	1991	3183	4302
	USB	812	404	37	768	881	1022	1501
	USC	331	245	9	167	245	578	715
FP	USA	0,86	0,07	0,58	0,84	0,86	0,90	0,97
	USB	0,77	0,14	0,52	0,62	0,86	0,88	0,92
	USC	0,79	0,13	0,53	0,71	0,81	0,83	0,99



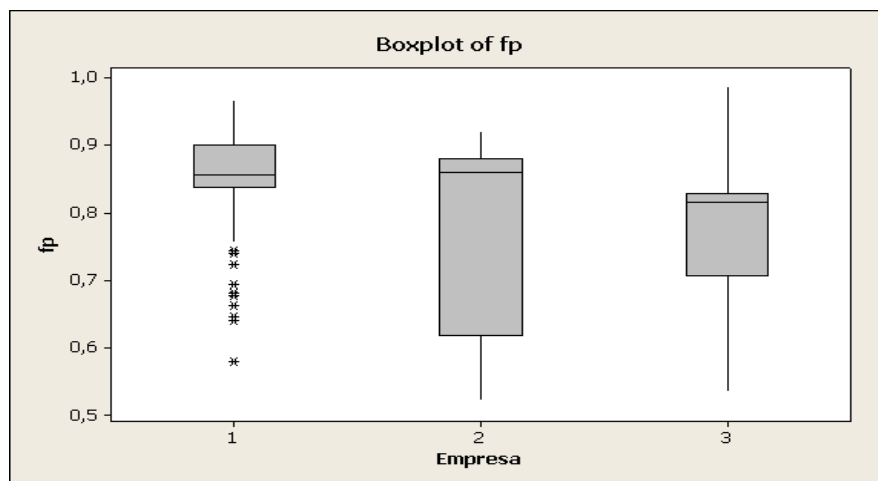


Figura 25. *Boxplot* para dados amostrais de (*C*) e (*FP*).

Tabela 14, em relação à energia consumida todos os setores apresentam diferenças significativas. Na comparação setor a setor, a usina USB apresentou diferenças não significativas nos setores 1 e 3 e a USC nos setores 1 e 4.

Tabela 14. Média e desvio padrão das variáveis (*C*) e (*FP*), no qual, para cada variável, valores seguidos de mesma letra não diferem ao nível de significância de 5 %

Variável	Setor	Usinas					
		USA		USB		USC	
<i>C</i>	1	1799± 363	Aa	888 ± 46	Ba	243 ± 19	Ca
	2	487± 63	Ab	108 ± 32	Bb	17 ± 4	Cb
	3	3039± 160	Ac	976 ± 66	Ba	659 ± 44	Cc
	4	993± 259	Ad	1315,± 115	Bc	168 ± 3	Ca
	5	3897± 284	Ae	783 ± 96	Bd	565 ± 23	Cd
<i>FP</i>	1	0,94 ± 0,05	Aa	0,62 ± 0,02	Ba	0,72 ± 0,01	Ca
	2	0,89 ± 0,01	Ab	0,59 ± 0,02	Bb	0,59 ± 0,02	Bb
	3	0,85 ± 0	Ac	0,86 ± 0	Ac	0,81 ± 0	Bc
	4	0,77 ± 0,04	Ad	0,9 ± 0,01	Bd	0,98 ± 0	Cd
	5	0,84 ± 0	Ae	0,88 ± 0,02	Bc	0,83 ± 0	Ae
	5	0,147 ± 0	Ab	0,14 ± 0,001	Bc	0,149 ± 0,001	Ac

Legenda: Letras maiúsculas iguais nas linhas representam diferenças não significativas entre as grandezas comparadas nas usinas. Letras minúsculas iguais nas colunas representam diferenças não significativas entre as grandezas comparadas nos setores.

Em relação ao (*FP*) pode-se observar como comparações principais, a ausência de diferenças significativas para todas usinas, e diferenças significativas entre os setores 3 e 5 para as usinas USA e USC.

5.4. Modelagem do controlador *Fuzzy* para a análise da eficiência

A análise estatística descritiva das informações relativas aos dados do (*FC*) e (*FP*) realizada pode ser observada na Tabela 15 e Figura 26.

Tabela 15. Análise descritiva dos dados (*FC*) e (*FP*) relativos ao período de 48 horas de medições

	Mé dia	Desvio Padrão	Mínimo	1.º quartil (Q1)	2.º quartil (Q2)	3.º quartil (Q3)	Máximo
<i>FC</i>	0,80	0,15	0,44	0,75	0,88	0,89	0,93
<i>FP</i>	0,80	0,11	0,59	0,79	0,84	0,88	0,95

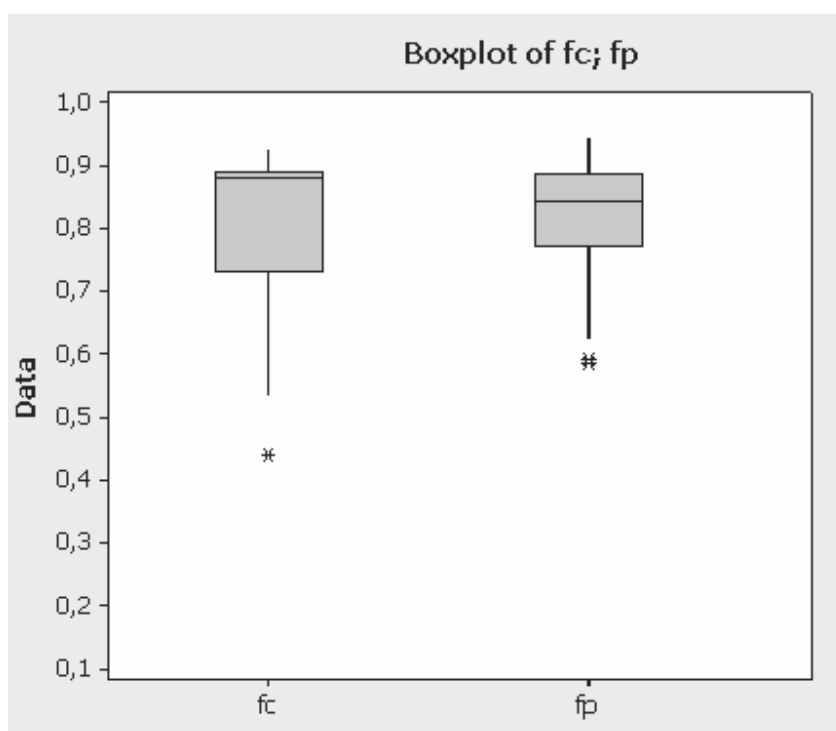


Figura 26. Boxplot para dados amostrais do (*FC*) e (*FP*)

Utilizando os valores mínimo, máximo e quartis da Tabela 17, foi possível construir as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entradas, conforme ilustram a Figura 27 e Figura 28.

