

GABRIEL PERALES OLIVEIRA MOTTA

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS E IMPACTOS PARA
SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL POR ETANOL NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRO**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção

São Paulo

2011

GABRIEL PERALES OLIVEIRA MOTTA

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS E IMPACTOS PARA
SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL POR ETANOL NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRO**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo de Senzi Zancul

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Motta, Gabriel Perales Oliveira

Análise de alternativas e impactos para a substituição do diesel por etanol no processo de produção sucroalcooleiro / G.P.O. Motta -- São Paulo, 2011.

172 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Motores diesel 2.Etanol 3.Impactos ambientais 4.Análise de produtos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II. t.

À família, amigos e ao Ó

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Eduardo de Senzi Zancul, orientador e contribuidor deste trabalho de formatura.

Agradeço aos colaboradores das empresas participantes, pela solicitude e disponibilidade, viabilizando a realização deste estudo.

E aos amigos e colegas, por sua contribuição fundamental no amadurecimento das idéias aqui exploradas.

RESUMO

À luz da crescente preocupação global em torno dos combustíveis fósseis e de seus impactos ambientais, a busca por uma nova fonte limpa de energia tem se intensificado e crescido em importância. O etanol brasileiro é uma das alternativas mais proeminentes neste sentido. Atualmente, no Brasil, cerca de 90% dos novos carros vendidos podem utilizar tanto o etanol como a gasolina como combustível. Estes veículos bicompostos já representam cerca de 35% da frota nacional, e impulsionaram a produção de etanol para mais de 25 bilhões de litros por ano.

No entanto, produzir etanol não é um processo completamente livre de emissões. É estimado que para cada litro de etanol produzido, cerca de 359 gramas de CO₂ equivalente são emitidos à atmosfera, de forma direta ou indireta. Deste total, aproximadamente 65 gramas se deve exclusivamente à queima do diesel utilizado em caminhões e máquinas agrícolas, sendo este um dos principais geradores de emissões no ciclo produtivo sucroalcooleiro. Se estes veículos e equipamentos pudessem consumir o próprio etanol no lugar do diesel, a cadeia produtiva do etanol teria sua pegada de carbono reduzida sensivelmente, e poderia se aproximar de um processo de ciclo fechado, ou seja, que não gera emissões líquidas de CO₂ equivalente.

Este trabalho mapeia as possíveis alternativas tecnológicas para a substituição do diesel pelo etanol na cadeia produtiva do etanol. Utilizando um método de gestão de portfólio, as diferentes soluções são analisadas de acordo com a viabilidade econômica e ambiental, e com a maturidade tecnológica. Por fim, a alternativa mais bem avaliada é detalhada, e seus potenciais impactos econômicos e ambientais na indústria sucroalcooleira são estimados.

A execução das atividades de trabalho acarretou no mapeamento de quatro soluções: (1) a Ottorização de motores a diesel; (2) o sistema de dupla injeção controlado eletronicamente; (3) o uso de etanol hidratado aditivado com polietilenoglicol; (4) o uso do diesel de cana (farneseno). Destes, o sistema de dupla injeção obteve a melhor avaliação no processo de gestão de portfólio, se apresentando como provável solução tecnológica a ser explorada para a substituição do diesel no setor sucroalcooleiro nos próximos anos. A análise quantitativa de impactos estimou, para cada tonelada de cana cultivada, uma economia de R\$ 0,65 e redução da pegada de carbono em 22 gramas de CO₂ equivalente.

Palavras-chave: Etanol, Diesel, Motores, Pegada de carbono, Gestão de portfólio.

ABSTRACT

In face of the growing global concern regarding fossil fuel emissions and its environmental impacts, the search for a clean energy alternative has intensified and grown in importance. Brazilian ethanol is one of the foremost success cases in this aspect. Today, in Brazil, close to 90% of new cars sold are able to use either ethanol or gasoline as its fuel. Those bi-fuels automobiles already represent 35% of the national fleet, and boosted the ethanol production to more than 25 billions liters per year.

However, producing ethanol is not a completely emission-free process. It is estimated that for every liter of ethanol produced, close to 359g of CO₂ equivalent is emitted to the atmosphere, either directly or indirectly. Out of this total, approximately 65g are due exclusively to burning diesel in trucks and machinery, what makes it one of the main causes of emissions in the ethanol production cycle. If those vehicles and equipments could use ethanol itself instead of diesel, ethanol production would have its carbon footprint reduced significantly, and could become closer to a closed cycle process (i.e. a process that does not have liquid emissions of CO₂ equivalent)

This work maps the possible technological alternatives for the replacement of diesel by ethanol driven engines in the ethanol production chain. Using a portfolio management approach, the different solutions are assessed with regard to its economical and environmental feasibility, as well as its technological maturity. Finally, the chosen alternative is evaluated, and its potential economical and environmental impacts in the sugar cane production industry are estimated.

The execution of the proposed activities resulted in the mapping of four solutions: (1) modification of diesel engines into ethanol Otto engines; (2) electronic controlled double injection system; (3) use of ethanol admixed with polyethylene glycol; (4) use of sugarcane diesel (farnesene). Among these, the double injection system was the best evaluated alternative by the portfolio management methodology, being therefore a solution that will likely be applied to substitute diesel by ethanol in the sugarcane industry. The quantitative analysis of the impacts estimated a cost reduction of R\$ 0,65 and an emission reduction of 22 grams of CO₂ equivalent, per ton of sugarcane.

Keywords: Ethanol, Diesel, Engines, Carbon footprint, Portfolio management

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo mundial de Energia Primária em 2009 ¹	19
Figura 2 – Consumo e preço do petróleo de 1979 a 2009	20
Figura 3 – Preços de combustíveis ao consumidor.....	26
Figura 4 – Evolução histórica da produção de álcool.....	31
Figura 5 – Comparação entre a evolução da produção brasileira de combustíveis entre 1970 e 2009	32
Figura 6 – Produção brasileira de etanol em milhões de litros.....	37
Figura 7 – Variação da porcentagem de ATR por produto final: etanol anidro e hidratado	37
Figura 8 – Evolução histórica da comercialização de carros leves a álcool e bicompostíveis.....	38
Figura 9 – Localização da produção de cana-de-açúcar no Brasil	41
Figura 10 – Comparação entre custos de produção do etanol (2005)	42
Figura 11 – Comparação de emissões de GEE para diferentes combustíveis	43
Figura 12 – Esquematização – Cadeia Sucroenergética.....	46
Figura 13 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola	49
Figura 14 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa de CCT.....	50
Figura 15 – Exemplo ilustrativo de caminhão utilizado na etapa de CCT	50
Figura 16 – Fluxograma das atividades que compõem a fase industrial	52
Figura 17 – Esquematização – Efeito Estufa.....	54
Figura 18 – Panorama mundial: Pegada de Carbono per Capita (toneladas de CO2/população).....	61
Figura 19 – Vendas de veículos bicompostíveis no mercado brasileiro.....	65
Figura 20 – Modificações necessárias para “blends” (gasolina + álcool) em veículos bicompostíveis	66

Figura 21 – Campos de soluções para substituição do diesel pelo etanol no setor sucroenergético.....	71
Figura 22 – Critérios mais utilizados pelas corporações americanas em modelos de pontuação para GP.....	77
Figura 23 – Exemplo de gráfico-bolha: Risco x Retorno.....	78
Figura 24 – Exemplo de hierarquia de critérios/objetivos.....	80
Figura 25 – Matrizes de comparação inicial e normalizada e cálculo do vetor de prioridade: análise de critérios.....	82
Figura 26 – Exemplo de análise de consistência	83
Figura 27 – Matrizes de comparação e matriz de vetores de prioridade: análise de alternativas.....	84
Figura 28 – Cálculo do vetor de resultados finais: priorização de alternativa para a meta principal	85
Figura 29 – Fases da metodologia de projeto	86
Figura 30 – Exemplos de empresas para mapeamento de soluções tecnológicas	88
Figura 31 – Esquematização da forma de apresentação do portfólio de soluções	89
Figura 32 – Esquematização: análise de maturidade e viabilidade	91
Figura 33 – Esquematização do diagrama Maturidade x Viabilidade.....	92
Figura 34 – Esquematização do processo de priorização através do diagrama Viabilidade x Maturidade	94
Figura 35 – Esquematização ilustrativa da fase qualitativa da metodologia de projeto	95
Figura 36 – Consolidação do portfólio de soluções tecnológicas	108
Figura 37 – Esquematização do protótipo de dupla injeção	113
Figura 38 – Hierarquia do método AHP	122
Figura 39 – Vetor de prioridade e taxa de consistência do segundo nível hierárquico do AHP	123
Figura 40 – Pesos de ponderação dos critérios	123

Figura 41 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C1.....	125
Figura 42 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C1	125
Figura 43 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C2.....	126
Figura 44 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C2	126
Figura 45 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C3.....	127
Figura 46 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C3	128
Figura 47 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C4.....	129
Figura 48 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C4	129
Figura 49 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C5.....	130
Figura 50 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C5	131
Figura 51 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C6.....	132
Figura 52 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C6	132
Figura 53 – Consolidação dos vetores de prioridade.....	133
Figura 54 – Resultados finais e classificação do AHP	133
Figura 55 – Avaliação de maturidade das soluções.....	135
Figura 56 – Gráfico Viabilidade x Maturidade	136
Figura 57 – Consumo de diesel em operações agrícolas	139
Figura 58 – Consumo de diesel nas colheitas mecânica e manual	140
Figura 59 – Consumo de diesel total na colheita.....	140
Figura 60 – Consumo de diesel nas operações de transporte	142
Figura 61 – Consumo de diesel total nos transportes	143
Figura 62 – Cenários e taxas de substituição.....	144
Figura 63 – Premissas econômicas	145
Figura 64 – Premissas ambientais	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Preços e consumo de etanol e gasolina: principais estados brasileiros	39
Tabela 2 – Diferenciais competitivos entre as alternativas de combustível renovável	40
Tabela 3 – Diagramas de bolha mais usuais: eixos principais	79
Tabela 4 – Escala de relativa importância	81
Tabela 5 – Lista de equipamentos consumidores de diesel na produção de etanol.....	96
Tabela 6 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no preparo de solo e plantio	97
Tabela 7 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no trato de cana soca	97
Tabela 8 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados na colheita.....	98
Tabela 9 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte de cana-de-açúcar.....	98
Tabela 10 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte de mudas....	98
Tabela 11 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados na aplicação da torta de filtro	98
Tabela 12 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte e aplicação de vinhaça.....	99
Tabela 13 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte de adubo	99
Tabela 14 – Leiaute da tabela de consolidação de dados sobre consumo de diesel ...	101
Tabela 15 – Consumo total de diesel por atividade de preparo de solo e plantio	138
Tabela 16 – Consumo total de diesel por atividade de tratos de cana soca.....	138
Tabela 17 – Consumo total de diesel por atividade de tratos de cana soca.....	139
Tabela 18 – Rendimento energético dos combustíveis	144
Tabela 19 – Diesel substituído e consumo adicional de etanol	145
Tabela 20 – Economia total	146
Tabela 21 – Economia percentual para os Cenários 1, 2 e 3	146
Tabela 22 – Conversão energética das emissões do diesel.....	147

Tabela 23 – Cálculo da pegada de carbono associada à substituição do diesel..... 147

Tabela 24 – Redução percentual da PC para os cenários 1,2 e 3 148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviações

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ATR	Açúcar total recolhido
CCT	Corte, Carregamento e Transporte
CFC	Clorofluorocarboneto
ECU	Unidade de Controle Eletrônico
ECV	<i>Expected Commercial Value</i>
EF	<i>Ecological Footprint</i>
EIO	<i>Environmental Input-Output Analysis</i>
EMPIs	<i>Energy Performance Index</i>
ESI	<i>Environmental Sustainability Index</i>
FFV	<i>Flex fuel vehicle</i>
GEE	Gases efeito estufa
GP	Gestão de portfólio
há	Hectare
IRR	<i>Internal rate of return</i>
Kg	Kilograma
kcal	Kilocaloria
kJ	Kilojoule
L	Litro
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
MBD	Million barrels per day (Milhões de barris por dia)
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
MJ	Mega Joule

NPV	<i>Net present value</i>
ONG	Organização não-governamental
PC	Pegada de carbono
PIB	Produto interno bruto
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
ROI	<i>Return on investment</i>
TC	Tonelada de cana-de-açúcar

Siglas

ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BEST	<i>Bio-Ethanol for Sustainable Transport</i>
BCG	Boston Consulting Group
BIOEN	Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
BP	British Petroleum
CAT	Centro de Apoio Tecnológico
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COP	Conferências das Partes da Convenção
FAPEMIG	Fundação de amparo à pesquisa do estado de Minas Gerais
FAPESP	Fundação de amparo à pesquisa do estado de São Paulo
GM	General Motors
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
IPI	Imposto sobre produtos industrializados
ONU	Organização das Nações Unidas
PNA	Programa Nacional do Álcool

Pró-Álcool	Programa Nacional do Álcool
Proconve	Programa de Controle do Ar de Veículos Automotores
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar

LISTA DE SÍMBOLOS

i – índice linha do termo da matriz de comparação

j – índice coluna do termo da matriz de comparação

$\sum a_{ij}$ – somatória dos valores da matriz de comparação

$\sum a'_{ij}$ – somatória dos valores da matriz de comparação normalizada

CR – taxa de consistência

λ_{Max} – valor principal do vetor de prioridade

CI – índice de consistência

n – quantidade de módulos

RI – índice de consistência aleatória

PC – pegada de carbono

η - rendimento energético

SUMÁRIO

1. Introdução.....	19
1.1 O BIOEN	21
1.2 Localização deste trabalho no contexto do Bioen	24
1.3 O problema.....	25
1.4 Objetivo do trabalho	27
1.5 Estrutura geral do trabalho.....	27
2. Revisão da literatura.....	29
2.1 Etanol no Brasil: visão do mercado	29
2.1.1 Introdução	29
2.1.2 Do Pró-Álcool ao motor flex	33
2.1.3 Diferenciais competitivos do Brasil	39
2.1.4 O setor sucroalcooleiro no Brasil	43
2.2 Processo produtivo do etanol.....	46
2.2.1 Produção agrícola.....	47
2.2.2 Etapa de corte, carregamento e transporte (CCT).....	49
2.2.3 Produção industrial.....	51
2.3 Aquecimento global e indicadores ambientais.....	52
2.3.1 Aquecimento global	53
2.3.2 Indicadores ambientais	57
2.4 Motores de combustão interna	61
2.4.1 Veículos e motociclos flex.....	62
2.4.2 Substituição de diesel	67
2.5 Gestão de portfólios	71
2.5.1 Conceito de gestão de portfólios	72
2.5.2 Metodologias para gestão de portfólios	74
2.5.3 Analytic Hierarchy Process - AHP	79
3. Método.....	86
3.1 Fase 1. Criação do portfólio.....	87
3.1.1 Entrevistas com desenvolvedores	87

<i>3.1.2 Definição do portfólio</i>	88
3.2 Fase 1. Avaliação de alternativas tecnológicas.....	90
<i>3.2.1 Definição de critérios e avaliação das alternativas.....</i>	90
<i>3.2.2 Diagrama de análise de alternativas</i>	92
3.3 Fase 2: Metodologia de avaliação de impactos	96
<i>3.3.1 Etapa de avaliação dos impactos ambientais.....</i>	101
<i>3.3.2 Etapa de avaliação de impactos econômicos</i>	103
4. Mapeamento e avaliação de alternativas	105
4.1 Entrevistas.....	105
4.2 Definição do portfólio.....	107
<i>4.2.1 Ottorização</i>	109
<i>4.2.2 Dupla Injeção</i>	111
<i>4.2.3 Etanol aditivado</i>	115
<i>4.2.4 Diesel de Cana</i>	118
4.3 Avaliação das alternativas	120
<i>4.3.1 Aplicação do AHP</i>	121
<i>4.3.2 Maturidade das soluções</i>	134
5. Impactos	137
5.1 Modelo Base	137
<i>5.1.1 Operações agrícolas.....</i>	137
<i>5.1.2 Colheita</i>	139
<i>5.1.3 Transporte</i>	140
<i>5.1.4 Taxa de substituição e rendimento</i>	143
5.2 Avaliação de impactos econômicos	145
5.3 Avaliação de impactos ambientais	146
6. Conclusão	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153
ANEXO A – Roteiro de entrevista com desenvolvedores	160
ANEXO B – Modelo de email de contato com desenvolvedores	161

ANEXO C – Matrizes de comparação e tabelas de cálculo do método AHP.....	162
ANEXO D – Modelo de análise de impactos	166

1. Introdução

No século passado as fontes fósseis se consolidaram como os principais combustíveis da humanidade, sendo essenciais para o desenvolvimento industrial e tecnológico vivido neste período. Tanto o petróleo, quanto o carvão e o gás natural, se mostraram fontes de poder calorífico alto e de extração relativamente barata, se tornando rapidamente as fontes de energia mais utilizadas em todo o mundo. Em 2009, estes elementos representaram, em conjunto, cerca de 88% de toda a energia consumida no planeta (Figura 1).

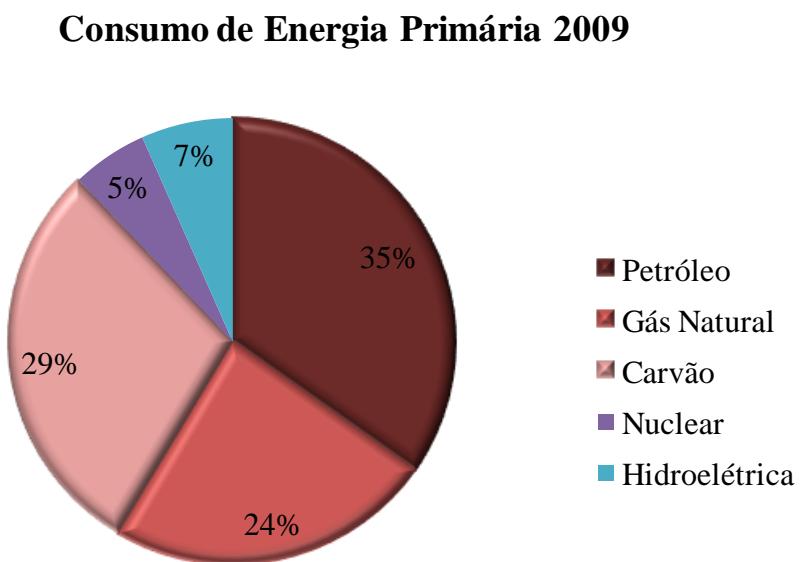


Figura 1 - Consumo mundial de Energia Primária em 2009¹

¹ Despreza fontes alternativas como biomassa, energia solar e eólica

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos de BP Statistical Review, 2010

Este quadro tem gerado preocupação crescente na comunidade internacional pela incerteza em relação à segurança no suprimento de energia e pelos impactos ambientais gerados por este modelo.

É amplamente sabido que a queima extensiva de hidrocarbonetos tem graves consequências para o meio ambiente, geradas pelo desbalanço entre o uso e a reciclagem destes compostos pelos ecossistemas. Entre os problemas mais conhecidos estão a emissão de

gases poluentes como monóxido de carbono e dióxido de enxofre, os acidentes ambientais relacionados à exploração destes combustíveis, e a elevação da temperatura do planeta.

Além da questão ambiental, a outra preocupação em torno dos combustíveis fósseis, mais especificamente do petróleo, é por quanto tempo estas fontes poderão ser exploradas a preços suficientemente baixos para suportar demanda mundial por energia. A Figura 2 ilustra a evolução do consumo e do preço do petróleo nos últimos trinta anos. Neste período o petróleo manteve uma tendência ascendente tanto de preço quanto de consumo, preocupando os países importadores e levantando suspeitas sobre a viabilidade da utilização do petróleo no longo prazo (BP Statistical Review, 2010).

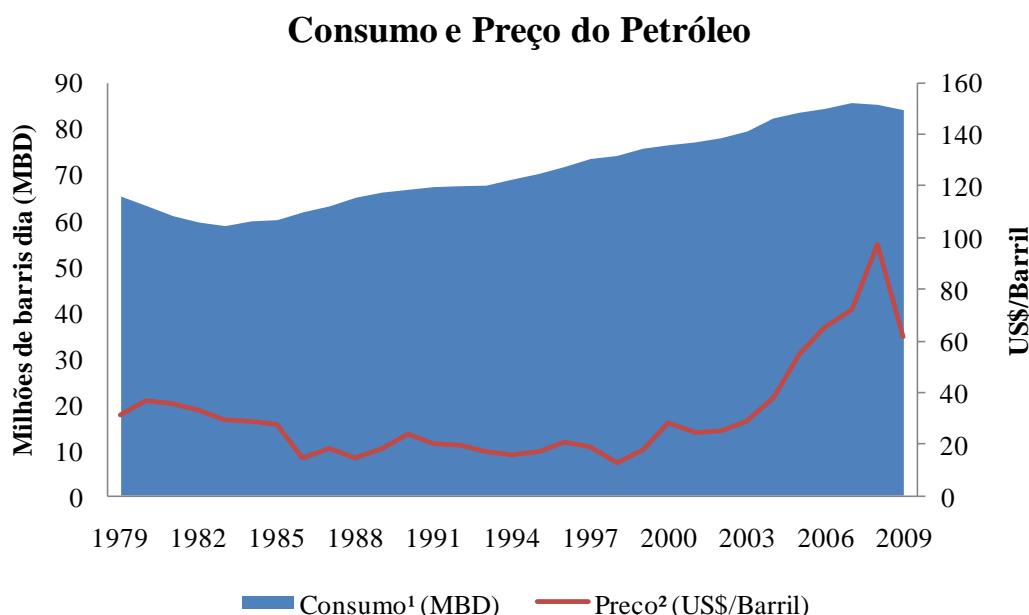


Figura 2 – Consumo e preço do petróleo de 1979 a 2009

¹ Consumo medido em milhões de barris de petróleo por dia

² Preço baseado no BRENT “Spot”

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos de BP Statistical Review, 2010

Foi neste contexto que a agroenergia surgiu como alternativa energética para os combustíveis fósseis. A obtenção de energia a partir de plantas é sensivelmente menos agressiva ao ambiente, já que os hidrocarbonetos queimados são naturalmente assimilados novamente ao ambiente através da fotossíntese; e tem se tornado cada vez mais viável economicamente.

O Brasil ocupa espaço de destaque neste setor, sendo proeminente tanto na produção agrícola e industrial de combustíveis renováveis como também no desenvolvimento de tecnologia para a utilização destes combustíveis, como é o caso do motor flex (FAPESP, 2007). Esta liderança é consequência de uma combinação entre políticas públicas e vantagens competitivas na agricultura e na indústria de biocombustíveis. Para manter esta posição é necessário que haja um contínuo investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, aplicações e fontes de energia renovável. É exatamente com esta visão que surge o BIOEN, apresentado no próximo item.

1.1 O BIOEN

O BIOEN é o programa de pesquisa em bioenergia financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), e tem como objetivo fomentar a produção de pesquisa, tanto acadêmica como industrial, sobre o etanol e outras fontes de energia renováveis relacionadas com a indústria do etanol, assegurando a posição do Brasil entre os líderes mundiais na pesquisa e na indústria de bionergia.

O programa envolve instituições de referência em pesquisa como a Universidade Estadual de Campinas e a Universidade de São Paulo, conta com apoio de diversas agências de suporte à pesquisa, como FAPESP, CNPq e FAPEMIG, além de ter parcerias firmadas com importantes empresas do setor químico e sucroalcooleiro, como Braskem, Dedine e Oxiteno (BIOEN, 2011).

O BIOEN é estrategicamente organizado em cinco áreas de pesquisa e desenvolvimento. São elas: (1) Biomassa, (2) Tecnologias do Etanol, (3) Biorefinarias e Química, (4) Motores e (5) Impactos. Examinaremos cada uma delas com mais detalhe a seguir.

Divisão de pesquisa em biomassa

A divisão de pesquisa em biomassa visa estudar os aspectos bioquímicos da cana-de-açúcar e de outras espécies que sejam propícias para a produção de biocombustíveis. Através da análise das relações entre genoma, metabolismo e respostas fisiológicas ao ambiente, pretende-se desenvolver espécies geneticamente melhoradas que possam oferecer uma planta

mais resistente às adversidades do ambiente e ao mesmo tempo com maior potencial energético. Os principais objetivos desta divisão são (FAPESP, 2010):

- Desenvolver novos tipos de cana-de-açúcar;
- Explorar as transformações genéticas da cana-de-açúcar e de outras gramíneas;
- Mapear genomas;
- Entender a arquitetura e função biológica da parede celular;
- Descobrir novas espécies de fungos, capazes de degradar biomassa;
- Melhorar as práticas de campo visando o aumento da produtividade agrícola, incluindo manejo de solo, fertilização e agricultura de precisão;
- Melhorar o controle de pragas e pestes através de controle bioquímico, desenvolvimento de espécies resistentes e práticas de campo adequadas.

Divisão de pesquisa em tecnologia industrial de etanol

O Brasil é referência em processos industriais e de engenharia relacionados à cana-de-açúcar. Esta divisão do BIOEN tem por objetivo continuar estimulando o desenvolvimento destas áreas, para que a indústria sucroalcooleira brasileira possa se tornar ainda mais energeticamente eficiente e ambientalmente sustentável. Os principais objetivos desta divisão são (FAPESP, 2010):

- Identificar e diminuir gargalos na cadeia de produção do etanol
- Melhorar o processo de fermentação
- Otimização da reutilização da água, e da eficiência energética
- Melhorar processo de separação de etanol desidratado
- Desenvolver tecnologia de etanol celulósico

Biorefinarias e química

A economia moderna depende fortemente do petróleo não somente para a fabricação de combustíveis, mas também para a produção de muitos outros produtos que têm como matéria prima um de seus derivados (polímeros, lubrificantes, entre outros). Esta divisão de

pesquisa do BIOEN tem como principal meta estudar e desenvolver novas utilidades e tecnologias para o etanol, visando substituir os derivados de petróleo. Os principais objetivos desta divisão são (FAPESP, 2010):

- Desenvolver a produção de etanol e biodiesel através da plantação de oleogenosas nas áreas de renovação de planta de cana-de-açúcar
- Desenvolver produtos a partir do etanol via acetaldeído e etileno
- Estudar a síntese química de compostos oxigenados intermediários (alcoóis, cetonas ácidas), polímeros (PHA, ácido lático) e nutracêuticos direto da sucrose
- Desenvolver biocatálise para a transformação de carboidratos em compostos valiosos

Divisão de pesquisa em motores

O etanol, como fonte de energia renovável, tem sido aproveitado quase que exclusivamente como combustível para motores de combustão interna. Para garantir a melhor utilização das diversas fontes de energia renovável é importante desenvolver novas tecnologias e aplicações que maximizem o ganho energético, enquanto minimizam os impactos ambientais. Desta forma, a divisão de pesquisa em motores visa desenvolver novas configurações de motores que utilizem combustíveis renováveis de forma eficiente, focando em motores à combustão e células de carga combustível. Os principais objetivos desta área são (FAPESP, 2010):

- Contribuir com o desenvolvimento e evolução dos motores de combustão interna e das células combustível, de forma a consolidar o etanol como substituto renovável da gasolina
- Desenhar motores *flex* que atinjam o mesmo nível de performance e consumo de motores que utilizam uma mistura fixa de combustíveis
- Solucionar o problema da partida fria associada ao uso de etanol puro

- Desenvolver produtos derivados do etanol ou da cana-de-açúcar, que possuam as características físico-químicas adequadas para o uso em motores de compressão (Diesel).

Divisão de pesquisa em impactos

Para garantir a sustentabilidade e viabilidade do uso de biocombustíveis em grande escala é necessário avaliar os impactos econômicos, sociais e ambientais desta cadeia produtiva. A divisão de pesquisa em impactos se propõe desta forma a investigar os aspectos sócio-econômicos e políticos da produção do etanol, e as consequências de um modelo energético baseado em biocombustíveis. Entre os principais objetivos desta divisão se encontram (FAPESP, 2010):

- Estudar o risco do etanol como fonte de energia renovável
- Criar metodologia de certificação para a produção de etanol de maneira ambientalmente sustentável
- Pesquisar novas técnicas agronômicas para a produção de biocombustíveis, e seus impactos em eficiência, produtividade e manutenção da qualidade do solo.
- Melhorar a reciclagem de nutrientes e resíduos agrícolas
- Definir mudanças na acumulação de carbono, na diminuição das emissões de gases estufa e nos balanços de energia, devido ao uso de bioenergia
- Avaliar o impacto ambiental da cana-de-açúcar e da biosegurança
- Estudar o risco dos efeitos sociais e econômicos da produção de etanol (competição no uso da terra com outros alimentos, capacidade de expansão, entre outros)

1.2 Localização deste trabalho no contexto do Bioen

Em 2010 o autor realizou estágio em uma empresa de consultoria estratégica, e pode neste período participar de um projeto realizado junto a uma das maiores empresas do setor sucroalcooleiro do Brasil. O projeto propiciou ao aluno contato próximo tanto com o ambiente estratégico e comercial de açúcar e álcool, bem como com as atividades agrícolas e industriais envolvidas na elaboração destes produtos. Aspectos como os custos de produção

agrícola, custos com corte carregamento e transporte (CCT), integração logística, análise de produtos e mercados, foram analisados com profundidade, e despertaram no aluno o interesse em desenvolver este Trabalho de Formatura (TF) no setor da cana-de-açúcar.

O desenvolvimento do TF foi então iniciado com a identificação de problemas existentes e de novas oportunidades de melhoria para a cadeia sucroalcooleira, focando principalmente em questões como produtividade e sustentabilidade, e englobando tanto a produção agrícola como a distribuição e comercialização do etanol como combustível.

Os diversos problemas e oportunidades identificados na experiência prática no estágio foram então discutidos com o orientador deste trabalho e com pesquisadores do BIOEN, visando refinar e definir um tema específico para o Trabalho de Formatura. O Prof. Dr. Paulo Tromboni de Souza Nascimento, da FEA-USP foi contatado e recebeu o aluno para discutir possibilidades e temas que seriam relevantes tanto no contexto industrial como acadêmico, e que teriam potencial para a elaboração de um TF. O aluno participou também de uma reunião de trabalho sobre o BIOEN do grupo de pesquisa dos Prof. Dr. Paulo Tromboni de Souza Nascimento e Prof. Abraham Yu, na FEA-USP.

Dessas discussões, definiu-se que o TF sobre a redução da pegada de carbono do etanol, através de novas alternativas tecnológicas que possibilitariam a redução do consumo de diesel, poderia tanto aproveitar conhecimentos acumulados pelo aluno durante seu estágio, como ajudar a responder questões relevantes no contexto do BIOEN.

Este trabalho está relacionado com as divisões de pesquisa de motores e de impactos do programa de pesquisa em bioenergia da FAPESP. No Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica, este trabalho está inserido no contexto de pesquisa do Laboratório de Mobilidade, que pesquisa temas amplos sobre a indústria automotiva, abrangendo combustíveis alternativos e sustentáveis, temas-chave deste trabalho.

1.3 O problema

A ampla utilização de etanol como combustível veicular se estabeleceu como alternativa à gasolina, no Brasil na década de 70, se tornando uma fonte energética ambientalmente sustentável e menos agressiva que os derivados de petróleo. No entanto, o processo de produção do etanol ainda envolve a queima de combustíveis fósseis, principalmente do diesel, já que estes são utilizados em máquinas agrícolas e em caminhões

que fazem o plantio, colheita e transporte da cana-de-açúcar. O consumo de diesel intensifica, desta forma, a pegada de carbono da cadeia produtiva e impede que o álcool seja considerado uma alternativa completamente limpa.

Segundo Macedo et al (2004), no processo de produção do etanol são consumidos por volta de 190 MJ de energia fóssil por tonelada de cana-de-açúcar, o que representa cerca de 10% de toda energia renovável gerada. Além disso, calcula-se que a média do consumo de diesel numa operação produtiva de etanol no Brasil é de 107 litros por hectare, ou de 1,56 litros por tonelada de cana.

Além dos aspectos ambientais, o diesel tem se mostrado custoso também economicamente. Nigro & Szwarc (2010) mostram que se admitirmos que os preços do diesel se manterão entre 85% e 90% dos preços da gasolina C, e assumirmos a mesma taxa de compressão para motores a etanol e a diesel, a substituição do diesel pelo etanol se torna viável economicamente para o produtor de cana quando a razão de preços etanol/gasolina C nos postos se torna menor do que 80% .

Este patamar, apesar de ser dificilmente atingido em grande parte do Brasil, vem se tornando bastante frequente nas regiões produtoras de cana-de-açúcar, como no estado de São Paulo (ver Figura 3).

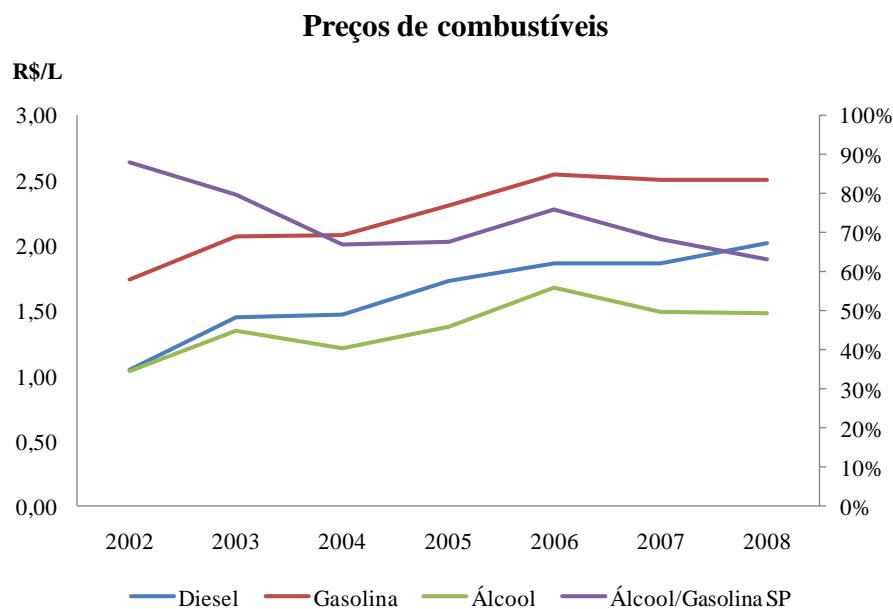


Figura 3 – Preços de combustíveis ao consumidor

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos de ANP, 2009

A substituição do diesel pelo etanol na produção de cana-de-açúcar pode ser, portanto, benéfica tanto ambientalmente como economicamente.

1.4 Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo **mapear e avaliar as alternativas tecnológicas que podem viabilizar a substituição do combustível utilizado por máquinas agrícolas e por caminhões envolvidos na cadeia produtiva do etanol, reduzindo o uso de diesel através de sua substituição pelo etanol.**

Este trabalho visa também **avaliar o impacto econômico e ambiental que tal substituição teria no ciclo produtivo do etanol, calculando as reduções no consumo de combustíveis fósseis, na pegada de carbono e nos custos de produção.**

1.5 Estrutura geral do trabalho

Este trabalho é estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 introduz o tema a ser tratado, descreve de forma geral o programa de pesquisa e o contexto no qual este trabalho se insere e apresenta, por fim, seus objetivos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica dos temas abordados neste estudo, enfocando os conceitos e os métodos aplicados ao longo do mesmo, bem como o contexto técnico e socioeconômico em que este estudo se enquadra. Elaborar-se-á, portanto, um resumo consolidado da literatura acadêmica conceitualmente relevante, visto o objetivo de avaliação de alternativas para a substituição do óleo diesel utilizado na produção do etanol.

O Capítulo 3 apresenta e descreve a metodologia de pesquisa, englobando as etapas que são necessárias para desenvolver este trabalho, bem como os procedimentos técnicos e as ferramentas de análise que são utilizadas em cada uma das etapas.

O Capítulo 4 apresenta a primeira seção de resultados, descrevendo o processo de levantamento de dados e obtenção das alternativas tecnológicas para a substituição do diesel como combustível na produção agrícola, bem como a avaliação destas alternativas segundo o método descrito no capítulo 3.

O Capítulo 5 apresenta a segunda seção de resultados, calculando os impactos econômicos e ambientais relacionados à implementação da solução tecnológica mais bem avaliada no capítulo 4.

Por fim, o Capítulo 6 resume as principais conclusões obtidas no estudo realizado e sugere caminhos para futuras pesquisas neste tema.

2. Revisão da literatura

O presente capítulo apresenta os principais tópicos relacionados ao estudo realizado, e está estruturado em itens da seguinte forma:

- Etanol no Brasil: Visão do Mercado – Contextualiza historicamente a evolução do mercado de etanol, bem como as inovações tecnológicas que surgiram neste período e suas consequências sócio-econômicas.
- Processo produtivo do etanol – Introduz os principais conceitos relacionados à produção da cana-de-açúcar e à obtenção do etanol.
- Aquecimento global e indicadores ambientais – Relata brevemente os problemas ambientais associados à queima de combustíveis, bem como as unidades utilizadas para medir impactos ecológicos.
- Motores de combustão interna – Descreve os parâmetros relevantes associados aos combustíveis em estudo, focando nos impactos em eficiência e consumo.
- Gestão de portfólio – Desenvolve o conceito de gestão de portfólio e cita as metodologias mais relevantes para a avaliação e seleção de alternativas.

2.1 Etanol no Brasil: visão do mercado

A visão do mercado de etanol no Brasil é contextualizada a seguir, discorrendo-se acerca de seu histórico desde o Programa Proálcool até os dias atuais, diante do crescimento da demanda no recente mercado de veículos bicompostíveis. A abordagem objetiva descrever os diferenciais competitivos nacionais no mercado de fontes combustíveis renováveis, detalhando-se a composição do setor sucroalcooleiro brasileiro e os benefícios característicos do álcool proveniente do cultivo de cana-de-açúcar.

2.1.1 *Introdução*

Os registros históricos apontam para o início do plantio de cana-de-açúcar a partir de 1532, relacionado às ações de solidificação da colonização portuguesa no Brasil. No entanto, somente com as invasões holandesas no século XVII, a cultura da cana expandiu-se pelo território nacional a ponto de consolidar o país como um grande exportador de açúcar. De fato, a produção de açúcar evoluiu consideravelmente nos séculos posteriores, porém a

produção de etanol, para fins energéticos, instaurou-se de forma consolidada apenas no início do século XX. Mais precisamente, em 1931 passa a ser obrigatório através do decreto de nº 19.717 a mistura de 5% de álcool anidro na gasolina. Decreto este que visava a estabilização do setor sucroalcooleiro no Brasil, que sofria devido à queda nos preços e na demanda do açúcar durante os anos da grande depressão. Durante a II Guerra Mundial, devido ao racionamento e à baixa produção local de gasolina, a adição de etanol é ainda mais intensificada, com resultados bastante satisfatórios (Joseph, 2006).

Todavia, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar era mais custoso do que a gasolina importada, e por mais de quatro décadas manteve patamares de produção extremamente baixos, dependendo de regulamentação política para sua viabilização. Somente a partir da década de 70, o etanol surge como alternativa energética econômica e de proporções nacionais.

A princípio, como será abordado mais detalhadamente adiante, estimulou-se a produção do etanol anidro, sem adição de água, que funciona bastante bem como aditivo à gasolina, melhorando o índice de octanagem (resistência a auto-inflamação) do combustível miscigenado. Com o passar dos anos, o foco da produção passou a abranger também o álcool hidratado (5% de água, em geral), que passou a ser utilizado como combustível puro em modelos veiculares projetados exclusivamente ao mercado nacional.

Em 1973 devido à guerra do Yom Kippur, os países árabes, maiores produtores de petróleo da época, aumentam o preço da *commodity* significativamente. Colocando em posição delicada, com déficits na balança de pagamentos, países como o Brasil, que dependiam amplamente da importação do petróleo (70% do consumo nacional) para o equilíbrio de sua matriz energética. Foi neste contexto que nasceu o Pró-Álcool (Programa Nacional do Álcool), programa que impulsionou o desenvolvimento da indústria sucroalcooleira no Brasil, e que criou a base tecnológica e empresarial fundamental para a consolidação do etanol como fonte renovável de altíssima importância na matriz energética brasileira.

Nas décadas seguintes o álcool passou por altos e baixos, sendo por horas altamente demandado, como é o caso dos anos seguintes à segunda crise do petróleo, e por oras praticamente ignorado, como é o caso dos anos 90 quando os preços da gasolina voltaram a se estabilizar em patamares baixíssimos. Foi somente a partir da metade da última década que o etanol finalmente se estabeleceu como combustível com participação significativa na frota automobilística brasileira, em razão, principalmente, da entrada dos veículos *flex* no mercado.

O poder de escolha e até de mistura dos combustíveis álcool e gasolina, por parte do consumidor, impulsionou a venda, principalmente no caso dos veículos mais populares. Atualmente, a produção ultrapassou a casa dos 25 bilhões de litros anuais e deverá crescer, segundo estimativas, 8% ao ano até 2015 (Andrade et al, 2009). Já há a previsão de 89 novas usinas de açúcar e etanol até 2013, com geração de milhões de empregos diretos e indiretos. A Figura 4 mostra como a produção de cana-de-açúcar e de etanol evoluíram de 1951 a 2008.

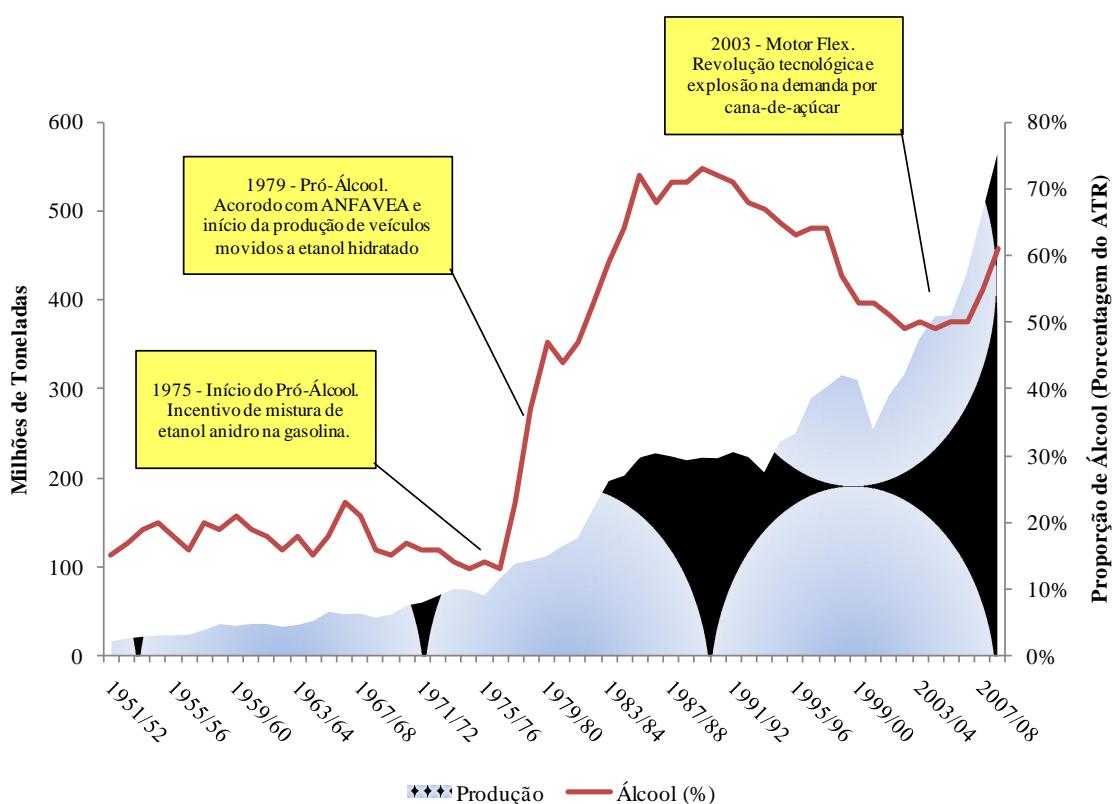


Figura 4 – Evolução histórica da produção de álcool

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos de Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009

Do ponto de vista econômico, as tendências relacionadas à produção e ao consumo do álcool de cana-de-açúcar continuarão a decorrer das variações nas cotações internacionais do valor do petróleo e do açúcar. No âmbito do consumo, variações do preço do petróleo influenciam na decisão pelo abastecimento por gasolina ou álcool em carros *flex*. No âmbito da produção, estas variações acarretam em mudanças de custo variável em maquinários e caminhões. No caso do açúcar, a análise de seu preço serve como aliada aos produtores como

informação valiosa na decisão de direcionamento da produção para açúcar ou etanol, visando a maior rentabilidade da cadeia sucroenergética.

Indubitavelmente, o crescimento da importância do etanol canavieiro como solução combustível foi enorme na última década. Contudo, até mesmo no Brasil, é extremamente evidente a preponderância do petróleo como fonte energética. A Figura 5, a seguir, dá valores a esta dependência nacional, mostrando como ainda está distante o alcance de um cenário de produção inteiramente sustentável do ponto de vista ecológico.

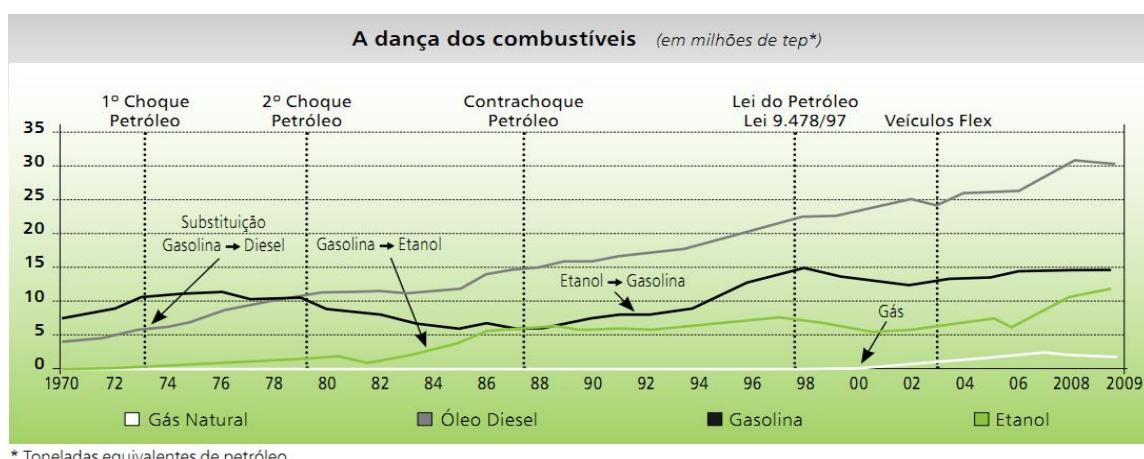


Figura 5 – Comparação entre a evolução da produção brasileira de combustíveis entre 1970 e 2009

Fonte: Jank, 2010

No contexto global, de fato, a situação é ainda mais agravante. Um dado bastante exemplificador refere-se à indústria automobilística mundial: os derivados de petróleo ainda representam 97% dos combustíveis consumidos por motores. Os produtores sucroalcooleiros e o próprio governo do Brasil deparam-se, portanto, com enormes desafios a serem enfrentados na busca pela internacionalização do consumo de etanol. Infere-se o fato de que a viabilização deste combustível alternativo é fortemente dependente do aproveitamento da infra-estrutura industrial já pré-estabelecida para transporte, estocagem e distribuição de derivados, principalmente gasolina e óleo diesel. Dessa forma, desde este ponto introdutório da abordagem deste trabalho, destaca-se a necessidade de promoção do etanol não como ruptura tecnológica, mas sim como meio de desenvolvimento buscando se adaptar às especificações do mercado de energia automotiva.

O restante desta seção se propõe a explorar os fatores críticos que possibilitaram a ampla utilização do álcool combustível, e a consequente consolidação do setor alcooleiro no Brasil.

2.1.2 *Do Pró-Álcool ao motor flex*

Nos anos entre 1969 e 1973, a indústria açucareira brasileira passava por um bom momento, estimulada pela alta do preço do açúcar no mercado. A partir de 1975, contudo, esta indústria sofreu um grande impacto pela queda repentina dos preços de seu principal produto de comercialização, entrando subitamente em uma inesperada nova fase de depressão, principalmente devido à farta disponibilidade de açúcar no mercado, pela boa safra em diversas regiões do planeta. Em paralelo, o setor energético brasileiro tentava buscar soluções para enfrentar a primeira grande crise do petróleo, prospectando fontes alternativas de energia que pudessem substituir os derivados do petróleo, ao mínimo nos mercados de maior consumo, como o automobilístico e industrial (Teixeira, 2005).

O Brasil já possuía alguma experiência no desenvolvimento de soluções para utilização do etanol como carburante em motores à combustão. Lima (2009) relata que a primeira exportação de um veículo a álcool ocorreu em 1902. Na década de 30, a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desenvolveu um protótipo, movido à cachaça, do modelo Ford T. Em 1953, os laboratórios do Instituto Tecnológico da Aeronáutica já buscavam a adaptação de um motor a quatro tempos para funcionar com álcool. De fato, estes estudos são amostras percussoras das iniciativas acadêmicas brasileiras que já definiam, naquela época, uma propensão natural do país para a adoção do etanol como solução energética de grande relevância.

Dessa, em 1975, foi instituído o Programa Nacional do Álcool, Proálcool ou PNA, baseando-se, inicialmente, apenas na produção de álcool anidro para mistura com os carros à gasolina (composição da gasolina tipo C com 20% de etanol ao invés da gasolina tipo A, mais pura, adotada anteriormente). Houve um forte apoio governamental para a viabilização do Programa, a partir de financiamentos, subsídios e incentivo ao preço baixo para o etanol. De 1975 a 1980, o Proálcool recebeu um investimento de US\$ 1,02 bilhão, $\frac{3}{4}$ dessa quantia investimento público e $\frac{1}{4}$ privado (Lanzotti, 2000 *apud* Lopes, 1996). Joseph (2006), Andrade et al (2009) descrevem os principais instrumentos básicos de facilitação do álcool no mercado brasileiro:

-
- Criação de linhas de crédito para o financiamento das partes agrícola e industrial desde o plantio de cana-de-açúcar até a produção do etanol nas usinas;
 - Garantia de compra do produto pela Petrobrás, com determinação de preços remunerados ao álcool, pela paridade com o preço do açúcar;
 - Auxílio logístico na manutenção de estoques para garantia do suprimento e preço.

Em 1978, o Proálcool já se mostrava como um ótimo auxílio para o setor açucareiro, visto que, neste ano, o Brasil teve sua alíquota de exportação de açúcar reduzida de em 40.000 toneladas. O setor, que no início assumia o etanol como um alívio temporário em meio à crise, começou a encará-lo como de fato um novo produto em sua cadeia de produção e iniciou uma série de investimentos privados, principalmente na criação de destilarias anexas às usinas de açúcar, para transformação do melaço em álcool.

Em 1979, o barril do petróleo atingiu o pico de valor em US\$ 30, agravando ainda mais a situação do setor, mesmo com as medidas do PNA. O Programa, então, evoluiu estimulando também a produção do álcool hidratado e a necessária fabricação de veículos movidos exclusivamente a este combustível. Um novo pacote de medidas foi elaborado, com enfoque agora em benefícios para os consumidores do combustível alternativo:

- Redução da alíquota do imposto sobre produtos industrializados (IPI) para aquisição de veículos à álcool (em até 5%);
- A isenção de IPI para táxis a álcool;
- Garantia de preço menor para o etanol hidratado (ao mínimo, 65% do valor das gasolinhas nas bombas de postos de combustível);
- Obrigatoriedade de todos os postos de combustível em vender o álcool hidratado;
- Aumento do teor de álcool anidro na gasolina (para 22%);

Iniciou-se, portanto, a fabricação de carros movidos exclusivamente a álcool hidratado. Houve grande resistência das montadoras multinacionais, a princípio, em produzir sistemas únicos ao mercado nacional, o que levou os gestores do Proálcool a criarem estratégias de disseminação da tecnologia (Nigro & Szwarc, 2010). Primeiramente, promoveu-se a conversão de motores à gasolina, buscando-se apoio de empresas de retífica, suportadas pela rede de Centros de Apoio Tecnológico (CATs). A rede de CATs consistia em

institutos de pesquisa e universidades públicas de diversos estados, credenciando empresas com competência técnica para ajudar no desenvolvimento das soluções de conversão. Algumas das principais mudanças realizadas compreendem o revestimento dos carburadores com zinco e dos tanques de combustíveis com estanho, para evitar problemas com corrosão. Vale citar que, no mesmo contexto, eram prospectadas também alternativas para substituição do óleo diesel usado em larga escala em máquinas agrícolas, transporte de carga e coletivo de passageiros.

Como segunda ação, não menos fundamental, o PNA assinou, em 1979, um acordo com a Anfavea (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), formalizando as expectativas de produção de veículos a etanol nas grandes montadoras. De fato, ainda existia uma gama de questionamentos técnicos, principalmente a respeito do funcionamento do motor em condições de partida a frio (introdução de uma pequena quantidade de gasolina injetada diretamente no carburador para facilitar a partida quando o motor era acionado após longo tempo sem uso ou em dias frios). As vantagens competitivas de mercado para o consumidor, no entanto, prevaleceram, e o Programa acabou, pelo menos no início da década de 80, se tornando um grande sucesso de vendas, agradando tanto a indústria automobilística, quanto o setor sucroenergético. Os estados que mais se beneficiaram com o estímulo fora São Paulo, Alagoas, Pernambuco e Rio de Janeiro, locais onde a proximidade dos campos de produção culminava em preços ainda mais atrativos para o etanol hidratado nas bombas e que, consequentemente, acabavam estimulando a compra por automóveis a álcool. Na década de 80, também, as características ambientais e sociais do etanol, antes não valorizadas pelo Programa, acabaram sendo enaltecidas visando, primeiramente, a propaganda pública para estímulo aos consumidores individuais.

A partir de 1985, o Proálcool inicia sua fase de declínio, começando pela diminuição dos investimentos governamentais no programa, frente a algumas dificuldades econômicas. Entre 1985 e 1990 foram investidos US\$ 511 milhões, 39% públicos e 61% privados (Lanzotti, 2000 *apud* Lopes, 1996). A safra 1986/87 começa a não satisfazer mais a demanda por álcool combustível, fazendo com que fosse necessária a importação de etanol, já que muitos produtores começaram a direcionar suas usinas para a exportação de açúcar, cujo preço no mercado internacional tinha aumentado. Os consumidores finais começaram a desconfiar da capacidade de abastecimento de álcool e, fundamentalmente, da manutenção de seu preço bem abaixo do valor pago pela gasolina, já que o preço do petróleo, após na crise beirar US\$ 40 por barril, diminuía progressivamente. Além disso, a utilização de etanol como

fonte energética alternativa ainda mantinha muitas críticas. Tais críticas baseavam-se no fato de que as áreas de cultivo de cana aumentavam muito, enquanto as de cultivo de alimentos de mantinham inalteradas (Andrade et al, 2009). A sazonalidade da safra afetava os mercados e a indústria demasiadamente, gerando *boom* empregatício em metade do ano, ociosidade e problemas no campo no tempo restante. Sobravam críticas também sobre o rendimento do motor a álcool hidratado, que freqüentemente gerava problemas de partida e sobre a necessidade, para o consumidor, de se migrar totalmente de mercado (de gasolina para álcool) ao se adquirir um novo veículo. A abertura do mercado brasileiro para os veículos importados, à gasolina, foi ainda outro agravante na indústria automobilística. De fato, com o tempo, a perda de competitividade do etanol hidratado e a falta do produto na bomba deixavam o consumidor sem alternativa, afetando a reputação do Proálcool como programa governamental. A frota de veículos a etanol hidratado praticamente deixou de existir no final da década de 80, mesmo com a crescente produção de cana-de-açúcar (Farina et al, 2010). A produção de carros a álcool ganha alguma sobrevida durante a década de 90, quando o abastecimento de etanol se normaliza com preço na bomba em torno de 50% do preço da gasolina e intensifica-se o apelo internacional pela necessidade de combustíveis renováveis para evitar catástrofes ambientais (assinatura do protocolo de Kyoto). No Brasil, as preocupações ambientais acarretaram na criação de bases técnicas para medição de componentes de poluentes veiculares, pela (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Foi lançado o Proconve (Programa de Controle do Ar de Veículos Automotores) e alguns regulamentos complementares, definido limites máximos de emissão de monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos e aldeídos.

É apenas com o lançamento dos carros (*Flex Fuel Vehicle – FFV*) em 2003, que o mercado de etanol retorna a prosperar. A possibilidade de abastecer com álcool, gasolina C ou qualquer proporção dos dois tipos de combustível recoloca o etanol hidratado como concorrente da gasolina no mercado, dada uma faixa de preços definida pela eficiência energética dos dois combustíveis (em geral, o etanol possui 70% do rendimento energético da gasolina). A Figura 6, apresentada adiante, comprova graficamente a inflexão característica do ano 2003, que denota o reaquecimento da produção de álcool hidratado impulsionada pela nova demanda.

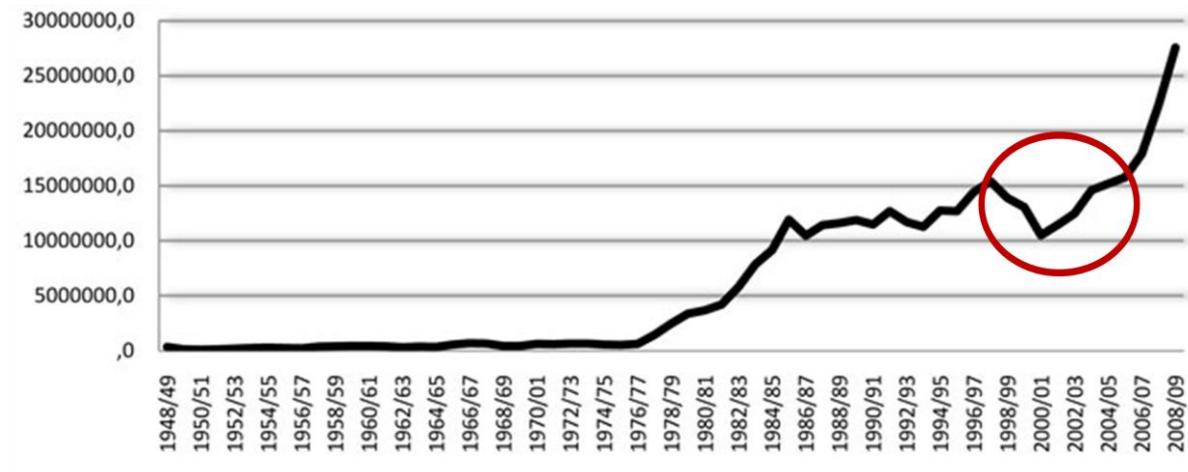


Figura 6 – Produção brasileira de etanol em milhões de litros

Fonte: Elaborado por Mourão, 2010 com dados da UNICA

A seguir, a Figura 7 reforça o protagonismo do ano de 2003, evidenciando a gradativa alteração do enfoque dos produtores de etanol, do álcool anidro para o álcool hidratado.

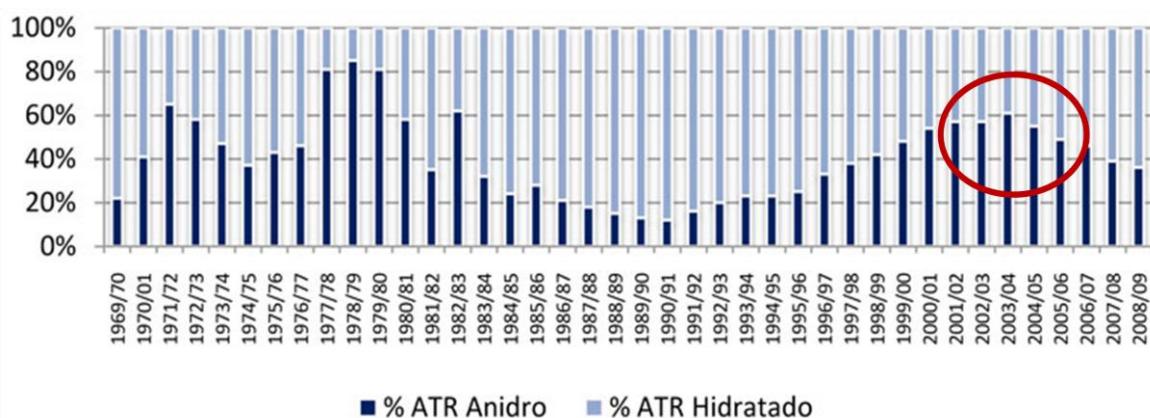


Figura 7 – Variação da porcentagem de ATR por produto final: etanol anidro e hidratado

Fonte: Elaborado por Mourão, 2010 com dados da UNICA

Desde a primeira geração de automóveis bicombustíveis, o uso de etanol como forma de economia volta a ser considerado pelos consumidores, desta vez sem os incômodos da falta de opção de abastecimento. Estima-se uma frota atual de cerca de 8 milhões de automóveis *flex*, o que corresponde aproximadamente a 35% do total da frota nacional (ANFAVEA, 2010). A Figura 8 evidencia o desaparecimento dos automóveis exclusivos a etanol e destaca

o crescimento bastante acelerado da comercialização de carros bicompostíveis na última década.