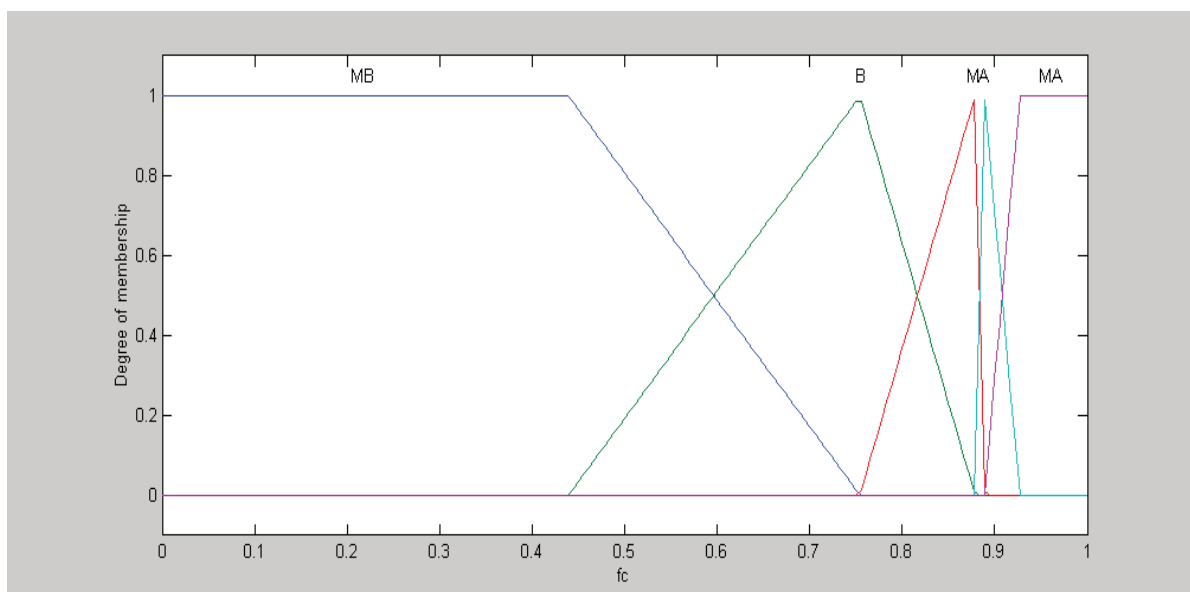


Figura 27. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* da variável de entrada (FC)

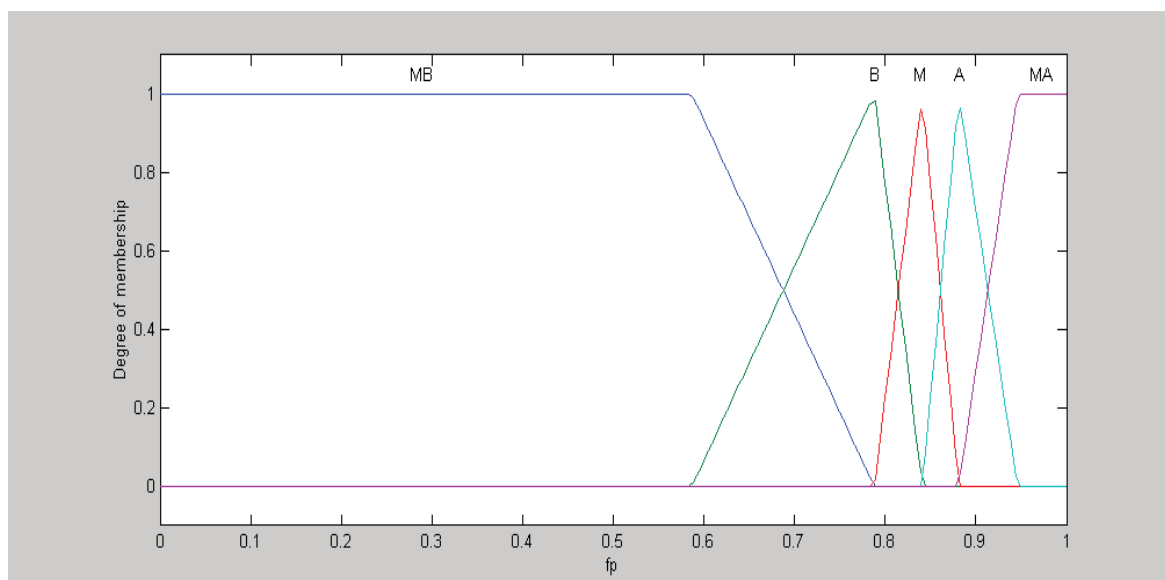


Figura 28. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* da variável de entrada (FP)

O estabelecimento das regras do sistema fuzzy foi realizado por entrevistas à especialistas da área energética, conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 16. Base de regras do sistema baseado em regras *Fuzzy*

Variável				$IEfic_{rac}$ Índice <i>Fuzzy</i> de eficiência e racionalidade (qualitativa)
<i>FC</i>		<i>FP</i>		
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado	
MB	0,44	MB	0,59	MB
MB	0,44	B	0,79	B
MB	0,44	M	0,84	B
MB	0,44	A	0,88	B
MB	0,44	MA	0,95	M
B	0,75	MB	0,59	MB
B	0,75	B	0,79	B
B	0,75	M	0,84	M
B	0,75	A	0,88	A
B	0,75	MA	0,95	MA
M	0,88	MB	0,59	MB
M	0,88	B	0,79	B
M	0,88	M	0,84	M
M	0,88	A	0,88	MA
M	0,88	MA	0,95	MA
A	0,89	MB	0,59	MB
A	0,89	B	0,79	B
A	0,89	M	0,84	M
A	0,89	A	0,88	MA
A	0,89	MA	0,95	MA
MA	0,93	MB	0,59	MB
MA	0,93	B	0,79	B
MA	0,93	M	0,84	M
MA	0,93	A	0,88	MA
MA	0,93	MA	0,95	MA

Desta forma, as 5 primeiras linhas da representam as relações:

- Se (*FP* é “Muito Baixo”) e (*FC* é “Muito Baixo”) então (o $IEfic_{rac}$ é “Muito Baixo”);
- Se (*FP* é “Muito Baixo”) e (*FC* é “Baixo”) então (o $IEfic_{rac}$

é “Baixo”);

- Se (FP é “Muito Baixo”) e (FC é “Médio”) então (o $IEfic_{rac}$ é “Baixo”);
- Se (FP é “Muito Baixo”) e (FC é “Alto”) então (o $IEfic_{rac}$ é “Médio”).