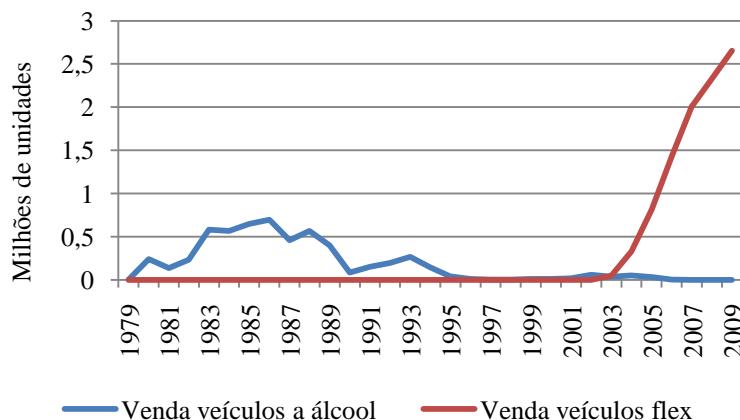


Figura 8 – Evolução histórica da comercialização de carros leves a álcool e bicombustíveis

Fonte: Adaptado de Losekann & Vilela, 2010

A tecnologia *flex* incita, no mercado, uma inédita relação direta entre os preços das diferentes opções de combustível frente ao consumidor. É, de fato, o preço da gasolina que define o preço do álcool hidratado, estabelecendo um preço máximo para este combustível, já que os consumidores podem migrar a qualquer momento para a gasolina, caso o preço do combustível ultrapasse em cerca de 70% o preço da gasolina nos postos revendedores. Por outro lado, o preço do álcool também limita a elevação do preço da gasolina, já que os consumidores também podem mudar de opção de abastecimento, caso o preço do biocombustível seja inferior a 70% do preço da gasolina. Atualmente, pelos preços vigentes no mercado, o etanol segue como melhor alternativa, principalmente nos estados produtores de cana-de-açúcar, perdendo competitividade para a gasolina apenas em alguns estados mais afastados (Lima, 2009).

Tabela 1 – Preços e consumo de etanol e gasolina: principais estados brasileiros

	Preço gasolina (R\$/l)	Preço etanol (R\$/l)	Preço relativo	Consumo mensal (milhões de litros)
AM	2,56	1,81	0,71	6,63
RR	2,69	2,16	0,80	0,24
BA	2,62	1,70	0,65	45,10
PE	2,57	1,65	0,64	30,46
MG	2,40	1,62	0,68	100,37
RJ	2,54	1,68	0,66	72,73
SP	2,38	1,34	0,56	717,50
RS	2,54	1,78	0,70	33,59

Fonte: Adaptado de Losekann & Vilela, 2010

Ao nível do produtor, o etanol também passou a apresentar preços consistentemente mais atrativos do que a gasolina, além de mostrar menor volatilidade. De fato, sem tributos, a adição de etanol anidro à gasolina permitiu reduzir, na maior parte do tempo, o preço médio da gasolina C colocada no mercado (Bajay et al, 2010). Em relação aos custos de produção, houve uma mudança regulamentar significativa que contribuiu para o fortalecimento das condições de competitividade do etanol. Durante muito tempo, no Brasil, os custos da agroindústria sucroalcooleira eram auditados pelo governo federal, que definia, assim como para os demais setores energéticos, todos os preços ao longo da cadeia de produção e comercialização da indústria canavieira. A partir da safra de 1997, entretanto, instaurou-se um processo de liberação do setor sucroenergético, concluído em 2002, possibilitando aos agentes econômicos a escolha livre de preços, com base em suas respectivas estratégias de mercado. Para o etanol esta liberdade é crucial, já que o principal componente de seu custo é uma matéria-prima (cana-de-açúcar própria, de terrenos arrendados ou até de produtores independentes) de difícil estimativa de custo, com diferentes produtividades para tecnologias, sazonalidades e condições de plantio distintas. Certamente, a liberdade competitiva da indústria atual auxilia de forma fundamental a equilibrar os preços e a manter a oferta de etanol necessária para o mercado dos veículos bicompostíveis.

2.1.3 Diferenciais competitivos do Brasil

Os diferenciais competitivos do Brasil, frente às iniciativas de outras nações na tentativa de instituição de indústrias de produção de combustíveis renováveis, partem das

vantagens naturais propiciadas pela cultura da cana-de-açúcar em comparação às demais culturas agrícolas cogitadas para produção do etanol.

A cana possui elevada eficiência fotossintética (2,5%). Em solo (profundos e bem estruturados) e clima (com uma estação quente e úmida e outra fria e seca) favoráveis como o brasileiro, principalmente no estado de São Paulo, esta cultura agrícola possui uma produtividade bastante significativa, resultando no fornecimento de aproximadamente 7.000 litros de etanol para cada hectare (ha) cultivado, em média. O tipo de cana-de-açúcar, o estágio de maturação, o processo de adução, a altura de desporte, o estado de sanidade da cultura e o tempo de corte ao processamento são as principais variáveis que afetam este índice alto de produtividade e que, continuadamente, vem sendo aperfeiçoados pela academia e por iniciativas de melhorias de processo dos próprios agentes da agroindústria sucroalcooleira. Para o milho, no entanto, principal fonte de obtenção de etanol nos EUA, por exemplo, a produtividade alcança, nos casos de melhor desempenho tecnológico, 3.000 litros por hectare. Estes dados se refletem também ambientalmente, estima-se que, para cada unidade fóssil consumida na produção do álcool da cana, são produzidas 8 a 10 unidades de energia renovável contra apenas uma unidade do etanol de milho. Em suma, para o Brasil, atualmente o segundo maior produtor de etanol no mundo, perdendo em quantidade justamente para os EUA, observa-se a tendência de breve consolidação como maior produtor de energia renovável do planeta (Moreira et al, 2008).

Tabela 2 – Diferenciais competitivos entre as alternativas de combustível renovável

Matéria-prima				
País	Brasil	EUA	UE	UE
Redução das emissões de GEE	90%	35%	34%	45%
Balanço energético	9,3	1,4	2,0	2,0
Produtividade (litros/hectare)	7.000	3.800	2.500	5.500

Fonte: Adaptado de Moreira et al, 2008

Este destaque competitivo brasileiro é ainda mais exaltado pelas grandes extensões territoriais brasileiras que, diferente das americanas, ainda estão bastante longe da saturação

para cultivo de culturas com intuito não-alimentício. O país é um dos poucos países do mundo com real capacidade de ampliar sua produção agrícola. No caso da cana, esta expansão vem ocorrendo de maneira organizada, nas áreas de pastagens que deixaram de ser extensivas passando a ser mais eficientes (Moreira et al, 2008), não invadindo o cerrado, tampouco a região amazônica, como visto na Figura 9.

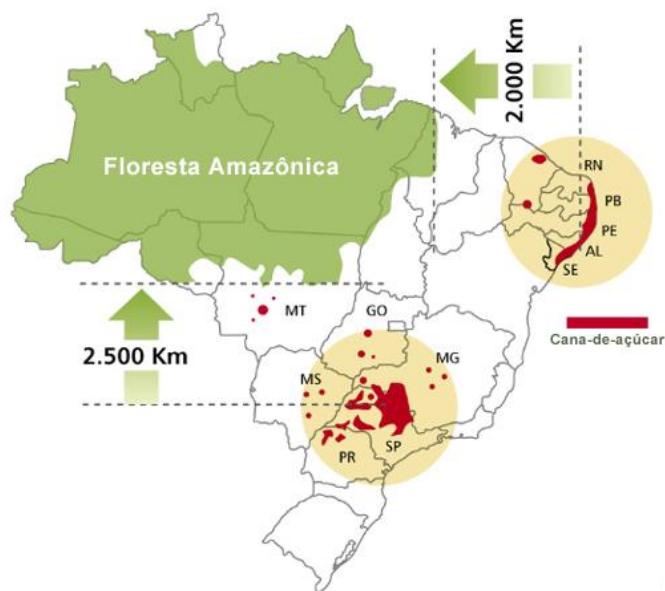


Figura 9 – Localização da produção de cana-de-açúcar no Brasil

Fonte: Moreira et al, 2008

Em termos tecnológicos, as vantagens competitivas do Brasil se dão pelo relativo grande tempo de domínio da tecnologia de fabricação do etanol desde o PNA. O setor sucroenergético aprendeu, com a passar dos anos, a lidar com dificuldades logísticas na produção deste combustível, principalmente ligadas à condição perecível da cana-de-açúcar (a colheita precisa ser processada em um intervalo de, no máximo, 24 horas entre o corte e sua utilização). A contínua busca por otimização de processos pelo setor obteve grandes resultados no aumento da produtividade através do desenvolvimento de fertilizantes, da utilização do bagaço de cana e do material celulósico da madeira como fontes energéticas adicionais, e, mais recentemente, do uso criativo de soluções relacionadas à biotecnologia. Atualmente, mais de 500 variedades de cana, muitas obtidas por melhoramento genético, são cultivadas e o período de produção aumentou de 150 dias por ano em 1980, para 220 dias por ano em 2008. Certamente, pode-se sacramentar o Brasil como nação desenvolvedora de um

agronegócio eficiente e moderno, altamente competitivo no cenário global, tendo na indústria de etanol um referencial exportador de tecnologia e produtos para diversas nações, instigando inclusive a evolução de outras indústrias correlacionadas como, por exemplo, o setor químico (Penteado & Cunha, 2008). A Figura 10 quantifica a grande vantagem nacional em termos de custo em relação a possíveis competidores internacionais na comercialização de soluções energéticas renováveis.

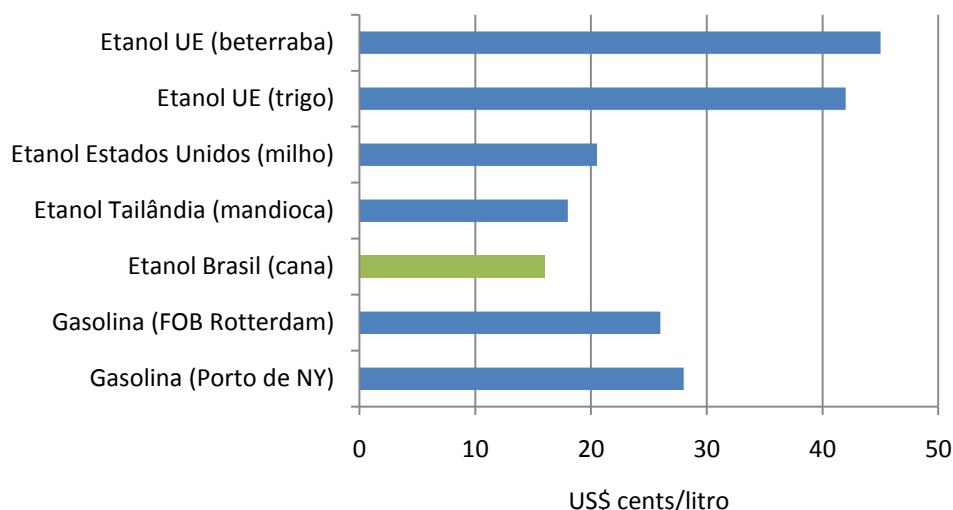


Figura 10 – Comparação entre custos de produção do etanol (2005)

Fonte: Adaptado de Moreira et al, 2008

Outra grande vantagem do etanol brasileiro em relação a seus competidores no mercado de biocombustíveis se dá no âmbito da visão internacional de busca por mitigação das mudanças climáticas. Ao longo do ciclo de vida, o etanol da cana-de-açúcar emite, em média, 85% menos gases de efeito estufa (GEE) do que a gasolina, podendo essa marca alcançar os 100% se contabilizados os demais co-produtos da indústria sucroalcooleira (Pires & Schechtman, 2010). Em comparação com as demais soluções alternativas, o etanol prevalece, dentre as produzidas com intuito comercial, como a fonte mais limpa de energia.

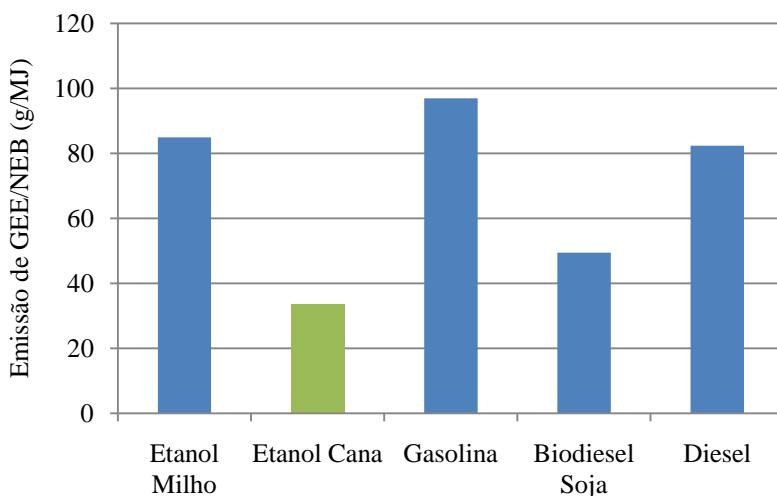


Figura 11 – Comparaçāo de emissōes de GEE para diferentes combustíveis

Fonte: Adaptado de Andreoli & Souza, 2006

2.1.4 O setor sucroalcooleiro no Brasil

O setor sucroalcooleiro, de cultivo e processamento da cana-de-açúcar, apresenta um forte impacto socioeconômico em todo o Brasil. Este sistema agroindustrial é expressivo tanto no que diz respeito à geração de divisas, quanto na geração de empregos e, portanto, no desenvolvimento de regiões do país ainda relativamente distantes, no que diz respeito à qualidade de vida, dos grandes centros financeiros. Como já citado, a partir de 1999, a desregulamentação ante o controle estatal provocou modificações drásticas na dinâmica do setor, modelando-o rumo à situação observada atualmente. A quantidade pulverizada de usineiros competidores, bastante dispersos ao longo do território nacional, cada vez mais é reduzida por um processo gradativo de fusões e aquisições (60 operações desde 2004) liderado pelas empresas do centro/sul do país, diminuindo a competitividade da indústria nordestina independente e obrigando o aperfeiçoamento operacional e estratégico (Paiva, 2005). De fato, o recente fenômeno de concentração do setor começa a sinalizar ações de especialização da produção por parte de alguns atores, a busca incessante por diferenciação de produto, a formação de grupos de comercialização (*pools*) de açúcar e álcool e melhorias nos departamentos agrícola, industrial e, ainda mais evidente, de *marketing*.

Contudo, essa concentração citada ainda é relativamente incipiente. Não há nenhum produtor com mais de 10% da produção nacional em termos de cana-de-açúcar moída. O sistema de produção ainda envolve mais de 300 usinas, com capacidade muito diferentes (de 0,6 a 7,0 Mt cana processada por ano), as quais trabalham, em média, com 79% da cana

proveniente de terras próprias e arrendadas ou de acionistas e companhias agrícolas, sendo os 21% restantes fornecidos por em torno de 60 mil produtores independentes com menos de dois módulos agrícolas (Seabra 2008 *apud* Rodrigues, 2007). No entanto, como já acentuado, o estado de São Paulo prevalece, englobando 75% destes pequenos produtores e 13 das 15 maiores usinas do país, duas delas com marca superior a produção de seis milhões de toneladas de cana (TC) anuais.

Para estes maiores produtores, enfatiza-se a benéfica concorrência da oferta dos mercados de açúcar e etanol, que provém uma alternativa frente a choques de demandas/ofertas dos produtos, atenuando o risco do negócio, uma vez que estes são independentes do ponto de vista dos consumidores. Isto é possível devido à existência de destilarias anexas que têm a capacidade de direcionar o caldo oriundo da moagem tanto para a fabricação de açúcar quanto etanol, dependendo da rentabilidade relativa de cada um destes. A decisão depende também do período de chuvas, que reduz o rendimento em sacarose, favorecendo o etanol, com a situação inversa ocorrendo em períodos de seca. Outro fato influenciador é o custo de carregamento de estoques de etanol, bastante elevado em virtude das características de estocagem derivadas do setor petrolífero. Deve-se também citar a possibilidade de priorização a oferta de etanol em termos de comparação entre o álcool anidro e o hidratado, tendo o primeiro maiores custos por ser derivado, na cadeia de produção, do primeiro.

Partindo-se para uma visão mais macro do setor sucroalcooleiro, este pode ser incorporado em uma cadeia sucroenergética brasileira, segmentada em grupos antes, durante e após as fazendas de cultivo da cana, além de grupos de facilitadores e prestadores de serviço (Neves et al, 2010):

- Antes das fazendas: Grupo composto por produtores de fertilizantes, defensivos agrícolas, corretivos, autopeças, provedores de serviços de manutenção, fornecedores de tratores, colhedoras, caminhões, carrocerias, reboques, implementos, fornecedores de óleo diesel e lubrificantes e de equipamentos de proteção.
- Nas fazendas: Em primeiro plano, destacam-se os produtores de cana de açúcar, com produção própria ou de fornecedores. A seguir, mapeia-se a indústria de equipamentos (gerador de vapor, destilaria, gerador de energia, etc) e as indústrias participação indireta como de construção civil, automação e instrumentação, instalações elétricas, serviços de montagem, produtos

químicos, óleos combustíveis, fornecimentos de sacarias e *big bags*, materiais de laboratório e equipamentos de proteção.

- Após as fazendas: Grupo composto, em primeiro plano, pelas usinas para a produção de etanol hidratado, anidro e não-energético; açúcar para indústria, atacado e varejo; fornecimento de bioeletricidade; produção de leveduras e aditivos (ração animal), comercialização de créditos de carbono e venda, em escala ainda não-comercial de bioplásticos. Em nível secundário, destacam-se os distribuidores de etanol, a indústria de bebidas e cosméticos, os atacadistas de açúcar e a indústria de ração animal. Há ainda um terceiro plano, composto pelos postos de abastecimento, o varejo de açúcar, a indústria de alimentos, os consumidores livre e especial de bioeletricidade e por fim, os consumidores individuais de etanol e de açúcar.
- Agentes facilitadores: participam, atualmente, o BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento), os portos de exportação, a massa salarial, os institutos de pesquisa e desenvolvimento, os planos de saúde e o sistema terceirizado de corte, carregamento transporte (CCT) do Centro-Sul.
- Prestadores de Serviço: grupo bastante diversificado, composto pelos diversos atores relacionados ao frete rodoviário de transporte, aos pedágios portuários para exportação, aos eventos e revistas especializadas, à alimentação de funcionários, aos membros governamentais coletores de impostos, entre outros.

Em dados macro, o setor sucroalcooleiro, em 2008, gerou riqueza de US\$ 28,15 bilhões, equivalente a quase 2% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Quando considerada a soma total das vendas dos atores dos diversos elos da cadeia sucroenergética, descritos anteriormente, alcança-se o valor de US\$ 6,8 bilhões. Para tanto, o setor mantém 1,28 milhão de postos de trabalho formais, com massa salarial de US\$ 738 milhões (Neves et al, 2010). A tendência apontada pela academia especializada é de crescimento do PIB, ainda representado em maior parte pelo etanol e açúcar, com receitas atuais de US\$ 12,5 bilhões e US\$ 9,8 bilhões, respectivamente. Novos produtos, no entanto, tornam-se cada vez mais relevantes: a bioeletricidade gera atualmente receita anual de US\$ 400 milhões, esperando-se crescimento progressivo exponencial. As leveduras e os bioplásticos começam a chamar atenção de um maior número de mercados possivelmente correlacionados. Novas tecnologias também podem se lançar como fontes de renda para o setor: a produção de biodiesel a partir de cana-de-açúcar, o biobutanol e o etanol celulósico são fronteiras que parecem se

transformar em promessas concretas nos próximos anos. Além disso, a venda de créditos de carbono sacramenta-se como importante ativo no mercado internacional e pode estreitar ainda mais as relações entre o setor sucroalcooleiro e as instituições de especulação financeira.

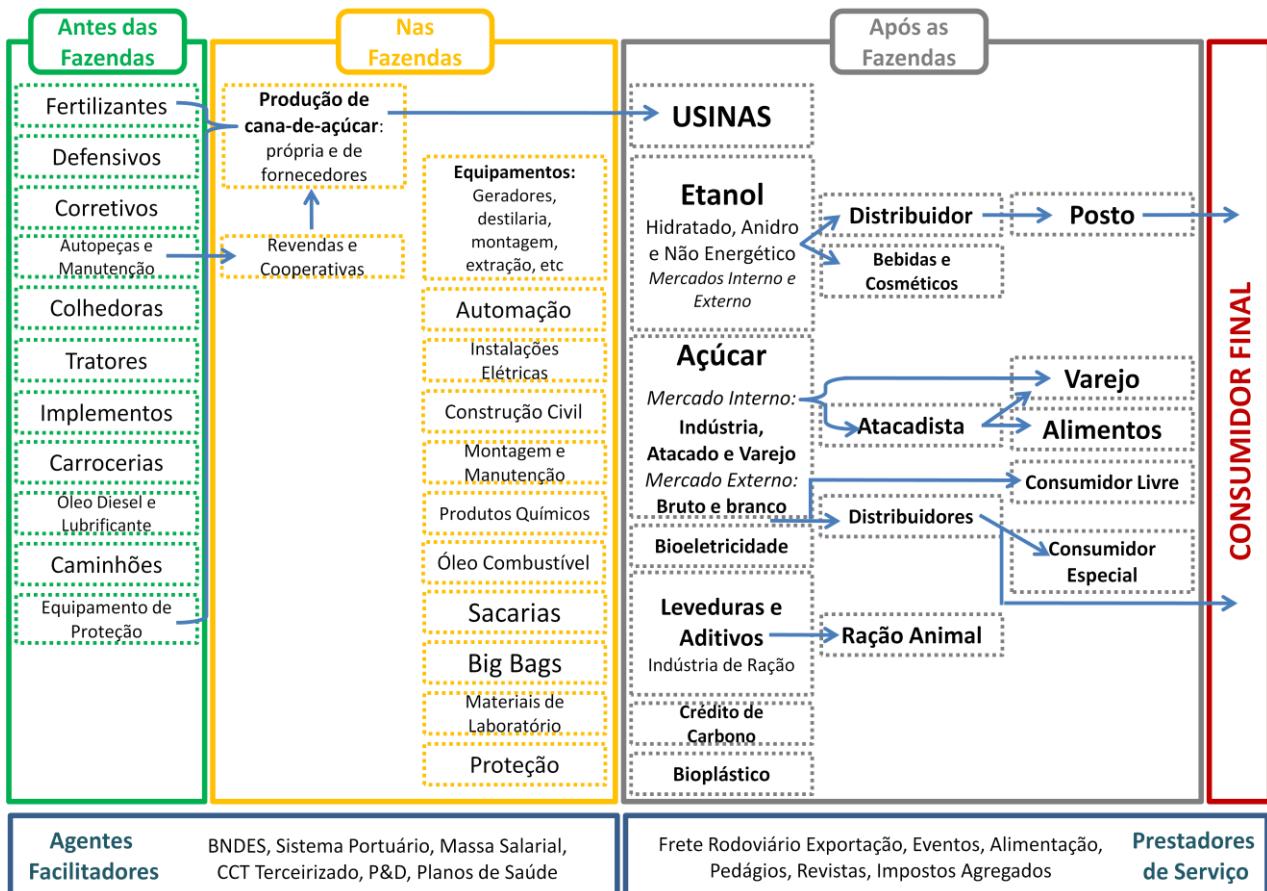


Figura 12 – Esquematização – Cadeia Sucroenergética

Fonte: Adaptado de Neves, Trombin & Consoli, 2009

2.2 Processo produtivo do etanol

Nesta seção, pretende-se descrever, com bom nível de detalhe, as etapas e processos que compreendem a produção de açúcar, álcool, melaço e demais subprodutos na indústria sucroalcooleira. Procura-se, de fato, discretizar a produção de maneira a abranger as peculiaridades das diferentes unidades produtivas ao longo do território nacional, relatando-se as distintas possibilidades de ação e de utilização de maquinário para as atividades correlacionadas.

É fundamental, antes de tudo, subdividir o processo de produção em três principais etapas, que evidenciem a interação entre campo e indústria, característica do setor. Paiva (2005) propõe uma divisão em três macro-étapas: a produção agrícola, uma fase intermediária de corte, carregamento e transporte de cana (CCT) e, por fim, a produção industrial.

2.2.1 *Produção agrícola*

A cana-de-açúcar é uma planta da família das gramíneas, cultivada com o intuito de processamento industrial, principalmente de seus colmos. Caule e folhas do plantio também são aproveitados, no entanto, para alimentação animal como forragem. Os principais produtos do processamento, como já citado, são o açúcar e o etanol. Há também certo enfoque, no Brasil, na produção de aguardente. Como principais subprodutos, geram-se o bagaço, o melaço, a torta de filtro e a vinhaça. Alguns destes são aproveitados no próprio processo industrial, como será descrito mais adiante, outros são rejeitados ou comercializados em mercados de menor porte.

A produção agrícola inicia-se com o plantio de cana, realizado entre Janeiro e Março, na região Centro-Sul, e entre Junho e Agosto na região Norte-Nordeste. As mudas tornam-se, em média, ideais para primeiro corte após 18 meses (obtenção da cana-planta, de melhor produtividade). A cada 12 meses são realizados novos cortes (cana-soca) até o limite geral de cinco anos, tempo em que é iniciada a reforma do canavial. Esta consiste no plantio de novas mudas, já que há declínio progressivo do rendimento agrícola da cana em função do número de cortes praticado.

Detalhando-se todo o processo, a etapa de produção agrícola, como um todo, compreende três diferentes atividades da cultura canavieira (Paiva, 2005):

- Preparo do solo, sulcação e adubação, plantio e cultivo da cana-planta;
- Tratos culturais da socaria e cana-planta;
- Irrigação da lavoura.

O preparo do solo tem como objetivo a criação de condições geológicas favoráveis para a germinação e crescimento da raiz e da parte aérea da cana-de-açúcar, a partir de operações agrícolas que afetam a estrutura física do solo, sua acidez e capacidade de absorção de minerais (Ferreira 2006 *apud* Freitas, 1987). Obtém-se um estado considerado ideal, quanto o solo está nivelado, apropriado para aprofundamento da ação de fertilizantes e

permitindo penetração, movimentação e retenção de água. Em geral, esta ação preliminar era realizada utilizando-se tração animal. Contudo, atualmente, são utilizadas máquinas de grande porte para aplicação de calcário transportado por caminhões (visando a redução de pH), destruição de soqueiras para erradicar cana-soca junto às raízes de novas mudas (uso de aradoras e grades acionadas por tratores) e, finalmente, construção de terraços que acompanhem as curvas de nível do terreno (uso de tratores de esteiras dotados de lâminas e terraceadores). De fato, a utilização massificada de equipamentos pesados na lavoura intensifica a compactação do solo, que deve ser evitada a partir da operação de subsolagem, com utilização de subsoladores também tracionados por tratores de alta potência.

Parte-se para as fases de sulcação e adubação, plantio e, enfim, o cultivo propriamente dito. A abertura de sulcos e a adição de adubo são realizadas pela ação de um implemento, aplicado por carretas acopladas a tratores. De forma crescente, adubos orgânicos passam a participar desse processo, muitas vezes aproveitando-se subprodutos como a torta de filtro, a vinhaça e outras impurezas minerais, transportados por caminhões ou por sistemas de canhão hidráulico entre a indústria e a lavoura (Ferreira, 2006 *apud* Rosseto, 1987).

A atividade de tratos culturais visa garantir o desenvolvimento normal da cultura até a colheita, já que a cana-de-açúcar necessita de alguns cuidados especiais após a germinação, mesmo tendo características relativamente rústicas. No caso da cana-planta, busca-se manter o plantio longe do alcance de plantas-daninhas, insetos e fungos, a partir da ação manual de capina com enxada em áreas de difícil topografia; de capinas mecânicas realizadas por discos rotativos em tratores; ou, na grande maioria dos casos, de capinas químicas baseadas na pulverização de herbicidas, inseticidas e fungicidas, evitando-se à adoção de agrotóxicos. No caso da cana-soca, adicionam-se as ações de enleiramento por meio de tratores, destinadas à limpeza de palha e restos culturais que possivelmente podem inibir a rebrota de mudas.

A terceira atividade agrícola, com crescente importância no setor sucroalcooleiro, especialmente no centro Norte-Nordeste, diz respeito às ações de irrigação da lavoura. Atualmente, busca-se aumentar o rendimento agrícola por meio de técnicas que aperfeiçoem a aplicação de água nas mudas com a intenção de se compensar períodos de seca.

De fato, percebe-se, no ciclo agrícola, a massiva necessidade de utilização de máquinas pesadas (tratores, em geral) que, ao consumirem combustíveis fósseis (óleo diesel), reduzem o bom desempenho ambiental do etanol como combustível limpo, tendo em vista os objetivos de minimização de emissões de GEE na cadeia de produção como um todo. É, portanto, uma fase na qual este projeto deverá agir efusivamente, destacando soluções que

possam otimizar a performance ambiental de equipamentos de aração do solo, de sulcação mecânica, de adubação, de capina, de enleiramento e auxiliares.

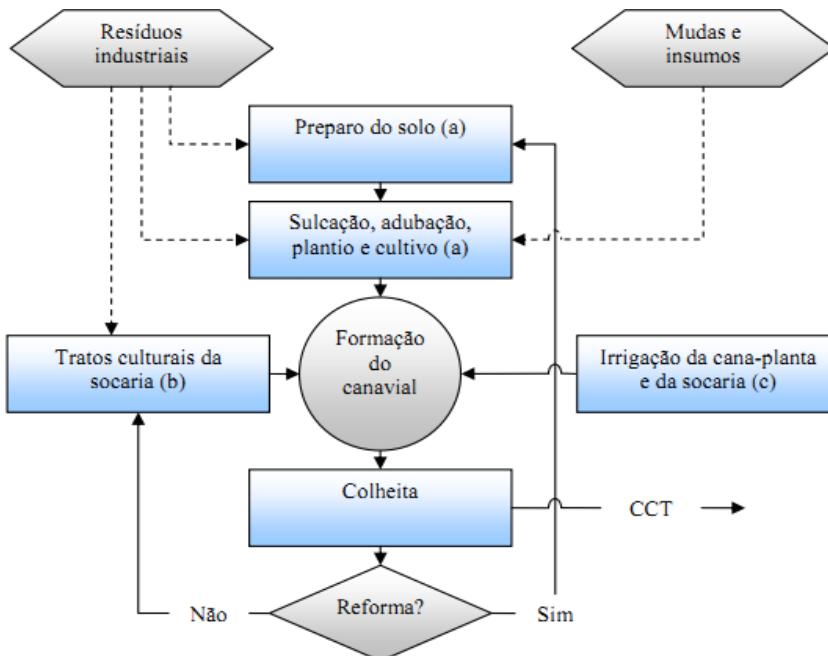


Figura 13 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola

Fonte: Paiva, 2005; adaptado de Fernandes, 2003

2.2.2 Etapa de corte, carregamento e transporte (CCT)

As etapas de corte, carregamento e transporte correspondem à interface entre o setor agrícola e industrial, compreendendo a colheita da cana pronta para entrada na usina sucroalcooleira. Numa visão mais abrangente, esta fase consiste numa eventual operação de queima da cana-de-açúcar, nas ações de corte de cana queimada ou colheita mecanizada da cana crua, na operação de carregamento dos caminhões e treminhões e, finalmente, na ação efetiva de transporte para a unidade de processamento (Paiva, 2005).