A Tabela 17 mostra a simulação do sistema *Fuzzy* para todos os setores das usinas, na qual o setor 3 de cada usina está em destaque para efeitos de posterior comparação:

Tabela 17. Classificações das usinas em estudo, por setores, conforme o índice *fuzzy* de eficiência e racionalidade e sua associação com o conjunto *Fuzzy* de maior grau de pertinência

Empresas	Setores	FC	FP	$IEfic_{rac}$	Classificação <i>Fuzzy</i>
USA	1	0,731	0,892	0.691	A
	2	0,825	0,46	0,908	MA
	3	0.916	0,855	0,602	M
	4	0,630	0.770	0.248	B
	5	0.892	0.841	0.502	M
USB	1	0.532	0.592	0.101	MB
	2	0.883	0.622	0.165	B
	3	0.840	0.861	0.645	A
	4	0.777	0.901	0.763	A
	5	0.884	0.874	0.723	A
USC	1	0.439	0.587	0.080	MB
	2	0.888	0.887	0.919	MA
	3	0.927	0.806	0.342	B
	4	0.879	0.810	0.359	B
	5	0.890	0.828	0.427	M

A usina USA teve desempenho satisfatório para os setores 1 e 2 (classificações A e MA).

A usina USB mostrou-se mais eficiente e racional para os setores 3 e 5, enquanto que as outras usinas obtiveram para classificação média.

A usina USC para o setor 2, também expressou um desempenho excelente (classificação alta) em relação à eficiência e racionalidade, enquanto que o mesmo setor na usina USB revelou-se classificado como baixo.

Observa-se que em geral, ou uma usina tem classificações satisfatórias em um ou mais setores e insatisfatórias no outro, ou vice-versa. Com a quantidade de variáveis e dados coletados para a análise do uso racional da energia nas usinas, foi necessário estabelecer um método computacional baseado na lógica Fuzzy capaz de interpretar os índices do fator de carga e do fator de potência, para estabelecer o $IEfic_{rac}$.

A complexidade dos sistemas em usinas de açúcar e etanol, a variabilidade de configurações de diferentes equipamentos produtores e consumidores de energia entre outros fatores tornam a tarefa de análise da eficiência energética complicada.

Este novo índice, definido como Índice Fuzzy de eficiência e racionalidade ($IEfic_{rac}$) não baseia-se no faturamento de energia elétrica propriamente dito, mas sim em uma nova relação matemática que possibilita a comparação de várias empresas simultaneamente. Assim, é possível que os gestores do setor sucroalcooleiro comparem os setores das usinas entre si, e também estes setores com outros de outras usinas.

Portanto, as análises foram realizadas de forma quantitativa e qualitativa, o que possibilita que sejam estabelecidas metas para melhorar índices de eficiência energética, auxiliando desta forma a tomada de decisão para os gestores das usinas. Utilizando o Método de Inferência de Mamdani, obtém-se a superfície dada pela Figura 29 como solução do sistema *fuzzy*, com mapa de contorno dado pela Figura 30

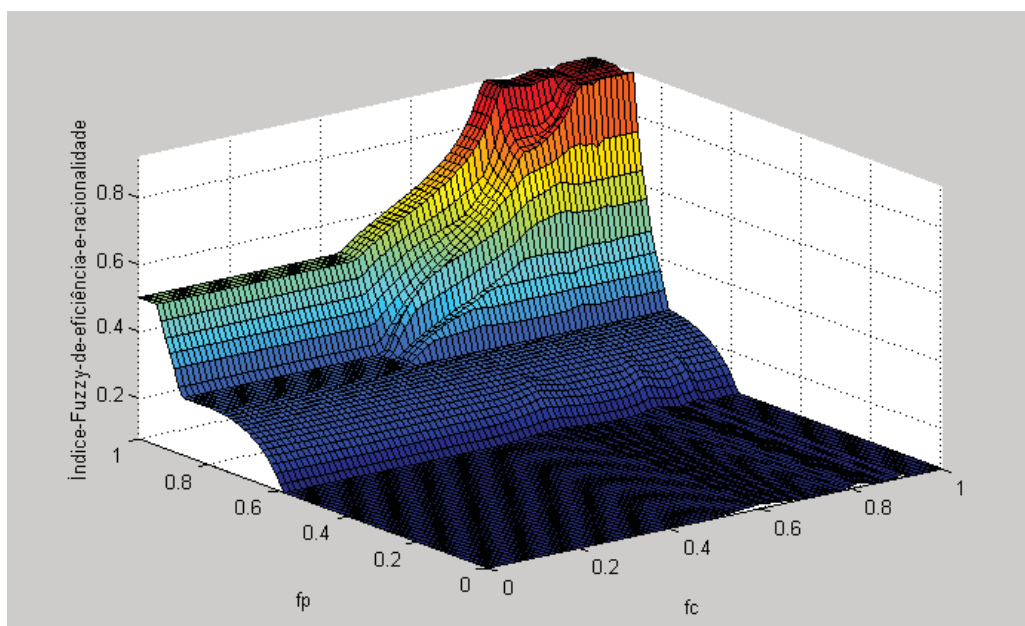


Figura 29. *Índice Fuzzy de $IEfic_{rac}$* representado tridimensionalmente as possíveis avaliações energéticas em relação aos fatores de carga e potência das usinas do setor sucroalcooleiro

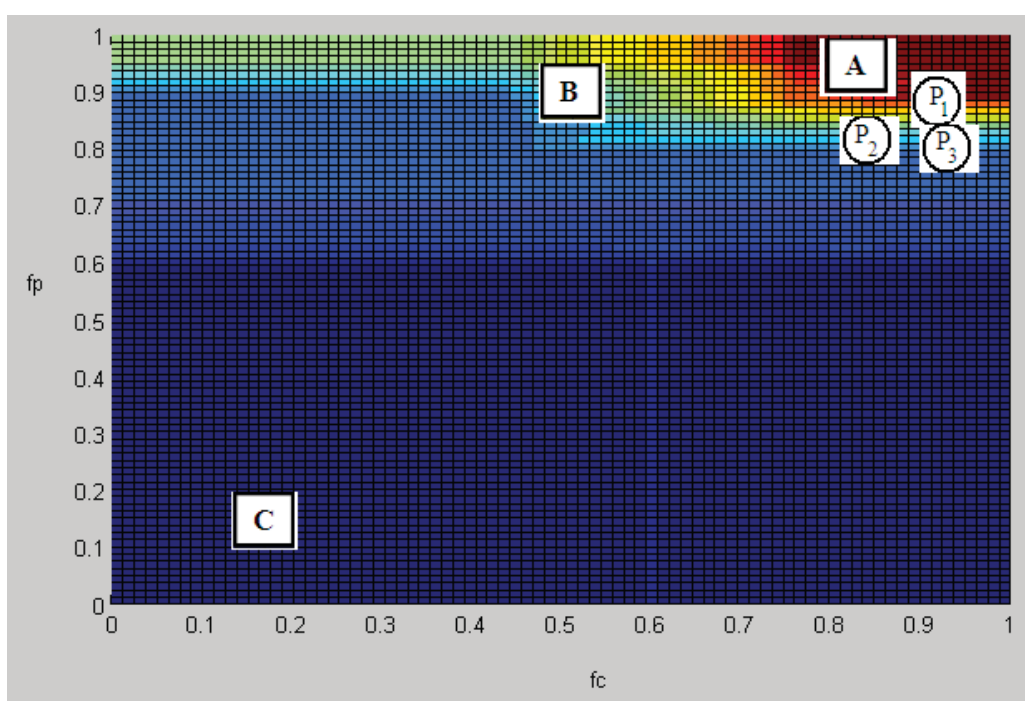


Figura 30. Mapa de contorno da superfície do *Índice Fuzzy de $IEfic_{rac}$*

Na Figura 29 é possível identificar a região no plano $FP \times Fc$ que estabelece os maiores e menores valores de ($IEfic_{rac}$), figurando um instrumento de tomada de decisão dos administradores da usina para possíveis ações de eficiência energética.

Na Figura 30 a Região C representa a classe dos setores cujo índice de ($IEfic_{rac}$) é muito baixo, ou seja, possuem um comportamento energético de racionalidade e eficiência abaixo da maioria dos outros setores das usinas, enquanto que os setores da classe da região B possuem comportamento energético mediano e a região A possui o melhor comportamento, em relação à este aspecto.

Da Figura 31 a Figura 33 a representam uma simulação do sistema baseado em regras *fuzzy* para os valores de FP e Fc obtidos no setor 3 de cada usina, respectivamente, indicado também na Figura 30 pelos pontos P1, P2, e P3, visualmente, estes pontos encontram-se em uma situações médias e alta em relação aos demais pontos do plano, e isto também é constatado no cálculo do índice energético *Fuzzy*, dado por 0,589, 0,629 e 0,426, respectivamente.

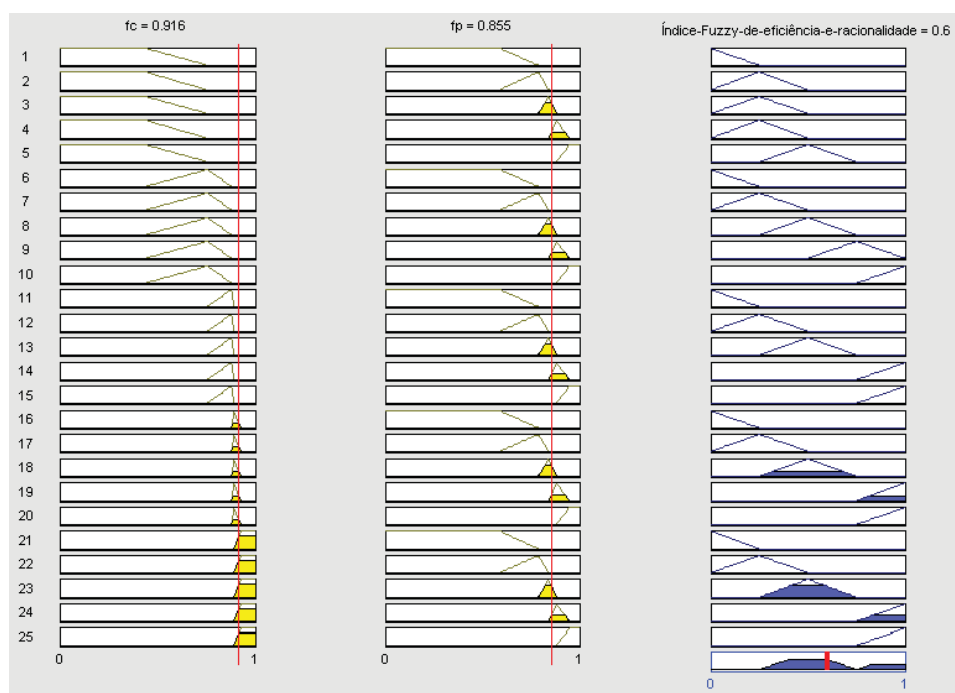


Figura 31. Utilização do método de inferência de *Mamdani*, para (FC) e (FP) no ponto P1.