O corte da cana-de-açúcar é efetuado manualmente ou de forma mecanizada. No Brasil, mesmo com a evidente evolução tecnológica da produção, ainda observa-se o predomínio do trabalho de corte com facões. Os operários eliminam o material vegetal sem interesse para processamento, retirando ponteiros e raízes. Os colmos cortados são depositados sobre o terreno para carregamento por meio de máquinas carregadeiras, acopladas a tratores, ou com autopropulsão. O corte mecanizado, estimulado mais recentemente pela conscientização social dos produtores, é efetuado por colhedeiras ou máquinas combinadas

que colocam a cana diretamente nos caminhões, dispensando a utilização de carregadeiras e, evidentemente, de trabalhadores braçais.

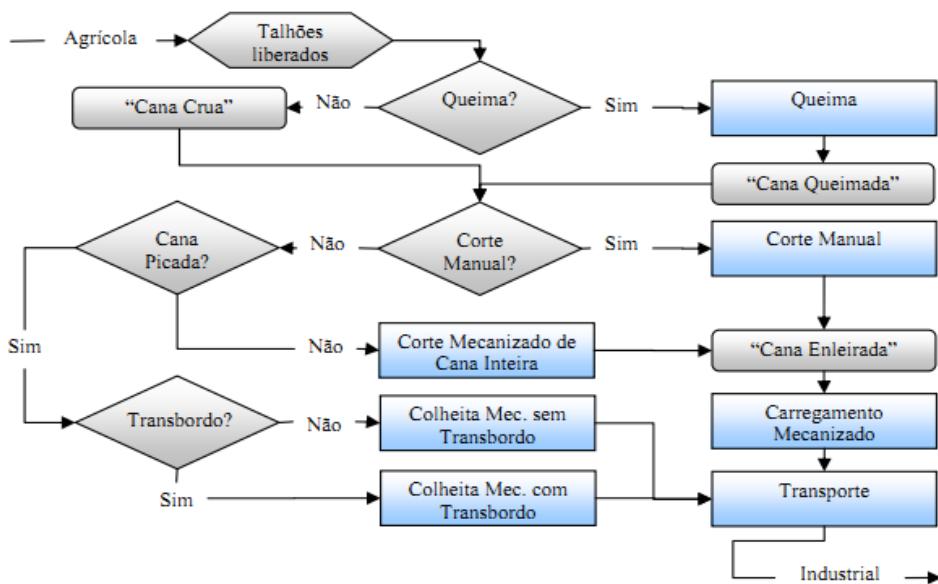


Figura 14 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa de CCT

Fonte: Paiva, 2005; adaptado de Fernandes, 2003

Toda a matéria-prima coletada é transportada, pelo menos no mercado brasileiro, pela malha rodoviária nacional, com poucas iniciativas ferroviárias e raríssimas ações de frete por hidrovias. Desse modo, evidencia-se como a proposta deste trabalho é interessante para minimização das emissões também nesta fase da produção, principalmente na etapa de transporte, extremamente dependente do óleo diesel.



Figura 15 – Exemplo ilustrativo de caminhão utilizado na etapa de CCT

2.2.3 *Produção industrial*

Um ótimo relato acadêmico pode ser destacado nos estudos de Paiva (2005), cujo enfoque se dá na otimização das metodologias de gestão de usinas açucareiras. Como já ressaltado, o processo que a seguir será descrito pode sofrer variações conforme os diferentes objetivos comerciais das usinas brasileiras. Contudo, pretende-se denotar as etapas da fase industrial da forma mais generalizada possível.

Inicialmente, a cana-de-açúcar, colhida e transportada, queimada ou crua, adentra a fase industrial de produção na usina sucroalcooleira em um processo de pesagem e análise do teor de sacarose, com o intuito de controle dos rendimentos industriais. Direciona-se, pois, os colmos cortados para a mesa alimentadora ou estoque, estes sendo manejados por meio de garfos hidráulicos. Na mesa, a cana sofre, primeiramente, a ação de um jato d'água para a retirada de impurezas minerais e de alguns vestígios de resíduos vegetais desinteressantes para a obtenção do etanol ou do açúcar. Após esta lavagem, a água contaminada é tratada, gerando-se um lodo com substâncias resultantes do peneiramento e outros contaminantes decantados. Já devidamente limpa, a cana é transportada, por um conjunto de esteiras, aos picadores e ao desfibrador, que a preparam para que haja extração de sacarose por meio de suas células abertas. Em seguida, a cana segue para uma esteira de borracha, material que permite a utilização de um sistema de eletroímã para a retirada de partículas metálicas que possam acompanhar a matéria-prima. Enfim, adentra em um sistema de extração de caldo denominado moenda, composto por ternos dotados de rolos, que desfibraram ainda mais a cana a ponto de separar o caldo do bagaço. O caldo segue para a fabricação de açúcar ou para a destilaria. O bagaço, por sua vez, é aproveitado para queima em caldeiras e geração de vapor, ou estocado para evitar o uso de combustíveis externos em próximas safras.

A primeira operação na destilaria de álcool é o preparo do mosto, composto de uma mistura de caldo, xarope, mel final (co-produto da fabricação de açúcar bruto e de consumo direto) e água, buscando a manutenção de boas condições para a adição de leveduras para fermentação. Forma-se, então, um composto líquido denominado vinho levurado, contendo 6% a 10% de álcool. Depois de uma etapa de centrifugação, separam-se as leveduras, que podem ser utilizadas para a obtenção de proteína animal. O vinho obtido é enviado para o processo de destilação, fabricando cachaça na primeira coluna de separação, recuperando álcool hidratado na segunda coluna e, mais adiante, produzindo álcool anidro na terceira coluna da destilação fracionada. Os produtos obtidos são, então, encaminhados para a distribuição comercial.

Como é possível notar, nesta última fase da produção, não há utilização destacada de combustíveis fósseis. Pelo contrário, o que se vê são boas iniciativas de aproveitamento de resíduos, tanto para geração de energia no próprio processo produtivo, quanto na comercialização com outros mercados, como o de ração animal, o de fertilizantes e até a indústria química. Assume-se, dessa forma, que esta etapa final de produção não se enquadra como foco principal das alternativas tecnológicas de substituição do diesel a serem mapeadas.

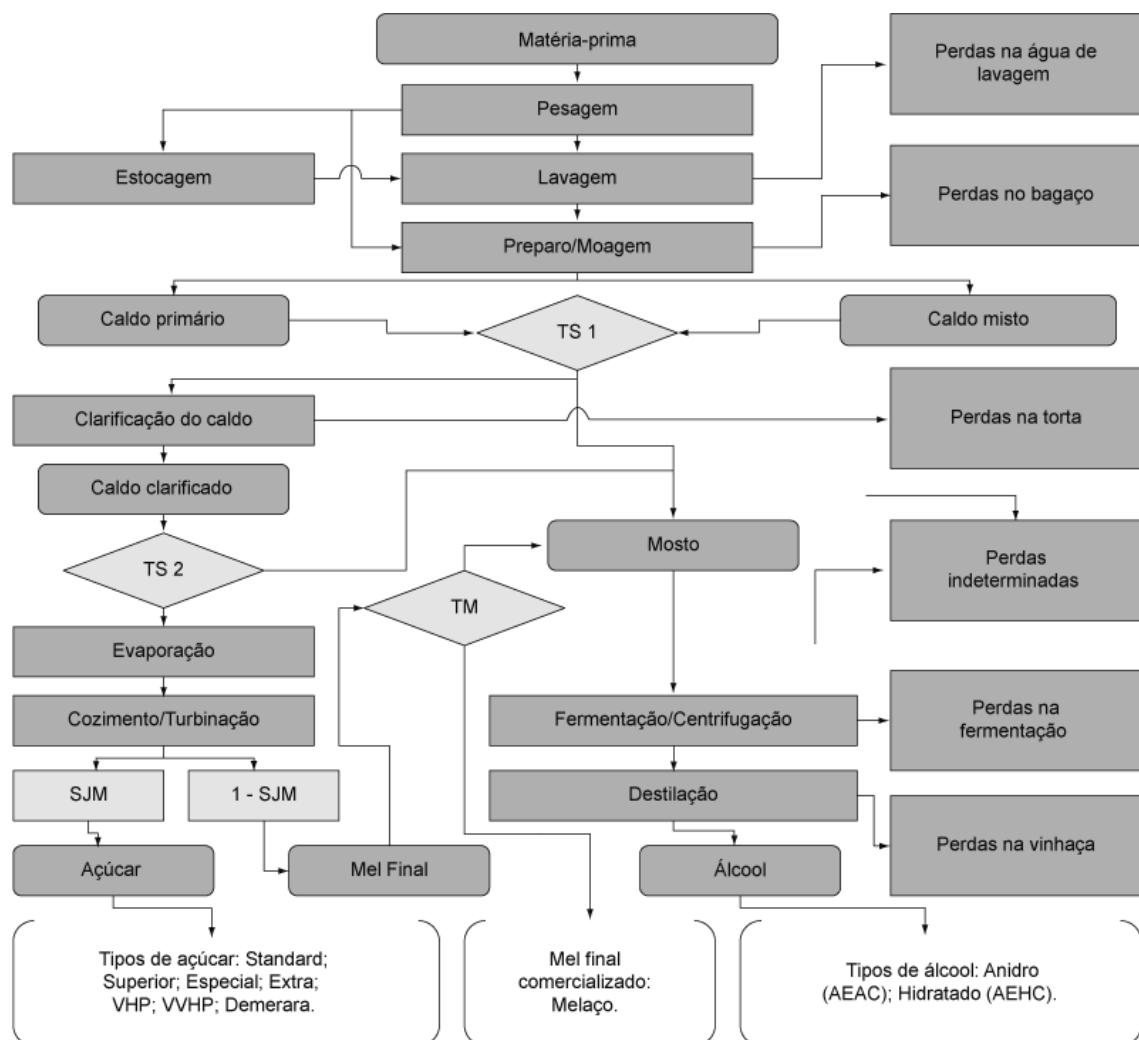


Figura 16 – Fluxograma das atividades que compõem a fase industrial

Fonte: Fernandes, 2003

2.3 Aquecimento global e indicadores ambientais

O presente tópico tem como meta a consolidação do conhecimento e das discussões acadêmicas a respeito das interpretações existentes para as razões do aquecimento global. A

intenção maior é compreender as divergências sobre a efetividade da proposição de regulamentações. Estas já alcançam bastante destaque nas relações diplomáticas contemporâneas, buscando a formalização de medidas em prol da diminuição dos impactos ambientais, atrelados à emissão de poluentes nas cadeias de produção.

Para tanto, faz-se fundamental, além da revisão bibliográfica mais próxima aos conceitos ambientais, um mapeamento de quais são os índices e indicadores que podem auxiliar a análise não só no campo qualitativo, mas também quantitativo. Neste trabalho, será focado o conceito mais disseminado popularmente de pegada de carbono (PC); a pegada ecológica, índice que recentemente ganha destaque nas publicações acadêmicas e, mais adiante, alguns indicadores usuais no setor sucroalcooleiro, que podem contribuir substancialmente para os objetivos deste projeto.

Enfatizar-se-á, em toda a abordagem, a relação das contribuições mitigadoras que colocaram o etanol, como fonte alternativa de energia, no centro das discussões ambientais entre as nações. De fato, pretende-se destacar aqui a força político-econômica do etanol, como uma vantagem nacional específica a ser exaltada em suas relações comerciais, especialmente, na competitividade entre os países emergentes.

2.3.1 Aquecimento global

Acredita-se que o aquecimento global é decorrente do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre. Recentemente, vem sendo fortemente sentido pelas populações, mostrando que não é um fenômeno natural cíclico, mas sim resultado direto do derramamento indiscriminado de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, dióxido de enxofre, CFCs e outros gases agressivos à biosfera. O grande nível de utilização de combustíveis fósseis, na geração de energia para indústrias, casas, aquecimento domiciliar e para a propulsão das frotas de coletivos e de carros particulares, consiste na intervenção mais danosa do homem na natureza no período pós revolução industrial. Esta ação exagerada tem causado o aquecimento gradual da superfície terrestre, mudando a dinâmica dos oceanos e das diferentes camadas atmosféricas. Desde 1860, de 90 a 180 bilhões de toneladas de carbono foram lançadas em virtude de queimadas para desmatamentos, enquanto de 150 a 190 bilhões adicionais dizem respeito à combustão de carvão, petróleo e gás natural (Bajay, 2005).



Figura 17 – Esquematização – Efeito Estufa

Fonte: Andrade et al, 2009; extraído de Mundo Educação

As ações e decisões humanas, portanto, acarretam na relação causa-efeito no sistema climático, gerando uma série de prejuízos associados aos impactos globais e regionais da elevação de temperatura. Exemplo notável é a diminuição da produção de grãos em todo o mundo, decorrente de eventos climáticos extremos, podendo agravar a questão da fome no planeta, especialmente nos países mais pobres. Incêndios, desequilíbrios no abastecimento de água, aumento da força de temporais e inundações decorrentes (decorrentes do aumento das marés) são outros alarmantes riscos que já preocupam a sociedade contemporânea (Andrade et al, 2009). De fato, há sim certa positividade na emissão de dióxido de carbono, principalmente na manutenção da vida, a partir da facilitação da fotossíntese de plantas e evitando o congelamento da Terra. Contudo, presencia-se atualmente uma situação global de falta de conscientização e, mais fundamentalmente, evidente descontrole por parte das nações, gerando excessos que fatalmente causarão danos irreversíveis à biosfera.

Por algum tempo, a discussão sobre a efetiva relação quantitativa entre emissão de gases e aumento de temperatura acalorou as publicações acadêmicas voltadas à esfera ambiental. Hoje em dia, já se pode assumir como consenso a máxima de que a estabilização da temperatura exige, antes de tudo, a estabilização das emissões líquidas antrópicas.

Algumas ações tecnológicas de remoção, ainda em desenvolvimento, englobam também medidas para a fertilização artificial de oceanos com sais de ferro e a captura e armazenamento geológico em poços de petróleo e gás ou aquíferos salinos.

Certamente, no entanto, apenas as soluções de remoção de CO₂ não serão suficientes para conter as emissões decorrentes do acelerado desenvolvimento industrial projetado para as próximas décadas. Neste contexto, fazem-se necessárias outras reações, prioritariamente, a mudança nos hábitos e comportamentos nas nações desenvolvidas e a busca constante pela mitigação de emissões. Mitigação esta que visa a redução das emissões líquidas por meio de soluções tecnológicas criativas que ao mesmo tempo preservem a produtividade econômica e o desenvolvimento social. De fato, é nesta seara em que se encaixa a expansão da utilização do etanol como fonte energética alternativa, objetivo maior deste trabalho.

A primeira manifestação institucional formal relativa ao aquecimento do planeta data de 1988, quando foi criado, no âmbito das Nações Unidas, o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), para uma avaliação inicial do conhecimento humano sobre o tema. Este evento culminou na produção de um relatório, publicado em 1990, com o primeiro registro histórico de aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e previsão de que a temperatura global aumentaria cerca de 3 graus Celsius até 2100. Como reação a este estudo, a ONU estabeleceu um processo negociador de uma convenção, visando a estabilização da emissão de GEE em um nível considerado seguro à sobrevivência humana nos próximos séculos. Formulou-se, então, a Conferência das Partes da Convenção (COP), que avaliou a influência de cada uma das nações para o aquecimento global e resultou, em 1997, em um mandato de negociação de compromissos nacionais, para os países industrializados, propondo a redução gradativa das emissões de poluentes (Protocolo de Kyoto). Este tratado, além disso, criou os mecanismos de “créditos de carbono” (mercado do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL), com o intuito de se reduzir o custo financeiro das ações de mitigação. Na prática, os países que se habilitaram a seguir as medidas propostas, a partir de 2005, são avaliados por um sistema de cumprimento de metas entre 2008 e 2012. O Brasil, até agora, possui avaliação positiva, destacando-se como terceiro maior vendedor de créditos de carbono em sua participação voluntária no MDL (apresentação de 68 projetos, sendo 24 do setor energético, com redução total estimada em 3,45 milhões de toneladas de CO₂ e faturamento de US\$25,4 milhões em 2008).

Discute-se, atualmente, um plano de ação, pelo qual, novas restrições mais amplas incrementariam o acordo preliminar, dessa vez incluindo um número maior de países

integrantes, principalmente os de maior produção industrial. Fora do escopo do protocolo de Kyoto, o COP também prospecta a criação de um regime regulatório de prazo mais longo, que possa conduzir a metas quantitativas da média de temperatura global. As perspectivas das negociações internacionais apontam para os seguintes objetivos (Meira Filho & Macedo, 2010):

- Limite de 2 graus Celsius para o aumento de temperatura em 2100;
- Redução de emissões dos países industrializados de 80% em relação aos níveis de 1990;
- Redução de emissões dos países emergentes em relação à tendência atual;
- Consideração especial para os países de menor desenvolvimento relativo.

Para tanto, discute-se o refinamento futuro das regulamentações acordadas atualmente, tendo em vista os respectivos três grandes grupos de formas de limitação de emissão de GEE:

- Criação de padrões de eficiência energética, proibição de práticas industriais danosas, tendo-se em vista a redução de possíveis aumentos de custo para a sociedade;
- Imposição de medidas tributárias sobre a emissão de poluentes (*carbon tax*), definição de renúncias fiscais (impostos negativos) e disponibilização de crédito em condições favorecidas para empreendimentos que resultem em diminuição de emissões.
- Melhoria dos mecanismos de comercialização de limites de emissão (*cap-and-trade*), a partir da criação de certificados de permissão de emissões em volumes pré-estipulados, objetivando-se o equilíbrio do mercado em prol das tecnologias mitigadoras com maior redução de custos marginais.

O uso de fontes de energia renovável e com baixo teor de carbono, como já ressaltado, é uma das estratégias na mitigação da emissão de GEE, combatendo o aquecimento global. O etanol da cana-de-açúcar, neste âmbito, é uma alternativa já disponível comercialmente e com balanço energético extremamente favorável. Este combustível possui enorme potencial de expansão para outras nações senão o Brasil, rapidamente podendo participar da economia internacional, inclusive com novas aplicações. Em 2006, por exemplo, a redução de emissões de GEE em virtude do uso de etanol, substituto à gasolina, alcançou 22% das emissões totais dos setores de geração de energia elétrica e transporte brasileiros, podendo chegar a 43% em

2020. Em relação ao setor energético como um todo (incluindo a indústrias e residências), mitigou as emissões brasileiras em 10% em 2006, podendo atingir 18% em 2020.

Estas reduções podem se traduzir em valor econômico, determinado pelo custo de investimento adicional em tecnologia necessário para um nível desejado de mitigação. No Brasil, estima-se esse valor em US\$ 0,20 por litro. Em outras palavras, a cada litro de etanol comercializado, deixam de ser gastos US\$ 0,20 em investimentos que teriam que ser feitos para conter o aquecimento global (Macedo, 2007). Evidencia-se, desta forma, a efetividade ambiental e também econômica da utilização do álcool hidratado e anidro como solução energética.

2.3.2 *Indicadores ambientais*

Os indicadores ambientais são, basicamente, medidores quantitativos com a proposta fundamental de se definir padrões sustentáveis de desenvolvimento, considerando-se aspectos ecológicos, sociais, éticos ou até culturais. Contudo, antes de se enumerar os principais indicadores e índices existentes, é interessante alinhar qual é, primeiramente, o conceito por trás do termo “sustentabilidade”. A partir de 1980, o encontro internacional *The World Conservation Strategy* sacramentou a pauta de discussões sobre tal termo, nas esferas econômica, social e, obviamente, ambiental. Como consenso final, chegou-se a uma definição de sustentabilidade como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais da sociedade, sem comprometer a habilidade das próximas gerações em também satisfazer suas necessidades futuras”.

A palavra sustentabilidade deriva do latim “sustentare”, que significa sustentar, suportar, conservar em bom estado, manter, resistir. Nesta lógica, pode-se, pois, admitir como sustentável, tudo aquilo que tem capacidade de ser suportado, mantido. Verifica-se, desse modo, a divergência entre o conceito acadêmico de sustentabilidade e a visão leiga popular, que comprehende apenas a face ecológica do conceito. Uma das razões para este fato se dá pela alta complexidade dos cálculos dos índices medidores de sustentabilidade, que envolvem, necessariamente, uma enorme gama de variáveis, distanciando-se do noticiário cotidiano. De fato, na prática, os índices mais conhecidos e utilizados tanto popularmente, quanto na indústria, resumem-se a uma análise simplificada, porém menos abstrata, com apenas alguns parâmetros. O melhor exemplo disso é o conceito de “pegada de carbono” (*carbon footprint*), que será detalhado mais adiante. Vale salientar que, ao contrário do possa parecer, estes

índices mais simplificados nada perdem em efetividade de análise, se devidamente utilizados com objetivo de comparação entre tecnologias, setores ou até, em um âmbito mais macro, nações (Chambers & Conway, 1991).

Três principais índices generalistas de sustentabilidade se destacam na academia (Siche et al, 2007):

- Pegada Ecológica (*Ecological Footprint – EF*): vastamente utilizado cientificamente no Brasil, foi proposto por Rees (1992) com o objetivo de calcular a área de terra necessária para a produção e manutenção de bens e serviços consumidos por uma determinada comunidade. Para tanto, consiste na construção de uma matriz consumo/uso de terra, considerando-se cinco categorias principais de consumo (alimento, moradia, transporte, bens de consumo e serviços) e seis categorias principais de uso da terra (energia da terra, ambiente degradado construído, jardins, terra fértil, pasto e floresta sob controle). Atualmente, após alguns adendos à sua metodologia original, visando melhorar algumas deficiências apontadas pelos acadêmicos, a pegada ecológica global é estimada em 1,37 ha/pessoa, valor considerado sinalizador de um futuro provavelmente alarmante.
- Índice de Sustentabilidade Ambiental (*Environmental Sustainability Index – ESI*): é um índice extremamente robusto e laborioso, composto por uma série de sub-indicadores definidos por 146 variáveis, entre dados estatísticos de emissão de rejeitos em diversos setores do consumo. É amplamente discutido pela comunidade científica, gerando grande impacto e controvérsias na avaliação de sustentabilidade de algumas nações, principalmente em relação aos EUA e Dinamarca, países que, tradicionalmente, são tidos como grandes facilitadores do aumento do efeito estufa.
- Indicadores de Desempenho Energético (*Energy Performance Index – EMPIs*): baseia-se num conjunto de índices, de cunho mais técnico, que tratam o sistema econômico como um sistema termodinâmico aberto, contabilizando os fluxos dos recursos da economia em unidades de energia agregada.

Como já citado, os indicadores descritos anteriormente são originalmente generalistas, sendo utilizados em macro-análises de países, em alguns casos, na escala de setores econômicos. Dessa forma, não são os mais adequados quando se deseja analisar as emissões de GEE no nível de cadeia de produção, de apenas um produtor ou até de um produto frente a

seus consumidores. Nestes casos, o indicador amplamente disseminado refere-se ao conceito de pegada de carbono (Wiedmann & Minx, 2007).

Desde 1960, algumas indústrias britânicas já utilizavam indicadores relacionados às emissões de carbono em sua produção, não com o intuito ambiental, mas sim como variável na análise de rendimento de certos equipamentos ou processos (Hammond, 2007). Com o advento das discussões em torno de indicadores de sustentabilidade, estas indústrias naturalmente passaram a aproveitar seus índices próprios e, após certo tempo, iniciou-se um processo de padronização entre os diferentes atores das cadeias de produção. Até hoje esta busca por um conceito unificado sobre “pegada de carbono” persiste, refletindo-se nas discussões da comunidade científica, de governos e de organizações não-governamentais (ONGs). Ainda há uma série de classificações diferentes e de fato, certa discrepância teórica entre o conceito admitido na indústria e o compreendido pela sociedade. Algumas questões que envolvem o índice são:

- a viabilidade prática da inclusão da emissão de outros GEE além do dióxido de carbono (CO_2) no cálculo do indicador, principalmente o metano;
- a necessidade ou não de expansão da abrangência do indicador também para GEE que não contenham carbono em suas moléculas, como o N_2O , por exemplo;
- a consideração ou não do monóxido de carbono, gás que não é enquadrado como GEE, mas que também exerce ação agressiva sobre a humanidade, sendo altamente prejudicial à saúde.
- a proposição de uma estratégia para a consideração de emissões indiretas aos processos de produção, que seja genérica ao ponto de sua lógica ser aplicável aos diferentes setores econômicos.

Mesmo com tantas dúvidas, pode-se constatar a tendência pela definição que mais vem sendo utilizada nos meios de informação e que, por esta razão, tende a se consolidar como forma mais convencional de cálculo. A pegada de carbono, portanto, é a “medida da quantidade total de emissão de dióxido de carbono que é direta e indiretamente causada pela atividade de um produto ou acumulada ao longo de seus estágios de vida” (Wiedmann & Minx, 2007). Como atividades, incluem-se as ações de indivíduos, populações, companhias, organizações, processos, setores industriais, entre outros. Admitem-se como produtos, neste conceito, tanto bens de consumo como serviços. Inclui-se apenas o dióxido de carbono na análise, já que, na prática, ainda não existem bancos de dados ou, em muitos casos, meios

tecnológicos que assegurem, no nível da produção, quantificações das emissões de outros GEE em todas as fases da cadeia de um produto. De fato, vale salientar que, mesmo tendo uma nomenclatura que remete a uma medida por área (termo “pegada”), o índice mais usual de pegada de carbono refere-se à quantidade total de dióxido de carbono em massa (toneladas). Com o intuito de se expandir essa definição para os demais GEE, o cálculo em massa da pagada de carbono evoluiu, mais recentemente, para o conceito de dióxido de carbono equivalente (geralmente denotado como KgCO₂eq). Este se baseia na quantidade emitida de CO₂ que implicaria, hipoteticamente, no mesmo potencial de aquecimento global do conjunto de gases emitidos pelo consumo de um determinado produto, dada uma referência temporal, em média, de cem anos (Gohan & Shine, 2007). Para o consumo de óleo diesel, especificamente, o valor estimado é de 3,01 kg CO₂eq por litro, segundo relatos de Garcia e Sperling (2010).

Metodologicamente, destacam-se duas formas de cálculo de acordo com a definição descrita anteriormente (Lenzen, 2001; Wiedmann et al, 2006). A Análise de Processos (*Process Analysis – PA*), metodologia *bottom-up* que discretiza todos os agentes participantes de emissões na análise de ciclo de vida de um produto (*Life Cycle Analysis – LCA*), e a Análise de Inputs e Outputs Ambientais (*Environmental Input-Output Analysis – EIO*), metodologia alternativa, *top-down*, que parte de bancos de dados de emissões em setores econômicos relacionados a um produto, estimando-o como parte influenciadora dessas emissões. O método EIO, de fato, é o mais utilizado, especialmente por possuir a vantagem de requerer menos mão-de-obra para sua execução, visto que desmembrar setores econômicos, como requerido pelo método PA, é uma tarefa bastante árdua. Existem proposições acadêmicas de novas metodologias híbridas (EIO-PA), que são o estado da arte atual no ramo contemporâneo denominado “economia ecológica” (Heijungs et al, 2006). Em geral, estes métodos buscam mapear a complexidade de aquisição de informações em cada um dos setores econômicos, definindo quais podem ser desmembrados para utilização de PA e quais requerem estimativas genéricas de EIO. A Figura a seguir (18) destaca o valor da pegada de carbono calculada para diversas nações, criando um panorama da contribuição dos povos para o aquecimento global por meio de ferramentas híbridas para estimativa de emissões.

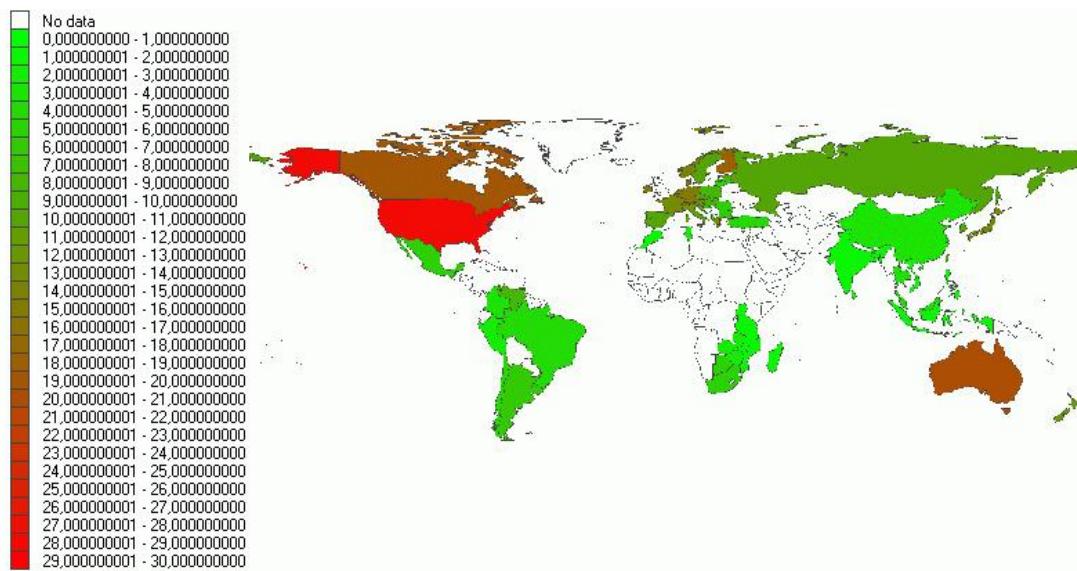


Figura 18 – Panorama mundial: Pegada de Carbono per Capita (toneladas de CO₂/população)

Fonte: Hertwich & Peters, 2009

2.4 Motores de combustão interna

O objetivo geral deste tópico é a descrição técnica das especificidades dos motores de combustão interna, basicamente dos motores de ciclo Otto e ciclo Diesel, que possibilitam a inclusão do etanol como fonte combustível. Detalha-se historicamente o desenvolvimento das soluções que atualmente viabilizam o bom rendimento dos motores *flex*, desde as adaptações do motor a gasolina para a criação do sistema movido exclusivamente a álcool hidratado, até o surgimento de veículos e, mais recentemente, motociclos com capacidade de abastecimento bicompostível.

Além disso, busca-se explorar, ainda de forma preliminar, as iniciativas, descritas pela pesquisa acadêmica, vinculadas diretamente às intenções deste projeto, ou seja, aquelas que compreendem os grupos de alternativas para substituição do diesel pelo etanol. Primeiramente, relata-se sucintamente sobre estudos aplicados para ônibus, microônibus, vans para transporte coletivo de passageiros, exemplificadas pelas ações do Programa BEST (*Bio-Ethanol for Sustainable Transport*). Depois, a abordagem é direcionada de fato para o objetivo de escopo, descrevendo-se as soluções prospectadas para máquinas agrícolas e veículos de transporte de carga do setor sucroalcooleiro.

2.4.1 Veículos e motociclos flex

Para se compreender melhor as especificidades técnicas que possibilitaram a criação do motor *flex*, faz-se necessário, antes de tudo, discutir mais detalhadamente, entre o etanol e os derivados de petróleo, as correspondentes similaridades e distinções de uso para combustão. A diferença mais evidente se dá pelo alto teor de oxigênio contido no etanol hidratado (em torno de 35%), o que implica num poder calorífico reduzido em relação aos combustíveis fósseis, acarretando em maior quantidade de combustível para a obtenção de um mesmo valor de potência no motor. No entanto, o O₂ viabiliza uma queima mais limpa, exigindo menor resistência à corrosão do maquinário. Além disso, o etanol também se destaca por possuir uma elevada resistência a auto-infamação (octanagem), o que lhe credencia como fonte de energia ideal para motores com ignição por centelha (ciclo Otto), possibilitando o aumento da taxa de compressão e, consequentemente, do rendimento energético em comparação com a gasolina. Esta é a razão pela qual se mistura o álcool anidro à gasolina para aumento de octanagem, evitando-se a adoção de aditivos tóxicos como o chumbo tetraetila ou de hidrocarbonetos aromáticos. Por fim, destaca-se o fato do etanol, diferentemente da gasolina A, ser miscível à água, o que possibilita a produção do álcool hidratado. É o etanol, portanto, que viabiliza a estabilidade da mistura entre gasolina e água nos motores bicombustíveis em temperaturas superiores a -10°C (Neto et al, 1993).

Como já citado anteriormente, a criação de motores exclusivos a etanol hidratado foi estimulada pelo surgimento das CATs (Centros de Apoio Tecnológico). Uma série de medidas de conversão dos motores à gasolina foi colocada em prática para o mercado nacional (Nigro & Szwarc, 2010). Com maior relevância, destacam-se:

- Troca de materiais auxiliares com baixa compatibilidade química com o etanol hidratado, como plásticos, borrachas e materiais metálicos de proteção;
- Acréscimo da taxa de conversão dos motores, por meio do rebaixamento do cabeçote e substituição dos pistões;
- Nova calibração dos carburadores para dosagem de etanol;
- Alteração das curvas de avanço centrífugo e vácuo dos distribuidores para assegurar o tempo ótimo de centelha para o etanol;
- Uso de velas de ignição com grau térmico menor do que para o motor à gasolina;

-
- Criação de um sistema auxiliar de partida a frio com injeção de gasolina no coletor de admissão, aquecidos pela água de arrefecimento do motor e pelos gases de escapamento.

Os veículos com motores exclusivos a álcool hidratado, com uma quantidade considerável de alterações, ainda possuíam desempenho competitivo aos carros à gasolina, devido à maior eficiência energética do etanol. As propriedades favoráveis do combustível alternativo para aumentar o torque e potência eram aproveitadas e o consumo dos motores era relativamente baixo. Porém, persistiam alguns problemas desagradáveis ao consumidor, principalmente ligados aos novos sistemas que, em muitos modelos, pelo ineditismo de projeto, começavam a falhar com freqüência. Na fase de decadência final do Proálcool estes inconvenientes pesaram na decisão dos consumidores, que acabaram re-migrando para os veículos a gasolina. Passaram a serem estimuladas pesquisas para utilização do etanol não como combustível exclusivo, mas sim como opção de abastecimento a ser ponderada pelo consumidor. Nascia o conceito de carros *flex*.

Os primeiros carros bicombustíveis surgiram em 1984 com a *Ford* nos EUA. Em 1992, a *General Motors (GM)* lançou o primeiro modelo flexível comercialmente, a van *Lumina*, abastecido com etanol anidro misturado a 15% de gasolina (E85) ou a gasolina pura (E0). A frota até obteve inicialmente um crescimento expressivo, porém sucumbiu diante da falta de políticas governamentais e da escassez de bombas de abastecimento no território americano.

No Brasil, uma equipe de engenheiros da filial nacional da *Robert Bosch* iniciou os trabalhos de desenvolvimento da tecnologia *flex fuel* a partir da idéia de uma patente da matriz americana. Criou-se uma técnica de detecção de combustível por meio de uma sonda de oxigênio que media a condutividade elétrica do ar e estabelecia uma correlação com a quantidade de gás O₂ presente no reservatório. Os dados gerados por esta sonda eram gerenciados por um *software*, correlacionado a um modelo de sensor que detectava, por leitura infravermelha, a mistura de combustíveis antes de sua injeção no motor. O sistema com sensor tinha, na época, um custo bastante elevado, porém era, na visão da *Bosch*, uma solução necessária para romper a ociosidade da indústria sucroalcooleira brasileira, revitalizando a utilização como fonte de energia alternativa no país. Com este apelo, a técnica foi apresentada às montadoras. A *GM* brasileira mostrou-se bastante interessada, testando a possibilidade de adaptação do automóvel *Omega 2.0* à primeira proposta de tecnologia *flex fuel*. A *Fiat* também se interessou, mas não houve maiores desdobramentos comerciais. A

Volkswagen não demonstrou, a princípio, interesse comercial ou de apoio ao desenvolvimento. Os próprios produtores de etanol também não demonstraram contentamento, já que viam a idéia como uma ameaça ao mercado dos consumidores cativos de álcool hidratado (Lima, 2009).

Outras empresas do setor automobilístico começaram a também investir na criação de sistemas bicombustíveis. A partir da segunda metade da década de 90, a filial brasileira da *Magneti Marelli* focou seu departamento de P&D na possibilidade de calibração de motores a álcool, apresentando, em 2000, um sistema que aproveitava sensores já presentes nos veículos convencionais a gasolina, relacionados ao controle da emissão de poluentes (sonda lambda), à medição de rotação do motor e ao monitoramento do fluxo de ar admitido. Por ser bastante simples, barata e confiável, este sistema conseguiu atrair a atenção de todas as montadoras. O governo, concomitantemente, agiu em prol da tecnologia *flex*, permitindo com que a alíquota de IPI destes veículos fosse idêntica a existente para os modelos exclusivos a álcool (tarifa mais baixa do que nos casos a gasolina). Compensava-se, assim, os investimentos de desenvolvimento, além das tecnologias criadas no Proálcool, possibilitando-se ações de implementação em massa dos carros *flex* no país.

Em abril de 2003, a *Volkswagen* lançou o *Gol Total Flex 1.6*, primeiro veículo *flex* a chegar ao mercado. Em junho, *GM* e *Ford* iniciavam a comercialização de carros *flex* de modelos populares, aos quais se supunha haver maior demanda consumidora por uma solução de escolha entre diferentes combustíveis. Enfatiza-se que a introdução da tecnologia de motores flexíveis no Brasil foi baseada no conceito da não modificação do motor a gasolina original, de modo que, nesta primeira geração de veículos, voltou-se atenção para a funcionalidade do sistema e atendimento dos requisitos de emissões. A taxa de compressão do motor a gasolina C era mantida, o que não privilegiava a capacidade de auto-infamação do etanol, reduzindo os possíveis ganhos de torque e potência provenientes de sua utilização. Na segunda e terceira gerações de veículos, com a introdução de catalisadores e velas de ignição para novas taxas de compressão e o ganho de experiência na otimização de processos, as taxas admissíveis de ganho de rendimento começaram a alcançar valores próximos da teoria química.

Claramente, os veículos com tecnologia *flex* se tornaram um grande sucesso. De 2003 a 2007, as vendas anuais aumentaram de 48 mil para aproximadamente dois milhões de veículos. Atualmente, o carro flexível representa 90% das vendas e é o ponto alto da história de sucesso do etanol brasileiro na década, com estratégias diferentes dos fabricantes

estimulando ainda maiores oportunidades de crescimento do mercado. O gráfico a seguir (Figura 19) destaca quantitativamente esta incidência de automóveis flex em relação aos tradicionais veículos a gasolina.

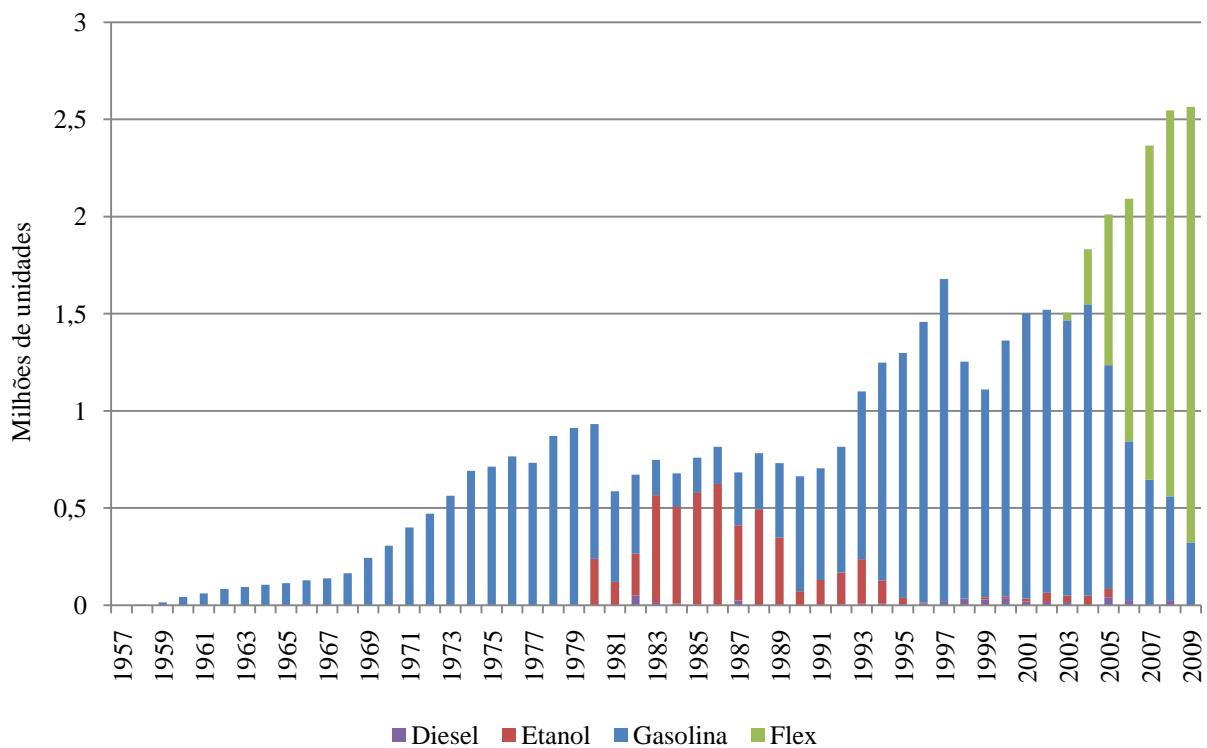


Figura 19 – Vendas de veículos bicombustíveis no mercado brasileiro

Fonte: Santos, 2010

De fato, ganhos de eficiência ainda podem ser realizados, já que ainda não se chegou a um patamar de aproveitamento ideal do calor latente de vaporização e da maior octanagem do etanol. No Brasil, os modelos populares têm volume de produção capaz de suportar desenvolvimentos intensivos em engenharia, mas são muito sensíveis a aumentos de preço. Outra questão a ser elucidada correlaciona-se à emissão de poluentes. Mesmo sendo um combustível notavelmente mais limpo, o etanol emite valores comparativamente superiores de emissão em relação à gasolina para motores *flex*, o que pode e deve ser reparado pela indústria automobilística nas próximas gerações de modelos. Algumas soluções estão sendo estudadas, principalmente relacionadas ao sistema de partida a frio, que é o grande prejudicador do rendimento do combustível alternativo (Nigro & Swzarc, 2010):

- Aquecimento elétrico do combustível e utilização de bicos injetores com orifícios de menor área;
- Utilização de sensores de oxigênio com resposta a temperaturas mais baixas;
- Uso de conversores catalíticos instalados mais próximos das válvulas de escapamento, visando aquecimento mais rápido;
- Uso de sistemas que permitam a variação de ângulos de abertura e fechamento das válvulas de admissão, para variação da taxa de compressão do motor;
- Injeção direta de etanol na câmara de combustão, aproveitando a característica antidetonante do etanol;
- Introdução de coletores de admissão com aquecimento controlado conforme a proporção de etanol no combustível;
- Sistema de controle da temperatura de água do motor;
- Uso de misturas mais diluídas na câmara de combustão por meio do uso de válvulas diferenciadas.

A Figura 20 consolida os fatos apresentados anteriormente, revelando um panorama geral do grau de modificações exigidas aos automóveis convencionais a gasolina para adaptação a situação bicombustível.

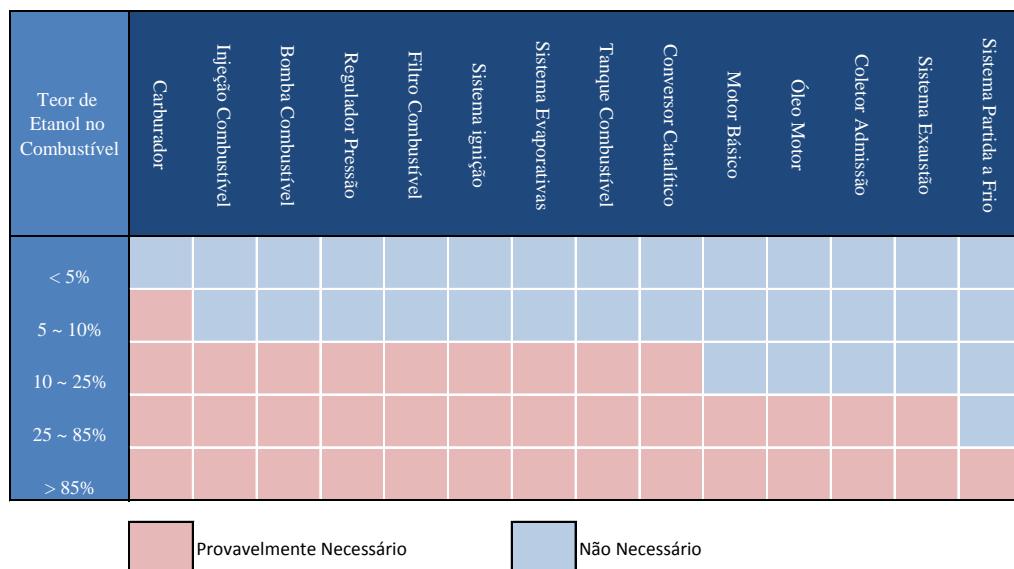


Figura 20 – Modificações necessárias para “blends” (gasolina + álcool) em veículos bicombustíveis

Fonte: Adaptado de Joseph, 2006

Mais recentemente, seis anos após a primeira geração de carros *flex*, em 2009, a *Honda* inseriu no mercado nacional a primeira motocicleta com motor bicombustível, expandindo a opção de abastecimento também para os clientes do seguimento de veículos de duas rodas. Nesta seara, para motores simples de baixa cilindrada, já eram realizadas conversões caseiras, com o objetivo de economia de gastos, mas que freqüentemente resultam em falhas de combustão e emissão demasiada de poluentes. A montadora decidiu não alterar, de forma análoga à primeira geração do setor de automóveis flexíveis, a taxa de compressão original do motor a gasolina, realizando apenas ações gerais de adaptação. Baseia-se, na realidade, em uma reedição, com alguns avanços, das motos a álcool da década de 80, mas que agora pode representar uma excelente oportunidade de exportação, com baixo custo e conceito inovador.

2.4.2 *Substituição de diesel*

Para aplicações de maiores potência e serviços pesados, ao invés dos motores de acionamento através de ignição por centelha (ciclo Otto), privilegia-se a utilização de motores do ciclo Diesel, de ignição por compressão, energeticamente mais eficientes. É o caso típico de todos os motores com menor rotação, em navios, submarinos, caminhões, transportes coletivos, máquinas agrícolas, entre outros sistemas.

Em termos de emissões, se comparado ao ciclo Otto, o ciclo Diesel tende, em teoria, a emitir menor massa de poluentes por unidade de trabalho útil, inclusive no caso dos GEE. Na prática, no entanto, os sistemas de pós-tratamento de gases dos motores por ignição de centelha comumente mitigam a emissões. Este fato explica porque, em particular, grande parte da poluição dos grandes centros urbanos está atrelada aos coletivos e caminhões e pequenos furgões, ao invés da ação de veículos de passeio. Dessa forma, comprova-se como ações de substituição do óleo diesel são bem-vindas com o intuito de diminuição da agressão dos gases de efeito estufa na atmosfera. O etanol enquadra-se, nesta lógica, como possível fonte alternativa também para este outro derivado do petróleo.

Como já explicado, a alta volatilidade e octanagem do etanol o definem como um ótimo combustível para acionamento de motores do ciclo Otto. No entanto, estas características não são interessantes no caso dos motores de ignição por compressão, já que o rendimento energético praticamente não varia com mudanças no abastecimento. O etanol, num primeiro olhar, é desfavorável, se comparados a demais fontes alternativas como o

biodiesel, já que exige uma série de modificações técnicas para seu bom rendimento em motores Diesel (Nigro & Szwarc, 2010).

Uma análise mais profunda e com visão de mercado, no entanto, qualifica fortemente o etanol como fonte alternativa ao diesel em algumas aplicações específicas. Os mercados locais não seguem a tendência global de maior tributação para a alternativa fóssil e, de fato, existe atualmente uma forte pressão por soluções rápidas e definitivas para a redução das emissões, o que, no âmbito da produção massificada, só pode ser correspondido com a disseminação do uso do etanol. No setor sucroalcooleiro, foco deste trabalho, a oportunidade econômica de substituição se mostra vantajosa quando a razão de preços etanol/gasolina nos postos cai abaixo de 65%, para a suposição de menor rendimento energético do etanol em motores de ignição por compressão. No caso do biodiesel, os custos ainda são extremamente elevados, independentemente da cultura de produção agrícola, o que, economicamente, ainda declara a favor da insistência dos produtores na manutenção do diesel como fonte energética. É no etanol, portanto, que chances de redução de emissões, com benefícios também financeiros, podem ser encontradas.

A primeira aplicação mais evidente do etanol se dá para os ônibus, microônibus e vans de transporte urbano de passageiros. Iniciativas bastante interessantes vêm sendo conduzidas tanto nacional quanto internacionalmente. A cidade de São Paulo, num ótimo exemplo, fomentou legislativamente suas intenções de minimização de emissões, estipulando uma meta de redução de 10% ao ano do uso de combustíveis fósseis em todos os contratos de transporte público, de modo a utilizar somente combustíveis renováveis em 2018. Outro exemplo ainda mais notável é o programa BEST, iniciativa da União Européia, coordenada pela Prefeitura de Estocolmo, na Suécia. Sua intenção é a inserção de ônibus de testes movidos a etanol hidratado nas grandes metrópoles mundiais (atualmente são nove cidades, inclusive a capital paulistana), para comparação de rendimento com os tradicionais meios de transporte a diesel. Os resultados obtidos até agora têm sido bastante animadores, já que se constata o mesmo consumo energético para os ônibus a diesel e etanol, com tendência de melhorias no sistema a álcool (ainda bastante incipiente). Correlacionada a esta iniciativa, uma segunda aplicação do etanol diz respeito aos pequenos caminhões e furgões de entrega urbana. Nestes casos, como vantagem técnica, há o fato de que os seus motores Diesel serem menores e, portanto, mais facilmente substituíveis por motores Otto com vantagens econômicas.

A terceira principal possibilidade de substituição do diesel por etanol, ressaltado por Nigro & Szwarc (2010) é, precisamente, o campo de ação deste trabalho de conclusão de

curso. O uso de álcool hidratado nas máquinas agrícolas e nos veículos de transporte de carga do setor sucroenergético apresenta indiscutível viabilidade econômica, de uso do próprio produto da produção como fonte de energia em toda a cadeia agrícola, de corte, transporte e carregamento.

Quatro grupos de estudos de soluções se destacam nas iniciativas promovidas pelos institutos de pesquisa e agentes do setor: transformação de motores Diesel pesados em motores Otto, uso de etanol aditivado, uso de etanol nebulizado e composição de misturas de etanol, diesel e cossolvente.

A adaptação de motores de compressão para motores por ignição de centelha requer investimento relativamente baixo e está sendo desenvolvida, por enquanto na faixa dos 60kW e 200kW pela *MWM International* e *FPT*, respectivamente. Algumas das principais medidas necessárias remetem às seguintes modificações:

- Alterações dos pistões para redução da taxa de compressão, buscando valores compatíveis com etanol;
- Substituição do sistema de injeção diesel de alta pressão por um sistema de ignição no qual as velas são instaladas nas posições dos bicos injetores;
- Adaptação de um sistema de injeção Otto de baixa pressão, com os injetores no coletor de admissão instalados junto às portas dos cilindros;
- Instalação de válvula borboleta para controle do fluxo de ar de admissão;
- Instalação de sensores de oxigênio, de detonação e de pressão absoluta na admissão;
- Utilização de uma Unidade de Controle Eletrônico (ECU) programada conforme os requisitos de combustível e avanço de ignição do motor;
- Modificações nas válvulas de escape e suas sedes.

De fato, receia-se que após a conversão haja um provável aumento do consumo energético decorrente da menor eficiência do ciclo Otto configurado, principalmente nos casos de motores com pistões de grande diâmetro, ou com aplicações com grandes variações de carga e rotação. A funcionalidade das máquinas agrícolas, todavia, não se enquadram nestas especificações, sendo altamente propícias às modificações citadas. Além desse fato, contribui também para o setor as pesquisas atuais para processos de combustão em baixa temperatura (HCCI e CAI), injeção direta na câmara e injeção de água, que podem ajudar ainda mais a reduzir o ônus energético da mudança de ciclo motor.

Sem abrir mão da utilização do motor diesel, uma alternativa para utilização do álcool hidratado consiste no uso de aditivos, para que o etanol atinja a lubricidade necessária para garantir a auto-infamação e a durabilidade do sistema de injeção de combustível. Bastante explorada desde a década de 80 até os dias atuais pela *Scania* e a *Mercedez-Benz*, esta opção já contempla boas soluções em prática no mercado, principalmente na comercialização de ônibus urbanos com motores de ciclo diesel capazes de atuar a uma taxa de compressão de 24:1, utilizando etanol aditivado com polietilenoglicol e atendendo as restrições de emissões européias. São estes modelos que, como já citado, participam do programa BEST em diversos lugares do mundo. Certamente, ainda persistem algumas desvantagens a serem mitigadas, como o custo do aditivo e a necessidade de modificações no motor original dos fabricantes.

Uma terceira possibilidade trata da substituição parcial de óleo diesel, utilizando-se um processo de injeção de álcool hidratado no ar de admissão do motor Diesel (etanol nebulizado), conjugada com a redução da quantidade de diesel injetada na câmara de combustão. Esta solução vem sendo trabalhada pela *Bosch* e *Delphi*, utilizando-se dois tanques de combustível e sistemas de injeção separados, porém com interface eletrônica para alinhamento de dados. Os desenvolvedores ainda se deparam com dificuldades técnicas em situações de operação com carga fora dos valores médios, já que nestas o controle da quantidade de etanol a ser injetada deve ser extremamente preciso coordenada com a quantidade de diesel, para obtenção de valores de rotação adequados. Contudo, a utilização de sensores de detonação e, eventualmente, de válvula borboleta no coletor de admissão podem reduzir as variações necessárias na relação entre adição de etanol nebulizado e diesel.

Há ainda outra alternativa de substituição do diesel pelo etanol, também parcialmente, baseada na preparação de misturas de álcool hidratado em diesel, com a utilização de cossolventes ou agentes emulsificantes, já que o etanol possui baixa capacidade de misturar-se naturalmente ao combustível fóssil. Alguns problemas comuns, observados em testes, mostram desgaste ou cavitação de alguns componentes do motor, também ocorrendo, em certas configurações, o fenômeno de tamponamento, ação de vapor que acaba cortando o fornecimento de combustível. Certamente, uma excelente possibilidade de resolução destes impasses técnicos refere-se a utilização de biodiesel como meio de mistura, uma vez que o etanol é miscível com este outro combustível alternativo, cujo uso raramente possui limitações em motores do ciclo Diesel. Aproveitar-se-ia, dessa forma, as propriedades de lubricidade do biodiesel e de fluidez do etanol no processo de combustão. Contudo, o alto

custo do biodiesel, atualmente, dificulta a prosperidade comercial desta alternativa, ao menos no curto-prazo.

Em suma, a utilização do etanol em substituição ao diesel é extremamente favorável economicamente no setor sucroalcooleiro. Este fato deve ser utilizado de forma a posicionar o setor como percussor no estudo das diferentes alternativas tecnológicas, desenvolvidas pelos fornecedores de motores, montadoras, fabricantes de componentes e pela academia. Somente com esta perspectiva, os produtores poderão aproveitar, de forma ainda mais contundente, toda a experiência nacional acumulada a partir do Proálcool e que, agora, demonstra capacidade de dar um passo, em busca da plena sustentabilidade ambiental na produção de etanol de cana-de-açúcar.

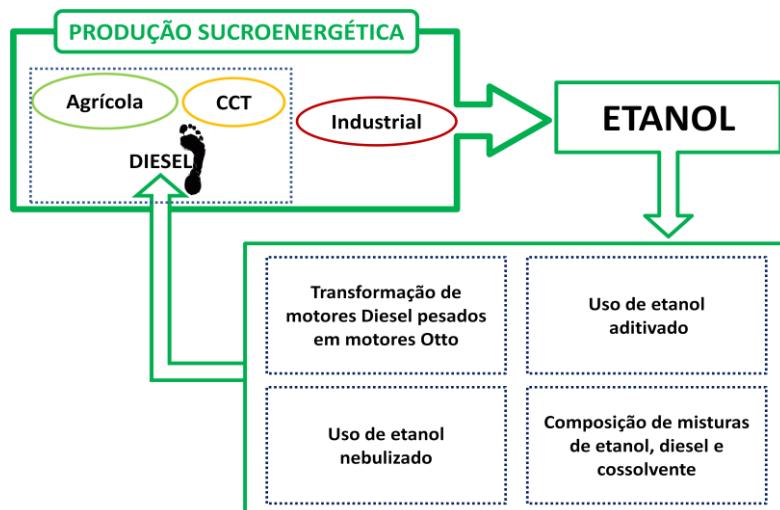


Figura 21 – Campos de soluções para substituição do diesel pelo etanol no setor sucroenergético

Fonte: Elaboração do autor com base em Nigro & Szwarc (2010)

2.5 Gestão de portfólios

Este tópico visa introduzir o conceito de Gestão de Portfólio (GP), e aos métodos mais conhecidos e aplicados nos ambientes industrial e acadêmico. O objetivo maior é apresentar as diversas metodologias utilizadas para auxiliar o processo de seleção e priorização de alternativas, sejam elas um portfólio de produtos, áreas de negócio, ou desenvolvimentos tecnológicos.

A GP tem sido um ramo recentemente bastante discutido, tanto nas corporações quanto no meio científico, ganhando cada vez mais força visto o aumento progressivo da

competição e da consequente busca pela inovação e otimização, nos diferentes mercados. As técnicas em Gestão de Portfólio buscam a criação de um processo analítico que possa avaliar e ponderar entre diversas alternativas, apontando aquelas que são mais alinhadas econômica e estrategicamente com os objetivos da organização. Ajudando dessa forma a priorizar as iniciativas e a otimizar os esforços e gastos com novos empreendimentos.

De fato, em muitas organizações, a falta de um planejamento sistemático para composição de portfólios dificulta a evolução de modelos de negócio promissores, que acabam por ter seu desenvolvimento exclusivamente vinculado a posturas reativas ou a decisões de curto prazo. Perde-se, desta forma, uma série de oportunidades estratégicas que poderiam ser facilmente mapeadas com o uso de ferramentas simples de gestão.

A abordagem que aqui segue segmenta-se em três pontos principais: a consolidação do conceito por trás do termo “gestão de portfólios”, reiterando a adequabilidade deste em relação às intenções deste projeto; a descrição sucinta das técnicas de GP mais comumente adotadas pelas instituições, brevemente relatando-se modificações que gradativamente ocorreram para que estas pudessem vencer empecilhos práticos de implementação; e, por fim, uma descrição específica a respeito do método de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), que será adotado como apoio metodológico na ponderação de critérios e alternativas durante o trabalho. Espera-se que, com o término deste tópico, possa ser proposta uma metodologia ideal de projeto, fundamentada na teoria acadêmica, que venha a efetivamente pautar as ações em torno do mapeamento das formas de substituição do diesel pelo etanol nas fases agrícola e de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.

2.5.1 Conceito de gestão de portfólios

Um grande problema enfrentado no meio corporativo remete às formas mais eficientes para direcionamento de recursos a diversas iniciativas propostas para pesquisa e desenvolvimento (P&D) de novos produtos. Geralmente, observa-se um quadro com abundância de idéias e limitação de recursos, o que traz à tona a seguinte questão: como criar um processo de tomada de decisão que viabilize saber quais possibilidades futuras tendem a prevalecer como mais atrativas, dado que, os escopos e maturidade destas ainda são bastante incipientes para permitir comparações efetivas.

Atualmente os mercados vêm se tornando cada vez mais competitivos, tanto quantitativamente, no que diz respeito ao número de competidores, quanto qualitativamente,

em virtude da maior sofisticação e opcionalidade disponíveis aos consumidores. A inovação não pode ser mais encarada unicamente como um diferencial competitivo, mas sim como um requisito constante da demanda, o que obriga as empresas a estar continuamente a par das tendências de desenvolvimento, tanto passivamente por meio de monitoramento, quanto ativamente por meio de ações de pesquisa. Neste novo enredo, de fato, a consolidação de um processo ininterrupto de gestão de portfólios é verdadeiramente uma questão vital para o sucesso de uma organização. Muitas razões são apontadas pela literatura acadêmica para ressaltar essa importância, enumeradas por Cooper et al (1999):

- Necessidade de operacionalização de grandes negócios por meio da criação de uma linguagem única para alinhamento das diferentes camadas hierárquicas de uma organização em torno de seus objetivos futuros. A criação de um processo de GP, neste contexto, contribui para a formalização do direcionamento estratégico de uma empresa para todos os seus funcionários, evitando descompassos em relação aos tipos de produtos, mercados e tecnologias que devem ser enfatizados pelo grupo como um todo.
- Constatação, por parte dos grandes grupos empresariais, de que a equipe de implementação de novos produtos deve se antecipar ao lançamento efetivo destes ao consumo, acumulando experiência prévia que permita vantagens competitivas em relação a seus prováveis competidores. Somente a geração de cenários por meio de uma política de detalhamento do processo de GP viabiliza a melhor orientação de pessoal, prevendo como as atuais tendências efetivamente alterarão o mercado nos próximos anos.
- Quantificação mais organizada, cada vez mais também nas empresas de menor porte, dos impactos fundamentais, sob os resultados do negócio, de uma alocação de recursos planejada mais conscientemente, de forma antecipada. A gestão de portfólios propõe a escolha de projetos que otimizem a alocação de recursos escassos em pesquisa e desenvolvimento, engenharia, operações, marketing, entre outros. Desse modo, possíveis riscos decorrentes de oscilações de demanda podem ser melhor enfrentados, com um ambiente organizacional interno que minimize desperdícios dispendiosos de faturamento.
- Percepção de que a especialização de um negócio em torno de apenas um produto, visando ganhos de escala, não é necessariamente uma estratégia

vencedora a longo-prazo, visto a pulsante dinâmica dos mercados. Tampouco, no entanto, é seguramente eficaz a diversificação extrema da produção. Deve-se, pois, avaliar conscientemente qual é a quantidade ideal de produtos a ser comercializada por uma organização, ou seja, qual o “tamanho” de portfólio a ser oferecido. Balancear a quantidade de produtos em torno da capacidade de recursos é, indubitavelmente, mais facilmente viabilizado por meio de um processo de GP.