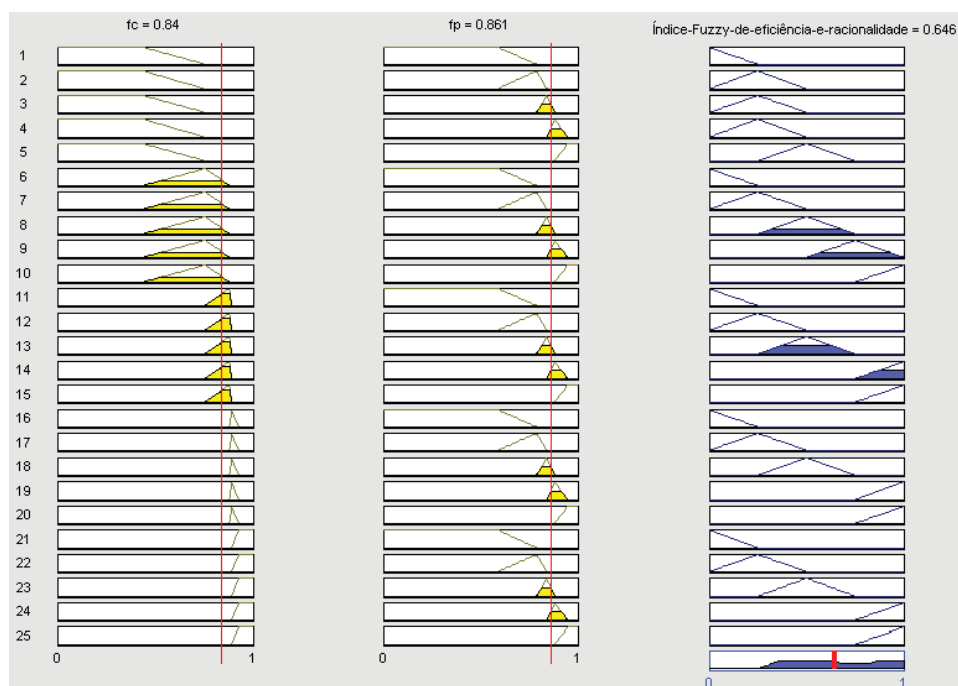


Figura 32.Utilização do método de inferência de Mamdani, para o (FC) e (FP) no ponto P2.

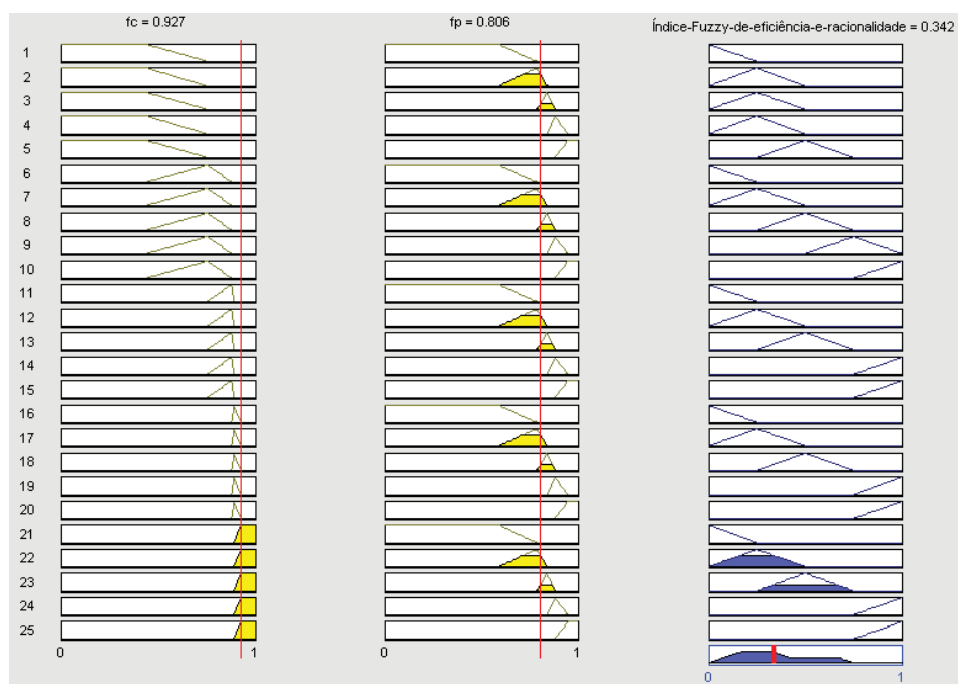


Figura 33.Utilização do método de inferência de Mamdani, para o (FC) e (FP) no ponto P3

Realizando uma análise em relação às funções de pertinência desta variável de saída, é possível observar que estes pontos possuem grau de pertinência maior aos conjuntos *Fuzzy* “Médio” (M), “Alto” (A) e “Baixo” (B), respectivamente, conforme indicam a Figura 34 a Figura 36.

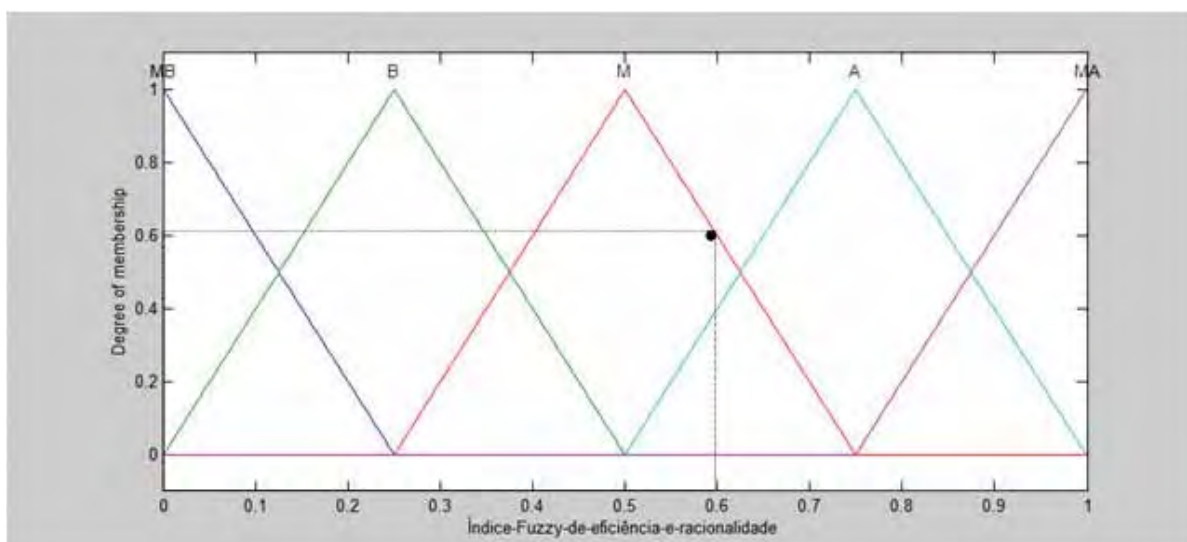


Figura 34. Indicação do maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* “Médio” do ponto P1