Em suma, comprova-se a importância da formalização de uma política de gestão de portfólio, instaurada em um processo de mapeamento, seleção e implementação de alternativas de produtos/soluções tecnológicas. Faz-se válida, neste ponto, portanto, uma definição conceitual sólida que sirva como referência à apresentação das diferentes metodologias utilizadas pelas empresas. Aqui, tomar-se-á como guia Cooper et al (2001), que definem gestão de portfólio como “um processo de decisão dinâmico, onde uma lista de negócios de projetos ativos de novos produtos é constantemente atualizada e revisada. Neste, novos produtos são avaliados, selecionados e priorizados; e recursos são alocados e realocados nos projetos ativos. Este processo de gerenciamento é caracterizado por incertezas e mudanças de informação, oportunidades dinâmicas, múltiplos objetivos e considerações estratégicas, interdependência entre projetos e múltiplos tomadores de decisão e localizações”.

2.5.2 Metodologias para gestão de portfólios

Os primeiros modelos visando a gestão de portfólios surgiram nas décadas de 60 e 70. Na prática, baseavam-se em modelos de otimização através de programação matemática, com o intuito de se escolher projetos a partir da criação de um sistema de restrições e de uma função objetivo (na grande maioria dos casos, a lucratividade). Pode-se perceber, portanto, que o problema de gestão de portfólios era encarado basicamente como uma questão vinculada à pesquisa operacional. Modelos lineares, não lineares, binomiais e inteiros foram desenvolvidos pela academia, sempre enaltecendo o rigor matemático e, consequentemente, apresentando complexidade no tratamento teórico (Jackson, 1983). Esta característica aproximava tais técnicas de GP ao desenvolvimento científico, principalmente na área de exatas. Em contrapartida, também gerava e, ainda gera, mesmo com a evolução no decorrer

dos anos, uma série de empecilhos que dificultam o acesso dos processos de GP ao meio corporativo, como elucidado por Baker (1974):

- Necessidade de criação e monitoramento de grandes bases de dados, com informações sobre resultados financeiros, de alocação de recursos, de tempo de execução e de probabilidade de sucesso para todos os projetos sob análise, em casos próprios realizados anteriormente, ou de outras empresas em contextos análogos. Muitas dessas informações não são disponíveis, tanto pelo ineditismo de algumas iniciativas, quanto pelo sigilo de concorrentes. Mesmo quando se possui acesso, a confiabilidade dos dados é, em muitas vezes, suspeita.
- Ineficiência do tratamento matemático em relação à dinâmica dos mercados no que diz respeito aos riscos e incertezas, que variam segundo uma imensa série de incógnitas, muitas vezes não mapeáveis antes das reais variações de mercado que, na grande maioria dos casos, não seguem padrões pré-definidos.
- Impossibilidade dos métodos tradicionais para lidar com a situação de múltiplos critérios inter-relacionados ou de utilização simultânea de recursos, o que implica em sérias dificuldades de modelagem do problema de otimização tendo em vista à capacitação usual de pessoal no meio organizacional.
- Aversão de alguns líderes de negócio à utilização de sistemas de gerenciamento de portfólios, por não poderem comprehendê-los na totalidade e por assumirem, consequentemente, que estes são incapazes de ser devidamente compartilhados verticalmente nos diversos níveis hierárquicos de uma companhia.

Dessa forma, outros métodos, de cunho mais corporativo, foram desenvolvidos recentemente, visando facilitar a manipulação de ferramentas de seleção de projetos em gestão de portfólios, sem comprometer a efetividade das decisões de negócio. Cooper et al (1999) fazem uma vasta pesquisa nas corporações americanas, segmentando as técnicas mais utilizadas em quatro grandes grupos, são eles:

1. Modelos e índices financeiros: compreendem a classificação de projetos, ranqueando-os uns em relação aos outros a partir da plotagem de estimativas para resultados financeiros como, por exemplo, valor presente (*net present value – NPV*), taxa interna de retorno (*internal rate of return – IRR*), retorno sobre investimento (*return on investment – ROI*) e *payback*. Além de *ranking*,

índices financeiros podem ser utilizados para avaliação de projetos ante um valor-objetivo, que se comporta como requisito mínimo para aceitação em um portfólio. Em geral, a conciliação dessas duas abordagens permite escolhas mais fundamentadas, acarretadas em portfólios de maior desempenho. Outros modelos também bastante disseminados, porém mais sofisticados, envolvem modelos probabilísticos e árvores de decisão como o modelo ECV (*Expected Commercial Value* – valor comercial esperado, definido pela análise do valor presente descontado dos custos de lançamento ao mercado e de desenvolvimento, ponderando as probabilidades de sucesso técnico e comercial). Um último grupo de métodos, destacados por Faulkner (1996), consiste no tratamento de cada estágio de implementação de um projeto como análogo à aquisição de uma opção no mercado financeiro (instrumento que garante a compra ou venda de um ativo num dado momento, a um valor pré-fixado). Para esta analogia, portanto, indaga-se qual o preço de se optar pela existência de um projeto para diferentes períodos pós-implementação.

2. Abordagens estratégicas: consistem em modelos que visam o refinamento da alocação dos recursos disponíveis, garantindo o alinhamento do portfólio à estratégia do negócio. Em geral, isto é feito por meio da segmentação de objetivos em macro-grupos, de acordo com uma taxonomia que seja condizente ao ramo em que o modelo de negócio de uma corporação melhor se enquadra. Os diferentes projetos sob análise são alocados nestes respectivos grupos e, dentro destes, ranqueados por meio de modelos de caráter quantitativo. Na grande maioria dos casos, a criação preliminar destes conjuntos de projetos no processo de GP é altamente benéfica, não só garantindo o alinhamento do foco das empresas, porém também evitando equívocos na inclusão de projetos que, aparentemente, possuem boa resposta financeira, mas que, na realidade, impactam negativamente nos negócios, dificultando a manutenção da sinergia entre áreas corporativas que acabam exigindo ações estratégicas concorrentes.
3. Modelos de pontuação e *check lists*: vastamente utilizados no meio corporativo, os modelos de pontuação consistem na definição de critérios para priorização de projetos em sistemas de pontos (1-5, 1-7, 1-10, entre outros sistemas fundamentados em teorias estatísticas). Os critérios podem variar de acordo com as especificidades de cada negócio. De fato, esta possibilidade de

ampla personalização da análise revela-se como uma enorme vantagem, facilitando a compreensão e consequente adoção deste tipo de metodologia verticalmente e horizontalmente. A Figura 22 apresenta os principais critérios utilizados nas empresas americanas, segundo Cooper et al (1999). Conforme será detalhado no tópico seguinte, uma abordagem específica para a fomentação de sistemas de pontuação se dá pela metodologia de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), vastamente utilizada tanto no contexto acadêmico, quanto corporativo (Saaty, 1987).

No que diz respeito aos *check lists*, estes são ferramentas auxiliares que se baseiam em seqüências de perguntas do tipo sim/não, visando a checagem de requisitos mínimos de desempenho ou até se comportando como sistemas de pontuação simples, em geral, com padrão binário de avaliação (sim – 1; não – 0).

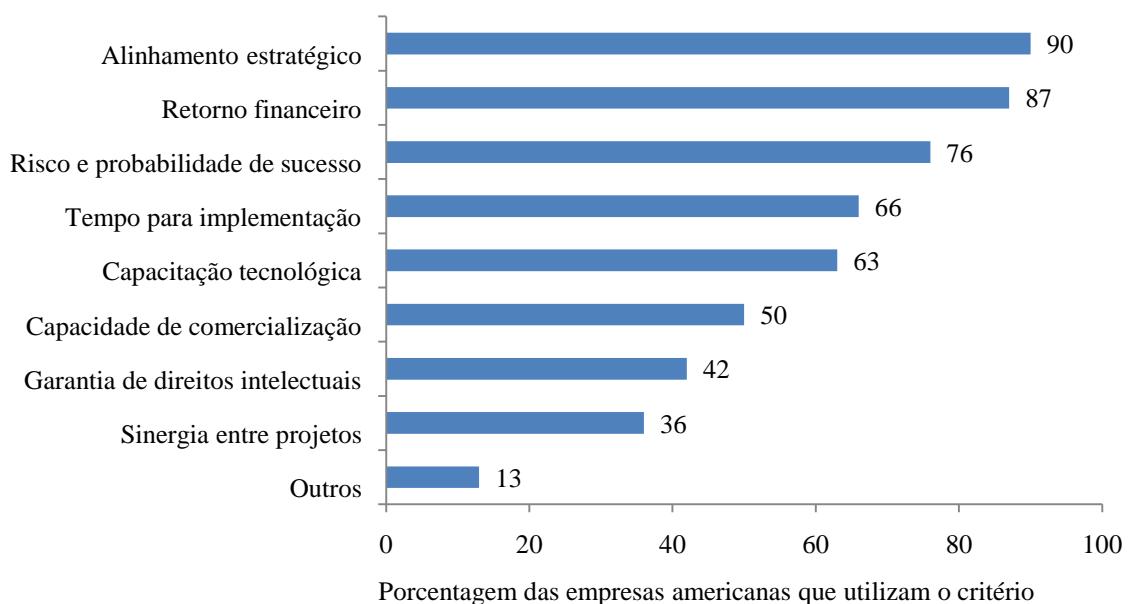


Figura 22 – Critérios mais utilizados pelas corporações americanas em modelos de pontuação para GP

Fonte: Adaptado de Cooper et al (1999)

4. Diagramas de bolha ou mapas de portfólio: consistem em aperfeiçoamentos dos modelos de gerenciamento de portfólios publicados pelo *Boston Consulting Group - BCG* (Matriz BCG – plotagem do crescimento de mercado pela participação relativa neste para cada um dos projetos do portfólio, segmentando-os em “estrelas”, com alto crescimento e participação; “vacas leiteiras”, com baixo crescimento, porém alta participação; “projetos em questionamento”, com alto crescimento, porém baixa participação; e “abacaxis”, projetos a serem descartados, com participação e crescimento baixos), além de metodologias da consultoria *McKinsey*, idealizadas para a resolução rápida da alocação de recursos entre as diferentes unidades de uma corporação. Os diagramas de bolha podem sim delinear a gestão de portfólios, porém, na grande maioria das organizações, são utilizados como ferramentas ilustrativas de suporte. A Figura 23 abaixo apresenta um exemplo ilustrativo, para a análise Risco x Retorno.

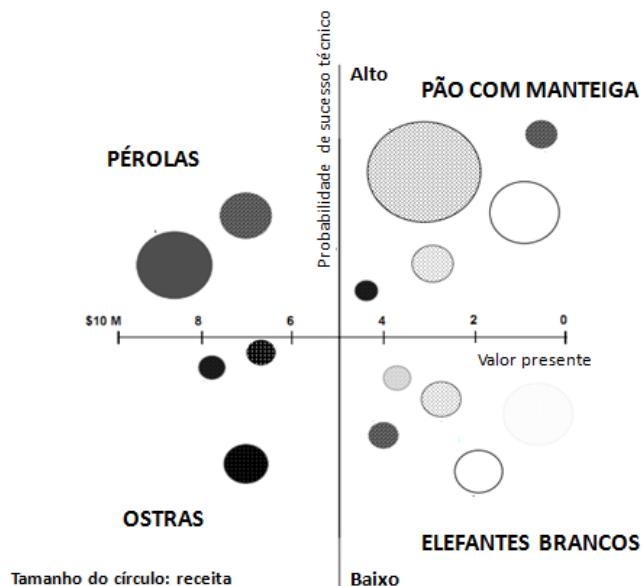


Figura 23 – Exemplo de gráfico-bolha: Risco x Retorno

Fonte: Adaptado de Cooper et al (1999)

Atualmente uma variedade de parâmetros podem ser utilizados como eixos nestes gráficos, dependendo do tipo de informações requeridas pelo modelo de GP em questão. A tabela 3 evidencia algumas das principais variações do diagrama apontadas pela literatura.

Tabela 3 – Diagramas de bolha mais usuais: eixos principais

Tipo de Análise	Eixo horizontal	Eixo vertical
Risco x Retorno	Valor presente, valor de mercado ou taxa interna de retorno	Probabilidade técnica ou comercial de sucesso
Inovação	Grau de disruptão técnica da inovação	Grau de disruptão da inovação no mercado
Custo x Tempo	Custo de implementação	Tempo para início de impactos no mercado
Estratégia x Benefícios	Grau de alinhamento com o direcionamento estratégico	Valor presente ou Alinhamento com as intenções do negócio
Viabilidade x Atratividade	Viabilidade técnica	Atratividade do projeto (crescimento do mercado, maturidade técnica ou quantidade de anos para implementação)

Fonte: Adaptado de Cooper et al (1999)

2.5.3 Analytic Hierarchy Process - AHP

O problema de tomada de decisão em contextos com múltiplos critérios se destaca como um dos temas mais discutidos na academia, com abordagens desenvolvidas para uma grande gama de aplicações, nas mais diversas zonas do conhecimento. Neste trabalho, de cunho fundamentado na engenharia de produção e, mais especificamente, no processo de gestão de portfólio como ferramenta à prospecção tecnológica, detalha-se aqui sobre um método vastamente difundido quando se objetiva a decisão vinculada à priorização de alternativas: o Processo de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), inicialmente idealizado para os problemas de pesquisa operacional, mas que atualmente é metodologia recorrente quando se busca dar subsídio quantitativo à tomada de decisão. Devido à sua fácil utilização, fundamentada em uma estruturação lógica de problemas de forma intuitiva, o uso de modelos AHP se mostra bastante eficaz, principalmente no âmbito do apoio a decisões de caráter complexo, em que muitas variáveis, com interdependências geralmente abstratas, têm importância significativa e que, a princípio, não são mensuráveis quantitativamente.

Com relação aos demais modelos de pontuação com foco na priorização de alternativas, a principal diferença do AHP se dá na necessidade de definição de um arranjo

hierárquico dos fatores que influenciam em uma decisão, em diferentes níveis sucessivos, desde o objetivo maior (meta) até os critérios, subcritérios e alternativas que o compreendem. Como salienta Saaty (1987), esta organização de um problema pode, em alguns casos, se mostrar não trivial, o que requer uma capacidade criativa de abstração que, mesmo parecendo dificultar o procedimento de priorização a princípio, é importante para o alinhamento dos processos de comparação das alternativas em torno de um objetivo comum solidificado. A adoção de um modelo AHP, portanto, tanto facilita a transposição da metodologia do âmbito meramente qualitativo para o quantitativo, quanto aperfeiçoa o conhecimento sobre o contexto de um problema, explicitando suas variáveis. Com estas proposições, a construção de hierarquias deve revelar informações suficientes para (Saaty, 1990):

- representar o problema da forma mais detalhada possível, porém não tão minuciosamente a ponto de se perder a sensibilidade do impacto de mudanças em variáveis sobre a meta principal;
- considerar o ambiente e os atores externos que influenciam nas variáveis do problema;
- identificar os atributos que contribuem para a solução do processo de tomada de decisão;
- identificar os participantes associados diretamente ao problema.

A Figura 24 ilustra uma hierarquia genérica com a intenção de definição de um padrão de apresentação de problemas para aplicação do método AHP.

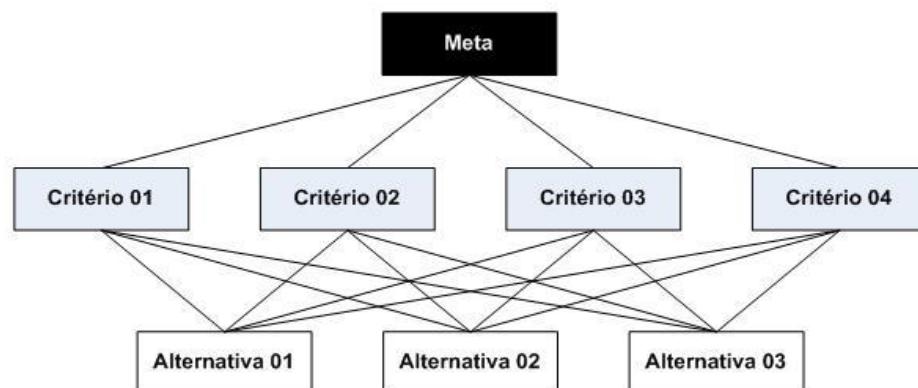


Figura 24 – Exemplo de hierarquia de critérios/objetivos

Fonte: Retirado de Vargas (2010)

A sistemática para avaliação das alternativas inicia-se pelo processo de comparação, par a par, dos módulos do nível estritamente inferior a meta principal. Esta comparação pode se dar tanto pela análise de dados concretos (retorno sobre o investimento, lucro, valor presente líquido, período de retorno, indicadores estratégicos, da relação custo-benefício, de riscos, entre outros) ou por meio de julgamentos humanos (impressões sobre comprometimento, conhecimento, tendências de inovação no mercado, entre outros). Os módulos do mesmo nível são então diretamente confrontados, recebendo pesos relativos à preponderância de um de um sobre o outro. Saaty (1990) propõe a seguinte escala de avaliação:

Tabela 4 – Escala de relativa importância

Escala	Avaliação numérica	Recíproco
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito forte preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

O modelo AHP tem a função de transformar as comparações par a par em valores numéricos, normalizados em uma escala de 0 (zero) a 1 (um), que quantificam a importância de cada um dos módulos em seu nível hierárquico como um todo. Para tanto, constrói-se, primeiramente, uma matriz de comparação que consolida os valores dos módulos em relação à escala de importância relativa (matriz quadrada com quantidade de linhas e de colunas equivalente a quantidade de módulos em comparação). Dessa matriz, obtém-se um vetor de prioridade, a partir das seguintes ações:

- Normalização da matriz inicial, realizada a partir da divisão entre o valor de cada elemento a_{ij} e a soma total de sua respectiva coluna ($\sum a_{ij}$, para j fixado);

- Cálculo da somatória dos elementos de cada linha da matriz normalizada ($\sum a'_{ij}$, para i fixado), cujo resultado representa o valor do vetor de prioridade para o módulo da hierarquia relacionado à respectiva linha. A somatória dos valores dos elementos do vetor de prioridade, relacionados a cada módulo sob análise, sempre totaliza 1 (um), sendo que cada valor pode ser interpretado, em percentagem, como o grau de importância de um módulo em seu respectivo nível hierárquico. No caso do primeiro nível, subjacente ao objetivo maior, o valor do vetor de prioridade indica a participação de cada critério como variável determinante à conquista da meta principal.

O quadro da Figura 25, a seguir, ilustra o procedimento para obtenção do vetor de prioridade em um exemplo numérico hipotético, adaptado de Vargas (2010), esquematizado na Figura 24:

	Critério 01	Critério 02	Critério 03	Critério 04
Critério 01	1	1/5	1/9	1
Critério 02	5	1	1	5
Critério 03	9	1	1	5
Critério 04	1	1/5	1/5	1
Total	16,00	2,40	2,31	12,00
Resultados				
Critério 01	1/16	0,083	0,048	0,083
Critério 02	5/16	0,417	0,433	0,417
Critério 03	9/16	0,417	0,433	0,417
Critério 04	1/16	0,083	0,087	0,083
Cálculo do vetor de prioridade			Vetor de prioridade	
Critério 01	$[0,063+0,083+0,048+0,083]/4 = 0,0693$		0,0693	6,93%
Critério 02	$[0,313+0,417+0,433+0,417]/4 = 0,3946$		0,3946	39,46%
Critério 03	$[0,563+0,417+0,433+0,417]/4 = 0,4571$		0,4571	45,71%
Critério 04	$[0,063+0,083+0,087+0,083]/4 = 0,0789$		0,0789	7,89%

Figura 25 – Matrizes de comparação inicial e normalizada e cálculo do vetor de prioridade: análise de critérios

Fonte: Adaptado de Vargas (2010)

A coerência dos valores obtidos para o vetor de prioridade pode ser validada por meio de um coeficiente, denominado taxa de consistência (CR), proposto por Saaty (1990). De fato, incoerências podem ocorrer em análises multivariadas, de alta complexidade. Por exemplo, se um critério A é priorizado em relação a outro critério B e este mesmo B é priorizado em relação a C, seria inconsistente uma análise na qual C fosse priorizado em relação a A. São situações como esta que podem ser evitadas por meio da avaliação de consistência, estruturada nos seguintes passos:

- Cálculo do valor principal do vetor de prioridade (λ_{Max}), definido a partir da soma entre os produtos do valor do vetor de prioridade e da soma total $\sum a_{ij}$, para j fixado (matriz de comparação inicial), para cada um dos módulos do nível hierárquico;
- Cálculo do índice de consistência (CI), dado pela razão entre a diferença entre o valor principal do vetor de prioridade (λ_{Max}) e a quantidade de módulos (n), e a quantidade de módulos diminuída de uma unidade.
- Cálculo da taxa de consistência (CR), dada pelo quociente entre o índice de consistência (CI) e o valor do índice de consistência aleatória (RI), proposto por Saaty (1990). Se esta taxa for inferior a 10%, a análise de ponderação dos módulos é considerada coerente.

O quadro da Figura 26, a seguir, ilustra o procedimento para obtenção do índice de consistência, para o mesmo exemplo do quadro 25:

	Critério 01	Critério 02	Critério 03	Critério 04
Vetor de prioridade	0,0693	0,3946	0,4571	0,0789
Total $\sum a_{ij}$, para j fixado	16,00	2,40	2,31	12,00
Valor principal de prioridade (λ_{Max})	$[(0,0693 \times 16,00) + (0,3946 \times 2,40) + (0,4571 \times 2,31) + (0,0789 \times 12,00)] = 4,06$			
N	1	2	3	4
RI	0	0	0,56	0,9

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} \approx 0,02 \quad \longrightarrow \quad CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,02}{0,9} \approx 2\% < 10\%$$

Figura 26 – Exemplo de análise de consistência

Fonte: Adaptado de Vargas (2010)

A análise de prioridade parte, então, para os níveis hierárquicos seguintes. Atrelado aos módulos do primeiro nível hierárquico subjacente à meta, pode haver um respectivo segundo nível hierárquico, cuja análise do vetor de prioridade estará estritamente vinculada aos módulos de origem. Em termos práticos, a participação de cada subcritério na composição de um critério é avaliada analogamente a participação de cada critério na composição da meta principal. O quadro da Figura 27 ilustra este procedimento, para o mesmo exemplo dos quadros anteriores:

	Critério 01			Critério 02			Critério 03			Critério 04		
	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03	A 01	A 02	A 03	A 01	A 02	A 03	A 01	A 02	A 03
Alternativa 01	1	3	1/5	1	1/5	1/5	1	7	3	1	5	1/3
Alternativa 02	1/3	1	1/9	5	1	1	1/7	1	1/5	1/5	1	1/7
Alternativa 03	5	9	1	5	1	1	1/3	5	1	3	7	1
Total	6,33	13,00	1,31	11,00	2,20	2,20	1,48	13,00	4,20	4,20	13,00	1,48
Resultados												
Alternativa 01	0,158	0,231	0,153	0,091	0,091	0,091	0,677	0,538	0,714	0,238	0,385	0,226
Alternativa 02	0,053	0,077	0,085	0,455	0,455	0,455	0,097	0,077	0,048	0,048	0,077	0,097
Alternativa 03	0,789	0,692	0,763	0,455	0,455	0,455	0,226	0,385	0,238	0,714	0,538	0,677
Vetores de prioridade												
Alternativa 01	0,1804			0,0909			0,6434			0,2828		
Alternativa 02	0,0714			0,4545			0,0738			0,0738		
Alternativa 03	0,7482			0,4545			0,2828			0,6434		

Figura 27 – Matrizes de comparação e matriz de vetores de prioridade: análise de alternativas

Fonte: Adaptado de Vargas (2010)

Enfim, quando todos os níveis hierárquicos são contemplados pelo procedimento de cálculo do vetor de prioridade e da taxa de consistência, pode-se calcular um vetor de resultados, com somatória de valores totalizando 1 (um), que indica a participação geral de cada módulo do último nível hierárquico na composição da meta principal. Por exemplo, para o caso de uma hierarquia como a da Figura 24, em três níveis, este vetor de resultados é dado pelo produto entre a matriz composta pelos vetores de prioridade de cada alternativa em relação a cada critério e o vetor de prioridade de cada critério em relação à meta principal. Em termos práticos, este vetor final denota a importância de cada alternativa para um dado objetivo principal, sendo assim possível destacar uma ordem de relevância das diferentes alternativas. A Figura 28 ilustra esta última fase de cálculo do modelo AHP:

Vetores de prioridade					
	Critério 01	Critério 02	Critério 03	Critério 04	Vetor de Resultados
Alternativa 01	0,1804	0,0909	0,6434	0,2828	0,3648 36%
Alternativa 02	0,0714	0,4545	0,0738	0,0738	0,2239 22%
Alternativa 03	0,7482	0,4545	0,2828	0,6434	0,4113 41%

Critério 01 0,0693
 Critério 02 0,3946
 Critério 03 0,4571
 Critério 04 0,0789
 Vetor de prioridade

Figura 28 – Cálculo do vetor de resultados finais: priorização de alternativa para a meta principal

Fonte: Adaptado de Vargas (2010)

Parte-se, na próxima seção, para a descrição da metodologia de projeto, fundamentada pelos tópicos correlacionados à Gestão de Portfólio, incluindo-se o método AHP descrito anteriormente.

3. Método

O presente tópico tem o objetivo de apresentar a metodologia aplicada na realização deste trabalho, detalhando cada uma das etapas, com ênfase nos recursos necessários e nos resultados obtidos em cada uma destas.

O processo de geração e de gestão de portfólio que é utilizado neste trabalho é formalizado. Para tanto, ressalta-se o papel delineador da revisão bibliográfica apresentada anteriormente. Como será visto mais adiante, o processo de GP idealizado se baseia, de fato, numa combinação dos diferentes modelos apontados por Cooper et al (1999), com algumas alterações influenciadas pelas características próprias do setor sucroalcooleiro.

Todo o procedimento pode ser conceitualmente segmentado em duas fases gerais:

1. Fase qualitativa: comprehende a criação do portfólio de soluções para substituição do diesel pelo etanol, assim como o modelo geral de priorização de uma dessas soluções, em termos da análise de viabilidade de implementação e da maturidade tecnológica;
2. Fase quantitativa: avalia os impactos econômicos e ambientais da alternativa escolhida na primeira fase, observando como esta influenciará a cadeia de produção do etanol. O enfoque se dá nos veículos e máquinas agrícolas em que a solução atuará na substituição do diesel como fonte energética.

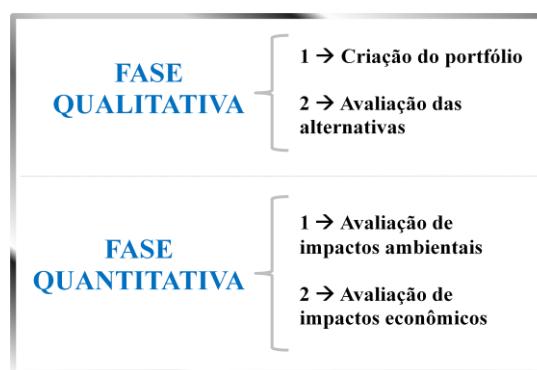


Figura 29 – Fases da metodologia de projeto

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Fase 1. Criação do portfólio

A criação do portfólio de soluções para substituição do diesel pelo etanol envolve um processo de mapeamento e contato com os possíveis desenvolvedores de tecnologia no setor automotivo, para motores, veículos e máquinas agrícolas. Depois, executa-se um procedimento final de consolidação de dados e composição do conjunto de soluções que servirá de input ao processo de gestão de portfólio.

3.1.1 Entrevistas com desenvolvedores

A primeira importante atividade da fase qualitativa de projeto refere-se à aquisição da maior quantidade possível de informações relacionadas às iniciativas para substituição do diesel pelo álcool hidratado na fase agrícola e CCT da produção de etanol. Isto é feito através de entrevistas com funcionários de empresas que desenvolvem projetos relevantes, relacionados à substituição do diesel no setor sucroalcooleiro. Para tanto, faz-se necessário destacar quais são os setores industriais que provavelmente têm interesse em desenvolver este tipo de solução tecnológica. Três grandes grupos caracterizam-se por possuir tais especificações (Joseph, 2006):

- Indústria de veículos: composta por 18 empresas fabricantes, desde automóveis leves até caminhões com grande capacidade de carga, com 25 unidades industriais dispostas no país.
- Indústria de motores: composta por cinco grandes unidades industriais de fabricação de motores, tantos nos casos de ignição por compressão quanto através de centelha.
- Indústria de máquinas agrícolas: composta por seis grandes fabricantes, com 11 unidades de produção localizadas próximo aos principais centros rurais brasileiros, fabricando desde tratores e colheitadeiras até equipamentos menores de auxílio à plantação.



Figura 30 – Exemplos de empresas para mapeamento de soluções tecnológicas

Fonte: Adaptado de Joseph (2006)

De fato, o contato com todas as empresas existentes seria a estratégia ideal de aquisição de informações. Na prática, contudo, a elaboração de entrevistas com funcionários em todas essas corporações demandaria um esforço incompatível com a proposta de cronograma deste trabalho de conclusão de curso, tanto em virtude das dificuldades naturais na obtenção de contatos que tenham conhecimento sobre o tema, quanto por causa de usuais empecilhos de agenda. Almeja-se, dessa forma, elaborar um roteiro de entrevistas que possa ser aplicado a uma quantidade abrangente de desenvolvedores, em espaço de tempo adequado, de maneira a captar as informações necessárias para a composição do portfólio de soluções tecnológicas (vide roteiro – Anexo A).

Os relatos serão primeiramente organizados de forma a sinalizarem um panorama inicial dos tipos de iniciativas que vem sendo estimuladas pelos desenvolvedores. Conforme será explicitado em detalhe no próximo tópico, iniciar-se-á, a partir disso, um trabalho de processamento das informações coletadas, visando a composição de um portfólio uniforme em termos da complexidade das soluções.