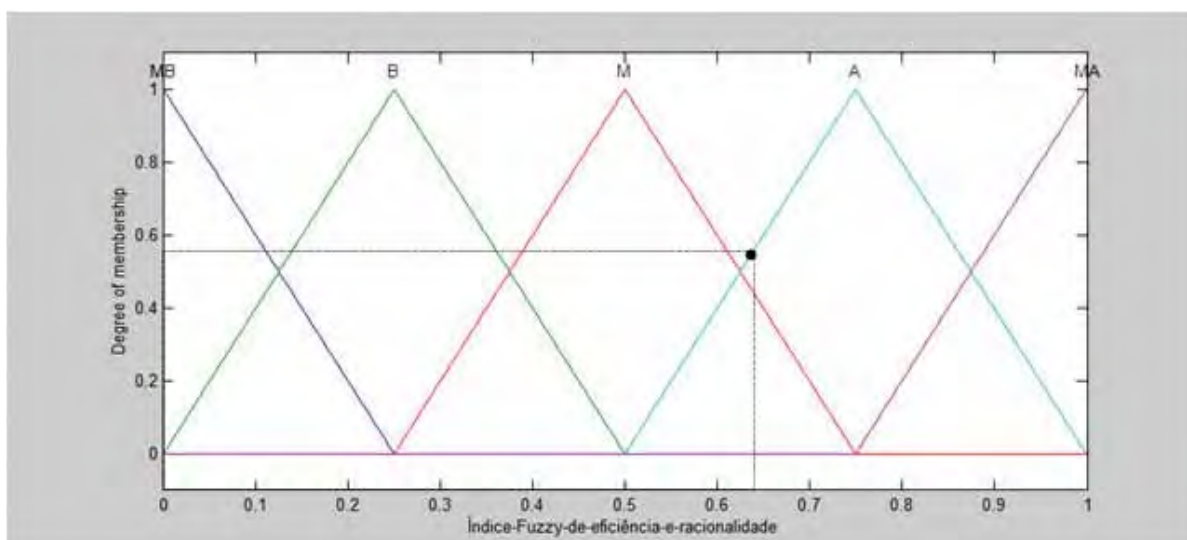


Figura 35. Indicação do maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* “Alto” do ponto P2

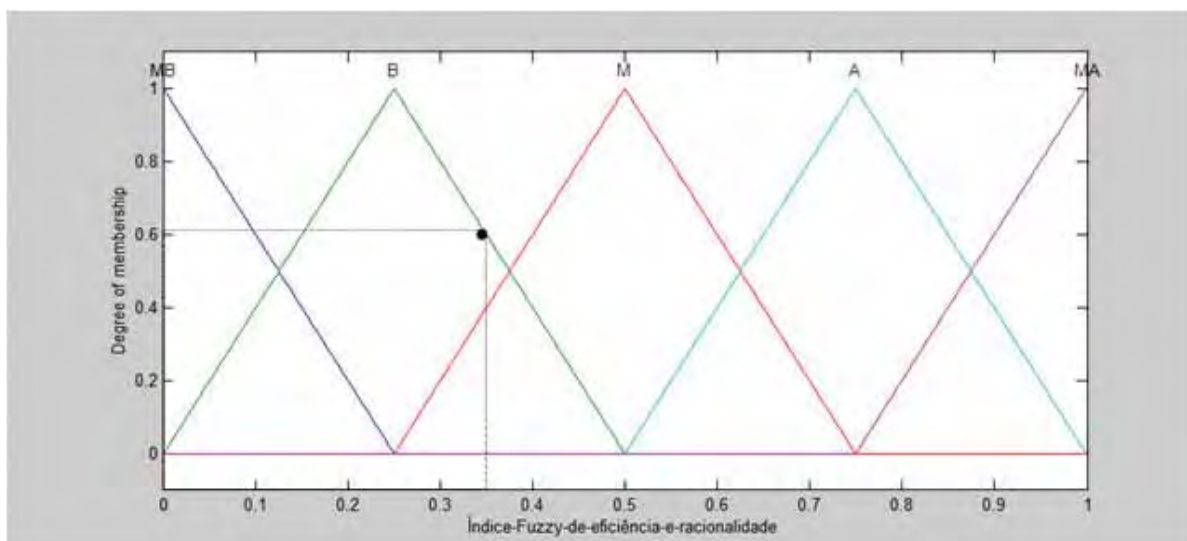


Figura 36. Indicação do maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* "Baixo" do ponto P3

6 CONCLUSÕES

Considerando o período de safra das medições pode-se deduzir pelos valores do índice proporcional de consumo de energia na produção do etanol que cada usina estava direcionada para um tipo de produto, sendo: USA para produção de açúcar, usina USB produção de etanol e USC produção de energia.

A usinas estão gerando energia abaixo da capacidade de processamento da quantidade de cana-de-açúcar, em média de 10% em kWh. t⁻¹, pois na época não haviam ainda realizado investimentos em tecnologia de equipamentos mais eficientes. Apesar de não apresentarem maior produção de energia, os índices do consumo elétrico específico na produção do etanol em kWh. t⁻¹ correspondem aos valores encontrados na literatura.

O sistema baseado em regras *fuzzy* desenvolvido nesse trabalho é de fácil uso e poderá auxiliar gestores sucroalcooleiros, indicando os níveis de $IE_{fic\ rac}$ nos setores que requerem ajustes em parâmetros que interferem no uso racional da energia elétrica, como o (Fc) e (FP).

Conclui-se que uma das principais dificuldades associadas a qualquer programa de conservação de uso final de energia é avaliar e acompanhar o gerenciamento do uso racional de energia em setores industriais complexos.

O índice proposto possibilita que a avaliação possa ser feita de maneira simplificada e comparativa. Considerando as unidades produtoras do setor sucroalcooleiro e

que vendem energia elétrica esse tipo de avaliação é essencial, pois resulta além dos ganhos com eficiência e maior oferta de energia a ser comercializada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Y. V; OLIVEIRA, M. A. G de.; GUERRA, S. M. **Energia sociedade e meio ambiente**. Espanha: Eumed.Net, Universidad de Malaga, 2010. 175 p.

AMENDOLA, M.; SOUZA, A. L.; BARROS, L. C. **Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no MATLAB 6.5.**: versão 2005 do manual apresentado no Ciclo de Palestras/2004, realizado na FEAGRI/UNICAMP. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/~laeciocb/manual_fuzzy_matlab.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2011

ANDRIETTA, S. R. Optimal industrial fermentation. In: WORKSHOP ON PROCESS FOR ETHANOL PRODUCTION, 2009, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: FAPESP, 2009. Disponível em: <http://www.fapesp.br/eventos/2009/09/10_bioen/Silvio_Roberto.pdf>. Acesso em: 25 set. 2001

ANSELM, R. Eficiência energética exige equipamentos com tecnologia avançada. **JORNALCANA**, São Paulo, n. 185, maio 2009. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/pdf/185/%5Ctecind.pdf>>. Acesso em: 25 mar.2011.

ANUÁRIO da cana-de-ácucar. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.anuarios.com.br/port/anuario_capa.php?idAnuario=5>. Acesso em: 3 abr. 2011.

BANDO, F. M. **Sistemas Fuzzy e aproximação universal**. 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Matemática)-Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo.

BITTENCOURT, J. M. **Perspectiva do uso do bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica**, 2008. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2008. Disponível em: <http://www.producao.joinville.udesc.br/tgeps/2008-02/2008_2_tcc05.pdf>. Acesso em: 20 out. 2011

BOR, Y. J. Consistent multi-level energy efficiency indicators and their policy implications. **Energy Economic**, Singapura, v. 30, n. 5, 2008, 2401-241.

BRANDÃO, S. S. da. **Cogeração**: trabalho no âmbito da cadeira de produção e planejamento de energia elétrica, 2004. Disponível em: <ssbrandao.no.sapo.pt/Cogeracao.pdf >. Acesso em: 2 fev. 2009.

BRASIL. **Balanço energético nacional (BEN), 2008**. Disponível em: <http://www.ipen.br/conteudo/upload/200903220937060.Relatorio_Final_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2010.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **A geração termoeleétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil análise do desempenho da safra 2009-2010**. Brasília, DF, 2011a. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf>. Acesso em: 20 out. 2011.

BRASIL. Instituto Nacional de Eficiência Energética. **A eficiência energética e o novo modelo do setor energético**, 2001. Disponível em: <http://www.inee.org.br/download/escos/EE_Novo%20Modelo.pdf>. Acesso em: 25 set. 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cadeia produtiva da agroenergia**. Brasília, DF, 2007b. Disponível em: <http://www.gepai.dep.ufscar.br/img/ec/estudos_cadeia/CadeiaProdutivadaAgroenergia.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária a Abastecimento. **Projeções do agronegócio Brasil 2010/11 a 2020/21**. Brasília, DF, 2011c. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/gestao/projecao/PROJECOES%20DO%20AGRONEGOCIO%202010-11%20a%202020-21%20-%202_0.pdf>. Acesso em: 20 out. 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária a Abastecimento. **Relação das unidades produtoras cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia**. Brasília, DF, 2011d. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/DADOS_PRODUTORES_06_05_2011.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, DF, 2007a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_11.pdf>. Acesso em: 25 out. 2011.

BRASIL. Ministério e Minas de Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Brasília, DF, 2007b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20110606_1.pdf>. Acesso em: 10 set. 2011.

CANASAT. **Mapeamento de cana via imagens de satélite via observação de terra:** tabela da área de cana-de-açúcar por municípios e por estados da região centro-sul, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>>. Acesso em: 25 ago. 2011.

CASTRO, J. N.; DANTAS, G.; BRANDÃO, R. **Crise econômica mundial e a promoção da bioeletricidade.** 2009. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/paper/2009/Crise_Economica_Promocao_Bioeletricidade.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2011.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Bagaço e palha de cana para fins energéticos.** 2010. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=431&Itemid=1380>. Acesso em: 2 mar. 2010.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. **Estrutura tarifária horo-sazonal.** São Paulo, 1990. 17 p.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Fator de potência:** como transformá-lo em um fator de economia. 2005. Apostila. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/\\$FILE/fator_potencia.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2011.

CORREA NETO, V. Potencial da cogeração e planejamento da expansão do setor elétrico. In: WORKSHOP SOBRE COGERAÇÃO, 5., 2008. **Anais eletrônicos...** Campinas: UNICAMP, 2008. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/ver_work.php?work_id=53>. Acesso em: 25 set. 2001.

CREMASCO GABRIEL, C. P. **Aplicação da lógica *fuzzy* para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura,** 2008. 108 f. Tese (Doutor em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

DOMANSKI, E. L. V. **Eficiência energética aplicada aos processos produtivos em uma indústria química.** 2011. 89 f. Dissertação (Tecnologia, Engenharia e Modelagem)-Universidade Federal do ABC, Santo André, 2011. Disponível em: <<http://pgene.ufabc.edu.br/conteudo/bloco2/publicacoes/Dissertacoes2011/DissertacaoEmerson.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2011.

FARLA, J. C. M.; BLOK, K. The use of physical indicators for the monitoring of energy intensity developments in the Netherlands, 1980-1995. **Energy**, Aalborg, n. 25, p. 609-638, 2000.

FARLA, J.; BLOK, K.; SCHIPPER, L. Energy efficiency developments in the pulp and paper industry. **Energy Policy**, Amsterdam, n. 25, p. 745-758, 1997.

FERREIRA, J. J.; FERREIRA, T. J. **Economia e gestão da energia**. Lisboa: Texto, 1994. 156 p.

FILGUEIRAS, J. E. O.; PINTO, D. F.; RODRIGUES, C. R. B. Sistemas de gerenciamento no combate ao desperdício de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE, 2006. p. 1807.

FINGUERUT, J. O etanol de 2a geração é o pré-sal da cana-de-açúcar. 2010. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/opiniaio/show.asp?msgCode={EE028618-03C1-4912-A558-494A23418BEF}>>. Acesso em: 2 mar. 2011.

FONSECA, F. M. Acesso de usinas sucroalcooleiras a sistemas e potência: cenários tecnológicos. In: CONGRESO CIER DE LA ENERGÍA /CONCIER - ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO REGIONAL - RETOS Y PERSPECTIVAS, 3., 2007. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <b-dig.iie.org.mx/BibDig/P08-0076/..III%20CONCIER-BR-72-D.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2011.