3.1.2 Definição do portfólio

A definição do portfólio de soluções tecnológicas provém naturalmente da organização das informações obtidas nos relatos dos desenvolvedores. No entanto, uma série de precauções deve ser tomada para se evitar equívocos na segmentação correta das iniciativas apontadas pelos entrevistados. Para tanto, propõe-se uma atividade específica de

trabalho, visando o processamento das informações obtidas nas entrevistas conforme as seguintes ações delineadoras:

- Certificação da total compreensão das respostas fornecidas, principalmente no que diz respeito a termos técnicos que, mesmo após a revisão bibliográfica, possam ainda ser desconhecidos;
- Contabilização das diferentes soluções tecnológicas descritas pelos desenvolvedores, observando-se minuciosamente o caso de respostas linguisticamente distintas, mas que efetivamente representam uma mesma solução (duplicatas);
- Percepção de respostas que se caracterizam como soluções tecnológicas, mas que na verdade, por serem demasiadamente específicas, retratam apenas detalhamentos de outras soluções já mapeadas. Por outro lado, é importante atentar também para respostas extremamente abrangentes que, na realidade, agregam um conjunto de soluções diversas. Deve-se, portanto, focar a necessidade de alinhamento das diferentes soluções tecnológicas no que diz respeito a seu grau de especificidade, garantindo com que o portfólio seja composto apenas por alternativas que, de fato, possam ser comparadas eficientemente, sem percalços como interdependências ou discrepâncias de nível de abrangência.
- Definição de títulos representativos para cada uma das soluções, buscando eliminar quaisquer possíveis ambigüidades para enfaticamente diferenciá-las.



Figura 31 – Esquematização da forma de apresentação do portfólio de soluções

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, com o conjunto de soluções tecnológicas consolidado, é importante definir a melhor maneira de apresentação do portfólio que facilitará o prosseguimento do processo de

avaliação qualitativa. A disposição linear, conforme ilustrado pela Figura 31, apresenta-se como uma boa saída tendo em vista este propósito.

3.2 Fase 1. Avaliação de alternativas tecnológicas

A avaliação de alternativas tecnológicas, ou seja, o processo de gestão de portfólio de fato, visa a escolha, em parâmetros qualitativos, de uma solução tecnológica que se destaque em termos de viabilidade de implementação e maturidade tecnológica.

Por meio de uma plotagem gráfica, a análise destas duas diferentes dimensões comparativas é realizada, para cada uma das alternativas prospectadas, em um diagrama na qual viabilidade e maturidade se comportam como eixos principais. Observa-se, assim, a necessidade de consolidação de critérios, correlacionados às dimensões explicitadas, para que a análise do portfólio de soluções seja realizada de forma efetiva, dando subsídios à comparação denotada pela visualização gráfica. Após a definição dos critérios, e da posterior avaliação de cada solução, pode-se configurar um diagrama viabilidade X maturidade, permitindo a definição de qual será a alternativa tecnológica focada pela fase quantitativa do projeto.

3.2.1 Definição de critérios e avaliação das alternativas

A etapa de avaliação de alternativas tecnológicas comprehende duas principais atividades: a definição dos critérios que melhor traduzem o parâmetro viabilidade e a determinação do melhor indicador para o eixo de maturidade.

As entrevistas com os desenvolvedores têm papel fundamental nesta etapa. Durante estas conversas poder-se-á obter informações relevantes sobre os aspectos positivos e negativos de cada solução, assim como sobre quais os parâmetros relevantes para o sucesso das mesmas. Em posse destes dados, o autor, com auxílio do orientador deste trabalho, orientará a evolução do modelo de gestão de portfólio em torno das seguintes atividades (esquematização na Figura 32):

- Definição da gama de critérios ambientais e econômicos, julgados relevantes no contexto da indústria sucroalcooleira, que devem ser adotados a fim de se comparar

eficientemente as diferentes iniciativas tecnológicas, do ponto de vista da viabilidade de implementação de cada uma;

- Utilização dos critérios para a consolidação de um modelo AHP que facilite o processo de ponderação qualitativa, e que será desenvolvido da seguinte forma:

- Comparação ponderada de critérios, par a par, atribuindo-se pesos que indiquem a intensidade de relevância de um critério sobre o outro, em escala absoluta;
- Comparação ponderada das soluções do portfólio, para cada um dos critérios definidos, atribuindo-se pesos de forma análoga ao realizado no nível superior, entre os critérios de avaliação;
- Consolidação dos desempenhos das soluções em relação aos diferentes critérios, obtendo uma pontuação de zero a cem por cento, que definirá a posição de cada alternativa no eixo de viabilidade

- Classificação da maturidade tecnológica das soluções, para sua implementação no mercado, em três categorias: Imediato (disponível em menos de um ano), Curto prazo (disponível no intervalo entre um e três anos) e Médio prazo (disponível entre três e cinco anos).

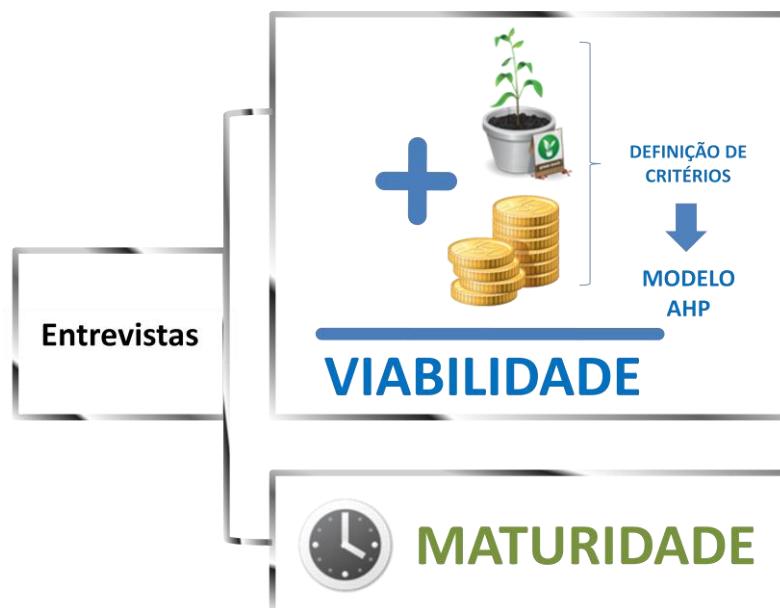


Figura 32 – Esquematização: análise de maturidade e viabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Diagrama de análise de alternativas

A última atividade pertencente à fase qualitativa da metodologia diz respeito à confecção de um diagrama cartesiano “Maturidade *versus* Viabilidade”, conforme ilustrado pela Figura 33. Este gráfico, inspirado nos exemplos de eixos apresentados por Cooper et al (2001), baseia-se na plotagem das diferentes soluções do portfólio em termos tanto da classificação de maturidade tecnológica (eixo de abscissas – Maturidade), quanto da consideração do grau de viabilidade, através do modelo AHP para a ponderação dos critérios ambientais e econômicos elaborados pelo autor (eixo das ordenadas – Viabilidade).

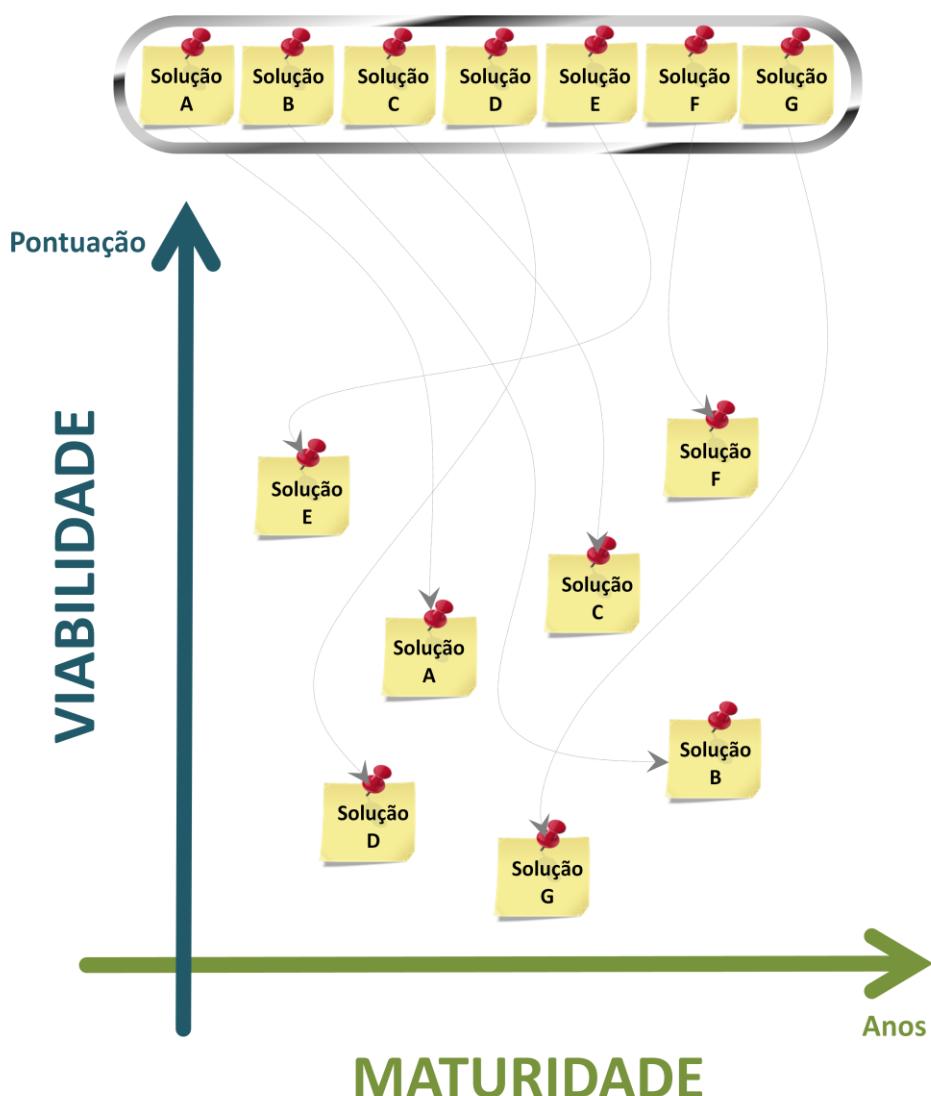


Figura 33 – Esquematização do diagrama Maturidade x Viabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Neste trabalho, espera-se que a forma de visualização anterior facilite constatações importantes como, por exemplo:

- A percepção, observando-se o eixo de maturidade, de quanto tempo será necessário para que haja um número expressivo de soluções de substituição do diesel pelo álcool hidratado, denotando uma provável tendência de substituição de combustíveis fósseis nas fases agrícola e CCT da produção sucroalcooleira.
- Um parecer sobre o planejamento estratégico da indústria relacionada à área de fontes renováveis de energia, observando a viabilidade dos projetos que vêm sendo contemplados com recursos de pesquisa e desenvolvimento no país.

A alocação das soluções do portfólio no diagrama permite, enfim, a priorização de qual será a tecnologia a ser analisada na fase quantitativa da metodologia. Avalia-se qual solução possui, concomitantemente, níveis de maturidade e viabilidade superiores às demais alternativas.

É importante ressaltar a escolha pelo isolamento do critério maturidade em relação aos outros critérios incluídos na aplicação do AHP. Esta forma foi escolhida para que se pudesse enxergar graficamente a distribuição temporal das diversas soluções, e para que se possa avaliar deste modo não somente a alternativa que atualmente apresenta a melhor combinação maturidade e viabilidade, mas também visualizar aquelas que no futuro serão as soluções mais bem posicionadas.

A Figura 34 ilustra, graficamente, como o modelo de diagrama pode ser utilizado para facilitar o processo de priorização do caso-piloto, tendo em vista os argumentos de determinação dos eixos de maturidade e viabilidade aqui expostos.

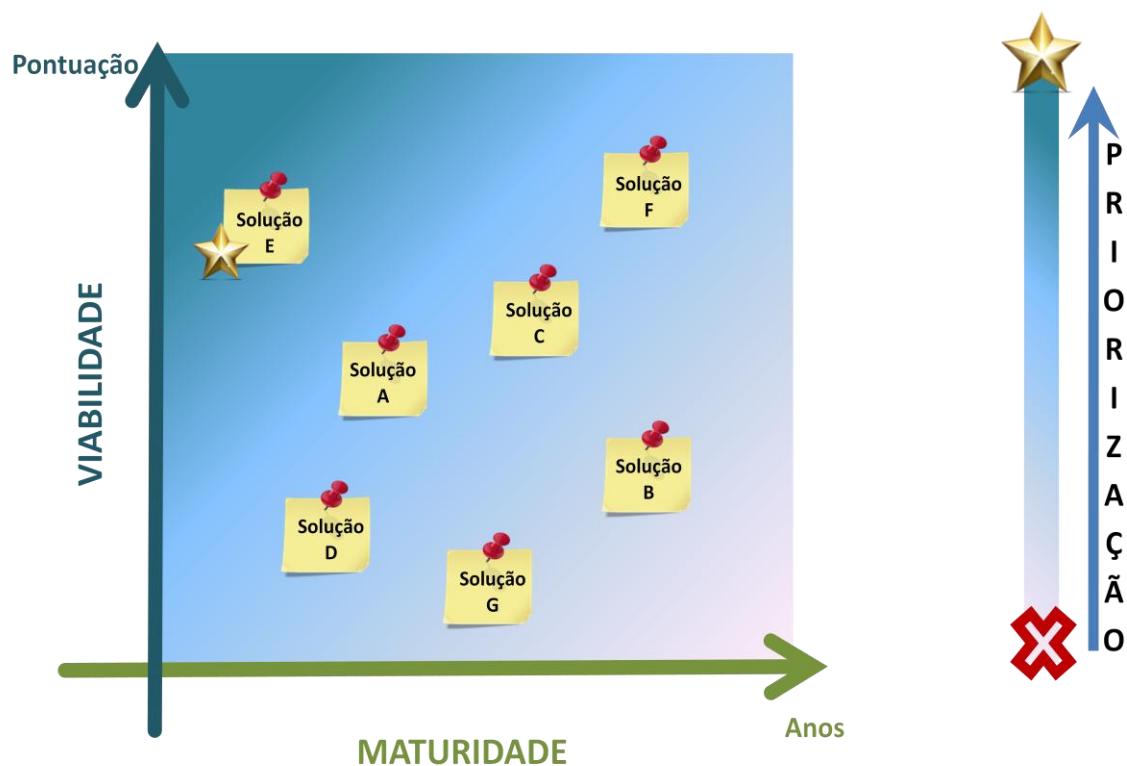


Figura 34 – Esquematização do processo de priorização através do diagrama Viabilidade x Maturidade

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 35, a seguir, consolida a fase qualitativa da metodologia, esquematizando cada uma das etapas explicitadas anteriormente.

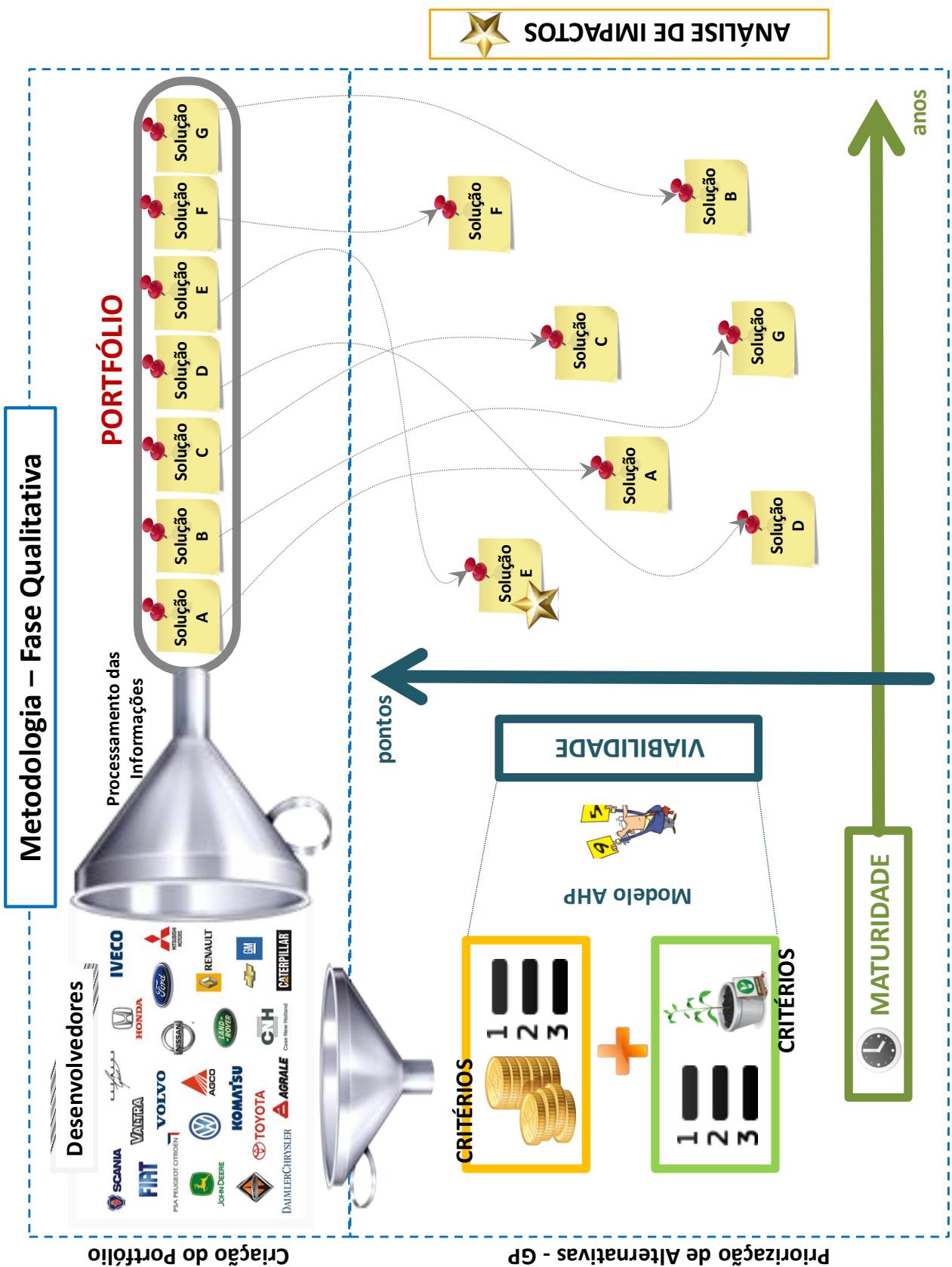


Figura 35 – Esquematização ilustrativa da fase qualitativa da metodologia de projeto

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Fase 2: Metodologia de avaliação de impactos

A fase quantitativa da metodologia de projeto corresponde à avaliação, em linhas gerais, dos impactos ambientais e econômicos que a solução priorizada acarretará nos processos produtivos na indústria sucroalcooleira.

Para tanto, inicialmente, faz-se necessário discretizar quais são os equipamentos que atualmente demandam o consumo de diesel e que, portanto, devem ser o foco das soluções tecnológicas que proponham a substituição deste pelo etanol. O estudo de Macedo et al (2004), já destacado durante a revisão bibliográfica deste trabalho, é referência de dados com tal propósito. Este se baseia em um vasto mapeamento, para o ano de 2002, dos implementos utilizados nas usinas associadas à Copersucar S.A., maior cooperativa brasileira na produção de álcool e açúcar.

As tabelas a seguir resumem os dados obtidos, segmentados de acordo com a proposta dos pesquisadores. A tabela 5 lista os equipamentos considerados no estudo de Macedo et al (2004), bem como os principais índices de capacidade de trabalho e consumo.

Tabela 5 – Lista de equipamentos consumidores de diesel na produção de etanol

Nº	Equipamentos	Pot. cv	Implementos	Cap.Trab. (ha/h)	Consumo (l diesel/h)
1	MF 290	78	Carreta distribuidora de calcário	1,61	6,00
2	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	1,30	27,60
3	CAT D-6	165	Subsolador de 5 hastas	1,00	26,00
4	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	1,35	27,60
5	Valmet 1780	165	Grade leve 48 D x 20"	1,60	15,00
6	MF 680	170	Sulcador adubador duplo	1,10	15,00
7	MF 275	69	Carreta para plantio	0,60	4,00
8	MF 275	69	Cobridor de cana de 2 linhas	1,80	4,80
9	MF 275	69	Bomba de herbicida	2,50	4,00
10	MF 292	104	Cultivador para quebra do meio	1,30	8,00
11	MF 275	69	Aleirador de palha	1,50	4,00
12	Valmet 1580	143	Cultivador tríplice operação	1,30	9,20
13	Valmet 1580	143	Eliminador mecânico de soqueira	1,10	12,20
14	Case A-7700	330	Colhedora de cana combinada	45 t/h	40,40
15	MF 290 RA	78	Carregadora de cana	46 t/h	7,10
16	MB 2318	180	Transp. de cana (truck = 8%)	2,2 km/l	-
17	MB 2325	250	Transp. de cana (RJ = 25%)	1,6 km/l	-
18	Volvo	360	Transp. de cana (trem.rodot. = 67%)	1,2 km/l	-
19	MB 2318	180	Basculante	2,5 km/l	-
20	MB 2213	130	Carroceria transporte de adubo	2,5 km/l	-
21	MB 2318	180	Transporte de vinhaça (truck)	2,2 km/l	-
22	MB 2220	200	Transporte de vinhaça (RJ)	2 km/l	-
23	Volvo	360	Transporte de vinhaça (rodotrem)	1,3 km/l	-
24	Motobomba	120	Aplic. de vinhaça (aspersão/cam. aspersão)	120 m3/h	14,00
25	Valtra BH	180	Reboque de julieta/transbordo	35 t/h	9,00

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

No modelo em questão o consumo de diesel é dividido em três grandes partes: operações agrícolas, colheita e transporte. As tabelas a seguir apresentam os processos envolvidos em cada uma destas etapas, o equipamento utilizado neste processo, a capacidade de trabalho e consumo específico do equipamento, e também a fração da área de plantio em que o processo é aplicado.

As tabelas 6 e 7 se referem aos dados relativos ao preparo de solo e plantio, e ao trato de cana soca, respectivamente. Etapas estas, que compõem a operação agrícola.

Tabela 6 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no preparo de solo e plantio

Nº	Preparo de solo e plantio	Nº Equipe.	Cap.Trab. (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.
1	Aplicação de calcário	1	1,61	3,73	1,00
2	Eliminação mecânica de soqueira	13	1,10	11,09	0,30
3	Eliminação química de soqueira	9	2,50	1,60	0,30
4	Gradagem pesada I	2	1,30	21,23	0,90
5	Subsolagem	3	1,00	26,00	0,70
6	Gradagem pesada II	4	1,35	20,44	0,70
7	Gradagem pesada III	4	1,35	20,44	0,30
8	Gradagem de acabamento	5	1,60	9,38	0,90
9	Sulcação e adubação	6	1,10	13,64	1,00
10	Distribuição de mudas	7	0,60	6,67	1,00
11	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	8	1,80	2,67	1,00
12	Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	1,00
13	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	10	1,30	6,15	0,70

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

Tabela 7 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no trato de cana soca

Nº	Tratos de cana soca	Nº Equip.	Cap.Trab. (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.
1	Aleiramento de palha	11	1,50	2,67	0,25
2	Cultivo tríplice operação	12	1,30	7,08	1,00
3	Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	0,85

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

A tabela 8 apresenta os processos referentes à colheita de cana-de-açúcar.

Tabela 8 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados na colheita

Nº	Colheita	Nº Equip.	Capacidade	Consumo	Fração da área
			operacional (ha/h)	específico (l diesel/ha)	trab.
1	Colhedora Case	14	0,55	74,00	1,00
2	Carregadora Santal	15	0,56	12,70	0,20
3	Reboque de Julieta/Trasbordo	25	0,42	21,20	0,60

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

Por fim, as tabelas 9,10,11,12 e 13, detalham os procedimentos relacionados aos transportes de cana-de-açúcar e outros insumos do processo produtivo sucroalcooleiro. No caso dos equipamentos para transporte (cana-de-açúcar, torta de filtro, adubo e vinhaça), é importante ressaltar a diferença de cálculo para a capacidade de trabalho, não mais vinculada ao tempo de utilização, mas sim à distância em quilômetros percorrida a cada litro de diesel consumido.

Tabela 9 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte de cana-de-açúcar

Nº	Transporte de Cana	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto
			(km/l diesel)	(l diesel/TC.km)	médio (km)
1	Transporte de Cana - Rodotrem	18	1,10	0,0157	40,00

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

Tabela 10 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte de mudas

Nº	Transporte de Mudas	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto
			(km/l diesel)	(l diesel/km)	médio (km/ha)
1	Transporte de Muda - Truck	16	2,30	0,4348	40,00

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

Tabela 11 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados na aplicação da torta de filtro

Nº	Torta de Filtro	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto
			(km/l diesel)	(l diesel/km)	médio (km/ha)
1	Basculante	19	2,50	0,4000	24,00

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

Tabela 12 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte e aplicação de vinhaça

Nº	Vinhaça	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/m3) (m3/h)	Trajeto médio (m3/ha)	Fração da área trab.
1	Transporte de vinhaça (truck)	21	2,20	0,4242	100,00	0,060
2	Transporte de vinhaça (rodotrem)	23	1,30	0,3077	100,00	0,310
3	Aplic. de vinhaça (aspersão)	24	120,00	0,1333	150,00	0,630

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

Tabela 13 – Consumo de diesel: equipamentos utilizados no transporte de adubo

Nº	Adubo	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/km)	Trajeto médio (km/ha)
1	Transporte de adubo	20	2,50	0,4000	4,00

Fonte: Adaptado de Macedo et al (2004)

O primeiro passo da fase quantitativa de projeto é a definição do conjunto de equipamentos que realmente será impactado pela adoção da solução tecnológica priorizada. Tendo em vista que, como já ressaltado pela revisão bibliográfica, algumas das soluções tecnológicas em desenvolvimento nas indústrias não propõem a substituição integral do combustível fóssil nos motores a combustão interna, mas sim o uso de uma mescla entre o diesel, o etanol e outras substâncias como aditivos/cossolventes, faz-se necessário estimar o grau percentual de substituição de diesel, de 0 a 100%, conforme a solução escolhida. A partir disso, pode-se, enfim, quantificar a redução do consumo de diesel que a alternativa escolhida proporcionará.

Observa-se que, dependendo da funcionalidade de cada equipamento, existem diferenças dimensionais no cálculo do consumo de diesel. Em geral, para grande parte do maquinário relacionado às operações agrícolas, à colheita e ao transporte de insumos internamente nos canaviais, faz sentido formular consumo como a relação entre litros de combustível por hora de utilização, para cada máquina. Paralelamente, nos casos dos equipamentos para transporte de cana em trajetos entre unidades, pode-se inferir consumo como a relação entre a quantidade de diesel e a distância percorrida por cada veículo, para cada tonelada transportada.

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, contudo, busca-se padronizar uma só forma de medida de consumo que conteemple todos os implementos sob análise. Propõe-se, dessa forma, adotar como indicador de consumo a razão entre a quantidade de litros de diesel

e a correspondente quantidade, em toneladas, de cana-de-açúcar trabalhada, para cada máquina das diferentes etapas do ciclo produtivo (consumo específico em litros de diesel/tc).

Nos casos das operações agrícolas e de colheita, este valor se refere à razão da relação entre consumo (em litros/hora) e capacidade de trabalho (em hectares/hora), pela produtividade média anual (estimada em 68,7 t/ha.ano por Macedo et al (2004), para o ciclo completo de seis anos).

Para as operações de transporte de cana, o consumo em litros/tc pode ser obtido conhecendo-se a distância média percorrida por cada veículo de transporte, que podem ser obtidas em Macedo et al (2004).

As equações apresentadas a seguir exemplificam a formulação destes cálculos, que podem ser adaptados conforme a dimensão dos dados disponíveis e conforme o tipo de solução tecnológica avaliada.

- Cálculo anual do consumo de diesel por tonelada de cana, conforme os dados obtidos para cada equipamento utilizado nas operações agrícolas e atividades de colheita (exceto colhedora, carregadora, reboque e aplicação de vinhaça):

$$(I) \quad \text{Consumo específico}_{diesel} \left(\frac{l_{diesel}}{tc} \right) = \frac{\text{Consumo} \left(\frac{l_{diesel}}{hora} \right) / \text{Cap. Trab.} \left(\frac{\text{hectares}}{hora} \right)}{\text{Produtividade} \left(\frac{tc}{hectare} \right)}$$

- Cálculo de acordo com os dados obtidos para cada veículo de transporte de cana-de-açúcar:

$$(II) \quad \begin{aligned} \text{Consumo específico}_{diesel} \left(\frac{l_{diesel}}{tc_{transporte}} \right) \\ = \text{Consumo}_{diesel} \left(\frac{l_{diesel}}{km \cdot tc_{transporte}} \right) \cdot \text{Percorso médio (km)} \end{aligned}$$

Enfim, para o conjunto final de resultados obtidos, é confeccionada uma tabela de consolidação de dados que agrupa os valores finais das fases Agrícola e de Transporte (coluna A – Fase; coluna B – Consumo de diesel (l diesel/tc), de acordo com as equações expostas anteriormente; coluna C – Taxa de substituição por etanol, em %; coluna D – Diesel

substituído por etanol (l diesel/tc); coluna E – Consumo adicional de etanol para substituição, tendo em vista as diferenças de eficiência energética entre os combustíveis).