GODOI, J. M. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, S. Gestão da eficiência energética. In: INTERNATIONAL WORKSHOP/ ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 2., 2009, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: UNIP, 2009. Disponível em: <<http://www.advancesincleanerproduction.net/second/files/sesoes/5a/1/J.%20M.%20A.%20Godoi%20-%20Resumo%20Exp.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

GUELF, R. **Análise da relação entre o faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa e reativa utilizando hiperbolóides de carga e potência**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

HALMEMAN, M. C. R. **Potencial e custos de produção de hidrogênio eletrolítico no Brasil junto às usinas de açúcar e etanol**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2008.

HOLLANDA, J. B. Incentivos financeiros para que as concessionárias de eletricidade invistam em eficiência nos usos finais de energia no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. 2007. Disponível em: <http://www.inee.org.br/eficiencia_downloads.asp?Cat=eficiencia>. Acesso em: 20 nov. 2011.

HORTELAN, A. J. **Controle e otimização de fator de carga**. 2007. 46 f. Monografia (Curso de Controle e Automação)- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2007/JAIR%20HORTELAN.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2011.

HULL, D.; GALLACHOIR, B.; WALKER, N. Development of a modelling framework in response to new European energy-efficiency regulatory obligations: the Irish experience. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 73, n. 12, p. 5363-5375, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Cogeneration and distributed energy**. 2009. Disponível em: <<http://www.iea.org/files/CHPbrochure09.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

JANK, M. **Aquecimento global**. 2009. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/noticias/2010243/entrevista-com-presidente-da-única>>. Acesso em: 2 abr. 2011.

KITAYAMA, O. Muito potencial e pouco aproveitamento. **Revista GTD**, São Paulo, v. 26, n. 4, jul./ago. 2008.

KOBLITZ, L. O. Geração de energia elétrica no setor sucro-alcooleiro. 2007. In: SIMPÓSIO E MOSTRA INTERNACIONAL DA TECNOLOGIA DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOLEIRA, 1., 2007, Piracicaba. **Anais eletrônicos...** Piracicaba: ACIP, 2007. Disponível em: <<http://www.simtec.com.br/palestras/simcoger2007.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

KUCUKALI, S.; BARIS, K. Turkey's short-term gross annual electricity demand forecast by fuzzy. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 38, n. 5, p. 2438-2445, 2010.

LEAL, M. R. L. V. Estimativa do potencial de energia na expansão. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, 2006, n. 10, v. 9, out./dez. 2006. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=492>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica**: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 2 v.

MARQUES, M.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. **Eficiência energética**: teoria & prática. Itajubá: Editora da FUPAI, 2007. 224 p.

MOREIRA, D. de O. **A cana-de-açúcar é insuperável em termos de produção de matéria seca e energia/ha, em um único corte**. ReHAgro. 2011. Disponível em: <<http://www.rehagro.com.br/siterehagro/publicacao.do?cdnoticia=2172>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

NEGRI, J. C. Bioeletricidade de cana-de-açúcar: reduzindo emissões, agregando valor a rede nacional. In: ETHANOL SUMMIT, 2009. São Paulo. Disponível em: <<http://www.ethanolsummit.com.br/upload/palestrante/2009061505303664028410781.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2011.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, dez. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502007000400007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 nov. 2011.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency?: concept issues. **Energy Policy**, Amsterdam, n. 24, p. 377-390, 1996.

PEIXOTO, M.da S. **sistemas dinâmicos e controladores fuzzy: um estudo da dispersão da morte súbita dos citros em são Paulo**. 2005.189 f. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada)-Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000348243&fd=y>>. Acesso em: 3 out. 2011.

RAMOS, R. A. V. et al. Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 5, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: CLAGTEE, 2003. Disponível em: <<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/TEIRCS%20B-018.pdf>>. Acesso: 02 dez. 2011.

RIBACIONKA, F. **Sistemas computacionais baseados em lógica fuzzy**. 1999. 115 f. Dissertação (Engenharia Elétrica)-Universidade Mackenzie, São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.ime.usp.br/~tonelli/verao-fuzzy/laecio/logica_fuzzy.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2011.

ROCHA, G. **Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira com processo de extração por difusão**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

RODRIGUES, L. G. S. **Análise energética de diferentes sistemas de Cogeração com bagaço de cana-de-açúcar**. 2005. 145 f. Dissertação (Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

RUDORFF, B. F. T et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using landsat data. **Remote Sensing**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SCHLESINGER, S. et al. **Cana e etanol: expansão com responsabilidade socioambiental.**, São Paulo: Visão Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.agroambiente.org.br/arquivo/biblioteca/cana_e_etanol_expansao_com_responsabilidade_socioambiental.icv>. Acesso em: 20 ago. 2011.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 200 p.

SILVA, C. R. A da. et.al. A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Canoas, 2005, n. 2, dez. 2005. Disponível em: <http://www.rbciamb.com.br/images/online/02_artigo_4_artigos83.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2010.

SILVA, C. E. C. **Avaliação dos condicionantes ambientais na perspectiva de expansão da produção de etanol no Brasil**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/conceicao_elaine.pdf>. Acesso em: 20 set. 2011.

SOUZA, O. T. L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para determinação do calor latente com aplicação em sistemas de irrigação**. 2004. 113 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

TANAKA, K. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. **Energy Policy**, Amsterdam, n. 36, p. 2887-2902, 2008.

TANSCHKEIT, R. **Sistemas Fuzzy**. Rio de Janeiro, 2004. Apostila. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~mauro/ine5377/leituras/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

TOLMASQUIN, M. T. Futuro promissor para o etanol no Brasil. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, jul./set. 2011. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=964>>. Acesso em: 10 set. 2011.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Ranking da produção de cana, açúcar e etanol das unidades da Região Centro-Sul**. 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica>>. Acesso em: 2 maio 2011.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **São Paulo tem 56% de mecanização da colheita da cana**. 2010. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1064893>>. Acesso em: 2 abr. 2010.

WORREL, E. et al. Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 25, n. 7, p. 727-744, 1997.

WU, L. M. et al. Structure model of energy efficiency indicators and applications. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 35, n. 7, p. 3768-3777, 2007.

YAMADA, M. C.; KATO, E. R. R.; PORTO, A. J. V. Estudo da produtividade e da eficiência de produção na indústria sucroalcooleira, com o uso de simulação de sistemas. In: ENCONTRO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18., 1998, Niterói. **Anais...** Niterói: ABEPRO, 1998. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998_ART293.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2011.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, Cambridge, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.