Tabela 14 – Leiaute da tabela de consolidação de dados sobre consumo de diesel

Consumo	Tx de Substituição	Diesel substituído	Consumo adicional de etanol
	(l diesel/TC)	(%)	(l diesel/TC)
Agrícola			
Transporte			

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Etapa de avaliação dos impactos ambientais

A análise de impactos ambientais se dá, essencialmente, pelo cálculo da mitigação da pegada de carbono da produção de etanol, viabilizada pela substituição da queima de diesel pelo consumo de álcool. De fato, o consumo de uma série de formas de energia acarreta em emissões na produção de etanol: a combustão de inputs fósseis, como a gasolina (tipo A e C) e o diesel; as emissões relacionadas a dispêndios de energia na fabricação de equipamentos agrícolas e industriais, além de prédios e instalações fabris; emissões na produção de herbicidas e pesticidas; emissões decorrentes da queima da palha da cana-de-açúcar e do bagaço; liberações de GEE oriundas da manipulação do solo para plantio e colheita; entre outras. Macedo et al (2004) consideram todas essas diferentes fontes de emissões de gases, para o ciclo de vida do etanol desde a viabilização da produção até a queima, estimando uma pegada de carbono correspondente a 33 kg CO₂eq/m³

Na proposta de implementação da solução priorizada, os valores das emissões para cada um dos termos anteriores se mantêm fixos, exceto, logicamente, para o caso do diesel. Desta forma, toda a análise de redução de emissão pode ser feita considerando apenas a variação do consumo de diesel e o rendimento energético da nova solução tecnológica. O cálculo da redução total de emissão de carbono se dará pela comparação das emissões específicas do processo produtivo do etanol com e sem o uso da solução priorizada (equação III). Adota-se a variável PC_i, para medição em quilos de dióxido de carbono equivalente emitidos à atmosfera por litro de combustível consumido. Esta notação é adotada ao invés da representação mais usual, com volume expresso em metros cúbicos, com o intuito de se aproximar, o máximo possível, a abordagem de cálculo de pegada de carbono ao contexto prático da produção.

$$(III) \quad \text{Reducao } PC_{etanol} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) \\ = PC_{etanol_{convencional}} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) - PC_{etanol_{solu\c{c}\ao priorizada}} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right)$$

O valor da pegada de carbono do etanol para o caso convencional será aquele indicado por

Macedo et al (2004) para o etanol hidratado. Para se obter os novos valores de emissão do etanol ($PC_{etanol_{solu\c{c}\ao priorizada}} (Kg\ CO_2eq/l_{etanol})$), considerando-se a alternativa selecionada, deve-se calcular a redução de emissões decorrente do abandono parcial do diesel e a adição de emissões oriunda da utilização do etanol substituidor (equação IV).

$$(IV) \quad PC_{etanol_{solu\c{c}\ao priorizada}} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) = PC_{etanol_{convencional}} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) \\ - PC_{economia\ de\ diesel} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) + PC_{etanol\ substituidor} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right)$$

A parcela correspondente à economia de diesel pode ser calculada pelo produto entre a pegada de carbono desse combustível (implícita no modelo de Macedo et al (2004) como 3,54 Kg CO₂eq/l) e a quantidade de diesel substituída por etanol, por tonelada de cana. O resultado deste produto, dado em Kg CO₂eq/tc pode ser transcrito em um consequente valor em Kg CO₂eq/litros de etanol, considerando-se a produção específica média das usinas brasileiras, em litros etanol/tc (estimada em 91,8 l/tc, de acordo com Macedo et al (2004)). A equação V, a seguir, mostra como essa abordagem de cálculo se traduz em equacionamento.

$$(V) \quad PC_{economia\ de\ diesel} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) \\ = \frac{PC_{diesel} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{diesel}} \right) \times \sum_{equip.} \left(Cons.\ diesel\ substituído \left(\frac{l_{diesel}}{tc} \right) \right)}{Produção\ específica \left(\frac{l_{etanol}}{tc} \right)}$$

A parcela correspondente à adição do etanol substituidor se dá pelo produto entre a pegada de carbono do etanol na nova cadeia de produção (referente ao cenário após a implementação da solução tecnológica priorizada) e a quantidade de etanol adicional, por tonelada de cana, nos diferentes equipamentos. De fato, este segundo fator é derivado da quantidade de diesel substituída, considerando-se a razão entre os rendimentos energéticos da queima de diesel e de etanol. Analogamente à equação V, deve-se transcrever o resultado deste produto, em Kg CO₂eq/tc, para um valor em Kg CO₂eq/litros de etanol, utilizando-se a produção específica média em litros de etanol/tc (equação VI).

$$(VI) \quad PC_{etanol\ substituidor} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right)$$

$$= \frac{PC_{etanol\ solução\ priorizada} \left(\frac{Kg\ CO_2eq}{l_{etanol}} \right) \times \sum_{equip.} \left(Cons.\cdot diesel\ substituído \left(\frac{l_{diesel}}{tc} \right) \right) \times \frac{\eta_{diesel}(kJ/l_{diesel})}{\eta_{etanol}(kJ/l_{etanol})}}{Produção\ específica \left(\frac{l_{etanol}}{tc} \right)}$$

Enfim, a solução da equação IV a partir das parcelas expressas nas equações V e VI, tendo-se como incógnita a pegada de carbono no cenário da solução priorizada, pode ser alcançada através de interações computacionais, ou até mesmo de manipulação algébrica.

Este resultado deve ser então utilizado na equação III, quantificando-se a estimativa de redução de pegada de carbono pela implementação da solução tecnológica priorizada (**Reducao PC_{etanol}**), produto final da etapa de avaliação de impactos ambientais. Parte-se agora para a segunda parte da fase quantitativa do projeto, a avaliação dos impactos econômicos, que é essencial para a determinação da atratividade da solução proposta.

3.3.2 Etapa de avaliação de impactos econômicos

Basicamente, a análise de impactos econômicos enfoca as alterações de custos variáveis decorrentes da substituição do diesel pelo etanol nos diversos equipamentos da cadeia produtiva.

Faz-se necessário, portanto, o cálculo de um coeficiente de economia correspondente a cada litro de diesel substituído, equivalente a diferença entre o preço por litro de aquisição de diesel e o preço por litro de etanol, levando-se em consideração seu rendimento energético. Para os produtores, este preço de aquisição do etanol é o próprio custo de produção por litro, admitindo-se a hipótese bastante provável de que a substituição do diesel não acarretará em variações relevantes no custo por tonelada de cana do processo de fabricação.

De fato, espera-se que o valor do coeficiente descrito seja positivo, para que realmente haja vantagens econômicas na adoção da solução tecnológica priorizada. O equacionamento exposto adiante revela o cálculo da variação de custos variáveis, indicador fundamental para a avaliação de impactos econômicos.

$$(VII) \quad \frac{\text{Coef. de economia (R\$)}}{\text{Substituição de diesel (l)}} = \frac{\text{Preço}_{\text{aquisição}_{\text{diesel}}} - \left(\frac{\text{Custo}_{\text{produção}_{\text{etanol}}}}{\text{l etanol}} \right)}{\text{l diesel}} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{diesel}}(\text{kJ/l}_{\text{diesel}})}{\eta_{\text{etanol}}(\text{kJ/l}_{\text{etanol}})} \right)$$

$$(VII) \quad \text{Variação de custo}_{\text{produção de etanol}} (\text{R\$/tc}) = \frac{\text{Coef. de economia (R\$)}}{\text{Substituição de diesel (l)}} \cdot \text{Quantidade}_{\text{diesel substituído}} (\text{l/tc})$$

Salienta-se, por fim, que a análise deste projeto não tem como objetivo incluir a avaliação de alterações nos custos fixos decorrentes da adoção da solução escolhida, já que estes influenciarão, majoritariamente, apenas os produtores de veículos e máquinas agrícolas. Dessa maneira, pressupõe-se que, analogamente ao ocorrido para o mercado nacional de automóveis bicombustíveis, a solução priorizada para substituição do combustível não acarretará em diferenças substanciais de preços de compra entre o maquinário a diesel e o maquinário a etanol. Reitera-se, assim, a auto-suficiência da análise de custos variáveis no que diz respeito à qualidade dos resultados da avaliação de impactos econômicos.

4. Mapeamento e avaliação de alternativas

O presente capítulo descreve o processo de aplicação do método descrito no tópico anterior, bem como os principais resultados obtidos na fase qualitativa do Método (Fase 1), e é dividido em 3 seções: Entrevistas, Definição do portfólio e Avaliação das alternativas.

A primeira etapa da fase qualitativa consistiu na realização de entrevistas com participantes de indústrias, que desenvolvem ou estudam alternativas para a substituição do diesel pelo etanol em motores pesados. Os relatos coletados definem a principal fonte de informação e dados para a construção do portfólio de alternativas tecnológicas.

Em seguida, após a compilação dos dados obtidos nas entrevistas, além do levantamento de informações complementares, foi definido um grupo de quatro soluções que se mostraram as mais relevantes, compondo, desta forma, o portfólio a ser avaliado.

Por fim, através do método de gestão de portfólio descrito no Capítulo 3, estas alternativas são comparadas e avaliadas, para que se alcance àquela que concomitantemente se apresenta como a mais viável e mais madura tecnologicamente.

4.1 Entrevistas

O processo de realização de entrevistas durou cerca de quarenta dias e foi conduzido da seguinte forma:

- Levantamento das empresas relevantes para os objetivos do trabalho;
- Obtenção do contato dos responsáveis pelo setor em estudo, dentro das empresas levantadas;
- Realização do contato e agendamento de entrevistas com as empresas interessadas (Anexo B);
- Realização das entrevistas seguindo o roteiro descrito no Anexo A;

Ao todo foram contatadas dez empresas, que juntas representavam o universo de potenciais desenvolvedores de soluções para a substituição do diesel por etanol em motores pesados. Dentre estas companhias se incluíam empresas de autopeças, montadoras de caminhão, fabricantes de máquinas agrícolas, fabricantes de motores e produtoras de etanol.

De todos os contatos feitos, obteve-se um grupo de quatro empresas que concordaram colaborar com informações neste estudo. Por motivos de confidencialidade, estas serão descritas, neste relatório, pelos termos genéricos: Empresa A, Empresa B, Empresa C e Empresa D. Os detalhes das entrevistas com cada uma das participantes são descritos abaixo:

- Empresa A: Fabricante de autopeças que desenvolve projetos na área de etanol, tanto para substituição da gasolina como de diesel. A entrevista foi realizada com um dos engenheiros responsáveis por esta iniciativa na companhia, e foi conduzida por telefone. A Empresa A está ativamente engajada em uma solução para a substituição do diesel pelo etanol, tendo inclusive publicado artigos científicos a cerca dos resultados obtidos em seus estudos e testes.

Na entrevista com a Empresa A pôde-se coletar informações detalhadas, como artigos acadêmicos e dados de desempenho, sobre a solução que atualmente está sendo desenvolvida pela fabricante. Pôde-se também obter relatos a respeito de outras possíveis soluções que têm sido discutidas na indústria, além da opinião pessoal do engenheiro entrevistado sobre todas estas.

- Empresa B: Montadora de caminhões que atualmente desenvolve parcerias e alternativas estratégicas para se inserir neste novo mercado. Participaram da entrevista o gerente geral de motores pequenos e médios, o gerente geral de motores pesados e um engenheiro da área de planejamento estratégico. A reunião foi feita na unidade industrial da empresa.

Durante a conversa os executivos da montadora expuseram as diferentes iniciativas que já haviam sido estudadas e avaliadas por eles. Citaram também quais são, na opinião deles, os critérios e aspectos mais relevantes na comparação das diversas soluções.

- Empresa C: Fabricante de motores que estuda e faz testes preliminares, visando a adaptação dos motores pesados produzidos pela empresa, para que estes possam utilizar também o etanol como fonte de combustível. A entrevista foi realizada com o engenheiro responsável pela área de combustíveis alternativos, e foi conduzida pessoalmente na unidade industrial da empresa.

Na reunião o engenheiro descreveu quais soluções têm sido estudadas pela fabricante, forneceu dados aproximados de desempenho, e compartilhou sua opinião sobre outras prováveis alternativas consideradas pela indústria.

- Empresa D: Montadora de caminhões que atualmente estuda e conhece os diversos desenvolvimentos no setor, mas que ainda não possui investimentos significativos em nenhuma solução específica. Participaram da entrevista, que se deu por conferência telefônica, engenheiros dos departamentos de motores e transmissão, e de combustíveis e lubrificantes, além de uma representante da assessoria de imprensa da companhia.

Durante a conversa, como a montadora não desenvolve nenhum projeto em particular, o foco foi obter a percepção dos engenheiros sobre as soluções mais conhecidas, bem como investigar a existência de alguma alternativa ainda não apresentada. Pôde-se também entender quais são, na opinião dos entrevistados, os critérios mais relevantes para a comparação das diversas soluções.

Ao final das quatro entrevistas descritas acima, partiu-se para a fase de consolidação de informações e composição do portfólio de soluções. Para tanto foram utilizados os dados obtidos nas reuniões, bem como os materiais e textos encaminhados pelos entrevistados.

O portfólio final obtido consiste de quatro soluções tecnológicas que possibilitam a substituição, parcial ou total, do diesel por produtos derivados da cana-de-açúcar. Soluções estas que serão apresentadas em detalhes no próximo tópico.

4.2 Definição do portfólio

Os relatos obtidos nas entrevistas apontam para quatro diferentes soluções tecnológicas. Conforme descrito pelos entrevistados, estas soluções já vêm alcançando destaque nas discussões de usineiros e desenvolvedores, que agora, diante da realização de testes laboratoriais e de campo com resultados bastante animadores, passaram a considerar atrativa a possibilidade de substituição do diesel no maquinário utilizado nas fases agrícola e de transporte do etanol.

De fato, a evolução gradativa da pesquisa, tanto na academia quanto nas corporações, alcança um novo patamar de amadurecimento, mais sofisticado: as soluções atuais em teste muitas vezes já superam, em termos de desempenho, custos e emissões, aos motores a diesel tradicionais. Os investimentos no fomento a estes desenvolvimentos seguem numa ascendente, cada vez mais estimulados por parcerias entre empresas de diferentes setores e, em alguns casos, pelo apoio governamental. As aparições de estudos sobre estas quatro possibilidades nos veículos de comunicação tornam-se também freqüentes, principalmente nos meios especializados. De fato, a substituição do diesel por um produto derivado da cana-de-açúcar, na visão dos entrevistados, consolida-se como uma forte tendência do setor para os próximos anos.

O quadro a seguir apresenta as quatro soluções do portfólio, apresentando-as em linhas gerais. Nos tópicos posteriores, cada uma destas alternativas será descrita em maiores detalhes.

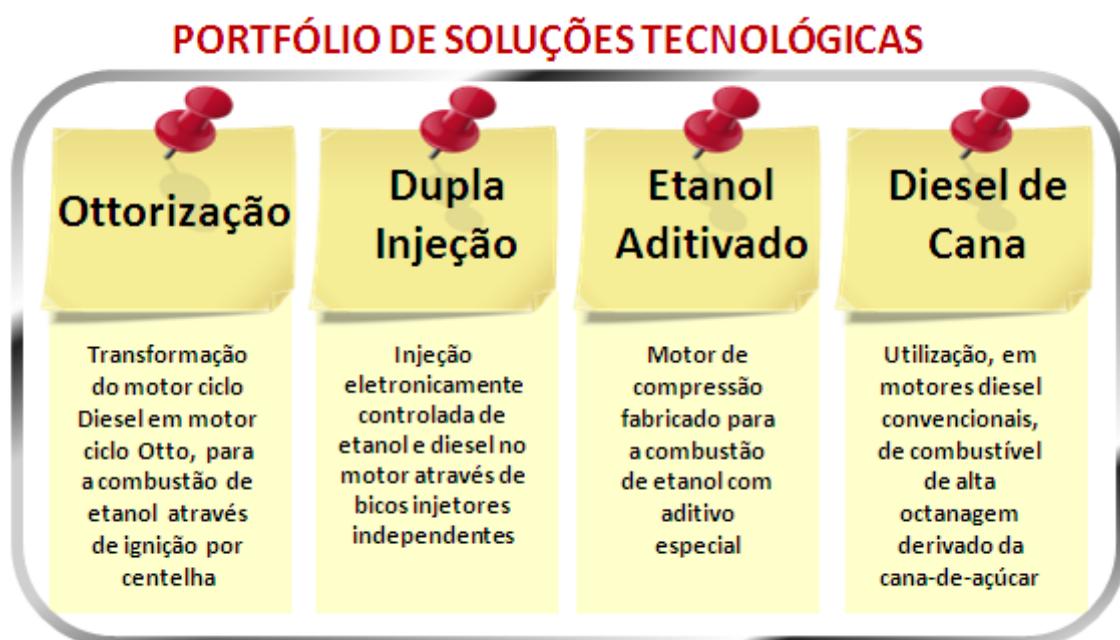


Figura 36 – Consolidação do portfólio de soluções tecnológicas

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1 Ottorização

O processo de adaptação mecânica de componentes de motores ciclo Diesel com o objetivo de viabilização do acionamento da combustão por centelha, conhecido popularmente como Ottorização, é uma alternativa de troca do diesel pelo etanol já relativamente difundida dentre alguns agentes da cadeia sucroenergética, em especial os usineiros. Há algum tempo, desde as primeiras experimentações realizadas em 1982, na Usina Quatá do Grupo Zillo Lorenzetti, o costume de improvisação técnica dos motores diesel vindos de fábrica instaurou-se gradativamente nos canaviais. Sem o apoio das empresas fabricantes de motores, desinteressadas na pesquisa de soluções específicas para a aparente baixa demanda do setor, os desenvolvimentos do processo de Ottorização sujeitaram-se a tentativas pontuais, sem grande respaldo técnico, com foco exclusivo na minimização de custos propiciada pela diferença entre o preço de mercado do diesel e o preço de custo do etanol. Em muitos casos, no entanto, estas soluções acarretavam em efeitos colaterais indesejáveis, tanto para o próprio usineiro, como, por exemplo, no caso do aumento de custos periódicos de manutenção dos motores e sistemas correlacionados, quanto para a sociedade, no que diz respeito ao excesso de emissões de GEE decorrentes do uso de equipamentos com regulagem comprometida.

O crescimento vertiginoso do setor sucroalcooleiro na era dos veículos bicompostíveis, exaltado pela tendência contemporânea de direcionamento corporativo em torno de ações sustentáveis, acarretou em mudanças significativas de posicionamento dos fabricantes em relação à Ottorização de motores para utilização do etanol como fonte combustível. Atualmente, observa-se um novo cenário de desenvolvimento, caracterizado por parcerias entre fabricantes de motores e usineiros, cujos estudos técnicos e testes de campo são acompanhados pelo grupo de mecanização da lavoura canavieira (GMEC). Este grupo, sem fins lucrativos ou políticos, reúne representantes de empresas e técnicos da área de motomecanização do setor, tendo a responsabilidade de noticiar formalmente os diferentes temas tecnológicos que afloram como tendências da indústria. Em relação às alternativas de construção de motores diesel acionados a álcool hidratado, quatro protótipos vêm sido monitorados: dois em zonas agrícolas do interior paulista, dois localizados em zonas canavieiras do estado da Paraíba.

Tecnicamente, devido à baixa octanagem, o etanol não tem a capacidade de combustão espontânea em motores a diesel atuando nas taxas de compressão tradicional (14:1 a 28:1). A queima do etanol deve ser, portanto, proporcionada por um estimulador, em geral, uma centelha acionadora, como ocorre nos motores ciclo Otto. Este tipo de ignição anterior à

compressão acarreta na necessidade de redução da relação volumétrica entre o cilindro e câmara do motor, o que culmina na diminuição da taxa de compressão do combustível (para valores entre 8:1 a 14:1).

Ottorizar um motor diesel baseia-se, portanto, na adição de um sistema de ignição conciliada à transformação mecânica de componentes para redução da taxa de compressão. Em geral, nos protótipos testados, estas alterações são realizadas por dois procedimentos:

- escavação das cabeças dos êmbolos compressores para obtenção de valores de taxa de compressão na faixa entre 10,5:1 e 12:1;
- usinagem dos orifícios dos bicos injetores de combustível para fixação da vela de ignição convencional de sistemas Otto.

Para a realização destas duas modificações nas usinas, os motores diesel convencionais necessitam ser parcialmente desmontados. Este processo pode se tornar relativamente complexo, principalmente se operacionalizado por mão-de-obra não especializada, o que certamente pode comprometer a eficiência da combustão, em especial nas máquinas mais pesadas e com maior variabilidade de carga no motor.

No entanto, o problema central verificado no processo de Ottorização não diz respeito ao processo de desmontagem e remontagem, mas sim à própria natureza dos subsistemas diesel, que não são conceitualmente projetados para trabalhar nas altas rotações possibilitadas pelo ciclo termodinâmico Otto. Em geral, dependendo de cada exemplar, estes componentes são demasiadamente pesados para garantir a efetividade mecânica observada em subsistemas análogos nos motores de ignição por centelha. Complexa e relativamente dispendiosa, a preparação de parte destes componentes para níveis de rotação mais elevados exige maiores esforços no processo de Ottorização. Contudo, segundo os resultados atuais já disponibilizados, os motores ottorizados em teste já conseguem obter níveis de relação entre potência e torque bastante similares aos motores diesel tradicionais, mesmo com ligeiras variações de rotação.

Do ponto de vista operacional, a Ottorização revela uma vantagem interessante: a redução bastante expressiva dos níveis de ruído emitidos pelos motores remodelados, especialmente no caso dos equipamentos com maior tempo de uso. Outros benefícios significativos dizem respeito ao aumento da eficiência térmica da produção, além da menor poluição por óxido de nitrogênio e menor emissão de fumaça.

4.2.2 *Dupla Injeção*

O processo de dupla injeção de diesel e etanol em motores do ciclo diesel vem sendo desenvolvido por diversas instituições, tanto acadêmicas quanto corporativas, com diferentes abordagens técnicas. Inicialmente, os estudos enfocavam desde a injeção direta de misturas diesel-etanol na câmara de compressão, até a criação de sistemas de controle mecânico da fumigação de etanol ao diesel, os dois combustíveis sendo injetados pelo mesmo orifício, ou seja, pelo mesmo bico injetor.

Estas soluções, no entanto, geralmente não agradavam as expectativas prévias dos projetistas, ora revelando problemas no aumento de emissões, ora acarretando em quedas significativas de potência e de torque. Eram bastante recorrentes problemas a respeito do desgaste prematuro de diversos componentes, sobretudo nas bombas rotativas lubrificadas pelo diesel, ocasionando, alguns casos, a falha total de equipamentos. Isto ocorria, basicamente, tanto pela incompatibilidade de materiais, visto a utilização de etanol, com propriedades ligeiramente mais corrosivas, quanto por problemas constantes de cavitação dos injetores modificados. Este conjunto de empecilhos direcionava as pesquisas para alternativas extremamente complexas do ponto de vista técnico, exigindo alterações drásticas dos motores, além de projetos de sistemas de injeção não-convencionais. O campo de estudos em sistemas de dupla injeção necessitava, portanto, de uma mudança de paradigma na concepção de projetos.

Uma solução atual consiste em um sistema de dupla injeção baseado na fumigação de etanol no coletor de admissão, com ignição da mistura diesel-etanol feita pela injeção direta do diesel. A grande diferença desta alternativa em relação aos desenvolvimentos anteriores se dá na concepção de um sistema no qual a injeção de combustível é realizada não por apenas um, mas sim por vários bicos injetores, um para diesel e os demais para fumigação de etanol, controlados eletronicamente. Prioriza-se o sincronismo entre injeções para que o óleo diesel tenha exclusivamente a função de facilitador da ignição, ficando a cargo do etanol o papel de principal fonte combustível. O controle eletrônico operacionalizado por duas unidades de processamento, uma para cada combustível, é capaz de analisar uma enorme gama de parâmetros, garantindo uma maior acurácia do procedimento de injeção. Esta precisão da proporção diesel-etanol no instante da compressão acarreta na maior eficiência termodinâmica do sistema, com efeitos positivos em termos da emissão de óxidos de nitrogênio, enxofre, fumaça e fuligem.

O projeto deste sistema é conduzido por uma das empresas entrevistadas, tendo o escopo pautado pelo objetivo central de maximizar a substituição de diesel, sujeito à manutenção do desempenho do motor diesel original. Reitera-se, portanto, que tanto na concepção, quanto na condução dos testes, a intenção dos projetistas é maximizar a similaridade entre o motor diesel original e o novo motor diesel-etanol. Para tanto, são utilizados, na sua grande maioria, componentes disponíveis de outras aplicações, ou seja, cuja produção em série já é realizada para outros produtos. Alguns exemplos são:

- o conjunto (*rail*) de injetores fumigadores de etanol;
- borboleta, para controle da injeção de ar;
- sensor *lambda*, para controle da quantidade de combustível a ser enviada ao motor, a partir da análise da quantidade de gás oxigênio contida nos gases de escape;
- sensor *knock*, para análise do *knocking* entre cilindro e câmara de compressão;
- ECU para bicombustíveis, para o comando eletrônico, em fase de aperfeiçoamento para sistemas diesel-etanol, derivado de um protótipo desenvolvido para um motor híbrido movido a diesel ou gás natural comprimido.

Com estes novos componentes, o processo de combustão da mistura diesel-etanol, para este sistema mais recente de dupla injeção, pode ser segmentado nas seguintes etapas:

- Ciclo de indução: compreende a injeção de etanol no distribuidor de ar e a penetração do combustível na câmara de combustão através da válvula de entrada;
- Ciclo de compressão: compreende a vaporização do etanol, para homogeneização da mistura entre ar e combustível;
- Ciclo de combustão: início da injeção controlada de diesel para garantir a combustão espontânea da mistura e evitar o contato abrupto entre cilindro e a câmara de combustão (efeito de *knocking*);
- Ciclo de exaustão: eliminação do sistema dos resíduos gerados pela queima da mistura.

A Figura 37, a seguir, esquematiza a configuração do protótipo projetado:

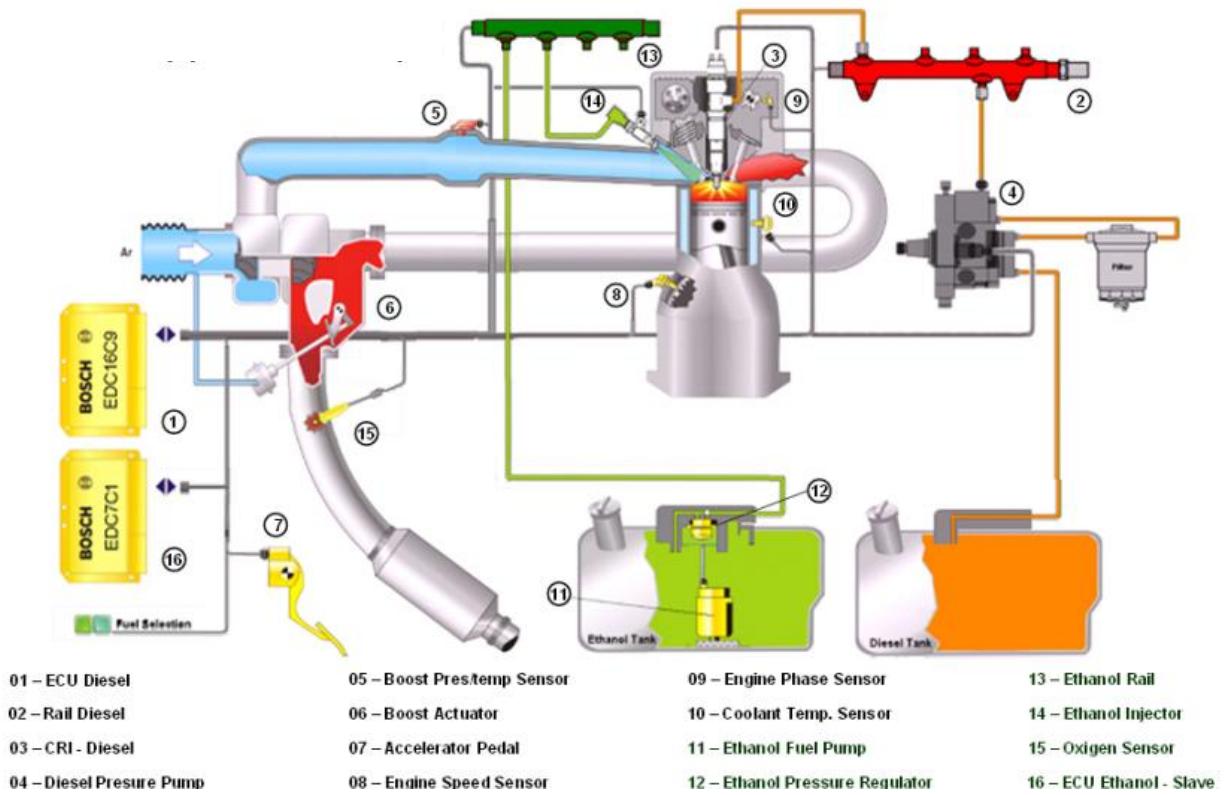


Figura 37 – Esquematização do protótipo de dupla injeção

Fonte: Salles et al, 2010

O principal desafio enfrentado pelos projetistas nesta solução de dupla injeção refere-se ao controle do sincronismo entre as injeções dos combustíveis, ou seja, a quantificação precisa do tempo entre a ação de inserção do etanol no ciclo de indução e de adição do diesel no ciclo de combustão. Algumas considerações técnicas são relevantes na evolução do projeto em torno deste objetivo:

- Com o intuito de melhor dispersão da fumigação, decidiu-se pelo reposicionamento dos bicos injetores de etanol, anteriormente dispostos em torno das válvulas de indução do coletor de admissão, de forma com que spray combustível penetrasse este coletor com a direção uniforme, facilitando o fluxo de todas as gotículas combustíveis para a câmara de combustão. Dessa forma, o tempo de escoamento fluido da mistura etanol-ar possui estimativa mais precisa.

- Inclusão de dispositivos eletrônicos para medição e envio de sinais com informações a respeito da velocidade, fase e aceleração do motor, além de dados sobre a pressão de turbocompressão, enviados para ambas as unidades de controle eletrônico da injeção de etanol e diesel.

- Estabelecimento de uma configuração eletrônica para controle que garantisse a emissão simultânea de sinais informativos de pressão, temperatura e torque para ambas as unidades de controle, utilizando-se ferramentas de monitoramento e calibração básica de grandezas do motor, sem comunicação entre ECU Diesel e ECU Etanol.

Após a consolidação do sistema de sincronização das injetoras, os projetistas prosseguiram com o desenvolvimento da solução partindo tanto para a investigação de parâmetros através tanto da realização de experimentações laboratoriais de bancada, quanto para posteriores testes de campo. Algumas medidas foram tomadas para se garantir à confiabilidade e, principalmente, a comparabilidade dos resultados da alternativa diesel-etanol em relação ao ciclo diesel tradicional. Por exemplo, foram realizadas adaptações somente a partir de um motor diesel comum, nove litros, com potência de 280 kW e torque de 1500 Nm. Além disso, a extração de resultados dos testes de bancada foi feita majoritariamente a partir de dinamômetro, sem cálculos de equivalência ou aproximações. O principal objetivo da calibração diesel-etanol, seguindo o delineamento do escopo de projeto, foi de manter as mesmas curvas de potência e de torque do motor diesel original, observando os resultados comparativos de consumo específico de combustível, de emissão de óxidos de nitrogênio, de emissão de fumaça e de nível de ruído. Foram feitas análises importantes, tanto de verificação das possíveis taxas de substituição de diesel por etanol para diferentes cargas impostas ao motor, quanto de estimativa das vantagens de custo para aplicação da solução de dupla injeção para produtores sucroalcooleiros. A seguir, breves comentários sobre os principais resultados:

- Consumo específico de combustível: o sistema diesel-etanol tem consumo em média 15% maior do que o sistema original, principalmente em razão da baixa densidade energética do etanol, 40% abaixo em relação ao diesel.

- Óxido de nitrogênio (NOx): a mistura diesel-etanol teve importantes efeitos positivos na redução dos níveis de emissão de óxido de nitrogênio, que podem ser explicados pela quantidade de água contida no etanol hidratado e pela menor temperatura de combustão e exaustão de gases de escape vinculada ao maior calor latente do etanol se comparado ao diesel.

- Fumaça: há potencial para redução de emissão de fumaça na combustão da mistura diesel-etanol, explicável, dentre outras razões, pela menor quantidade de carbono na estrutura molecular do etanol.

- Ruído: o nível de ruído é reduzido expressivamente em baixas rotações, principalmente pela diferenciação de aplicação da pressão de combustão.

- Quantidade de diesel substituída: observa-se uma tendência de aumento da taxa de substituição de diesel conforme a redução da rotação e o aumento da carga aplicada ao motor (de 12% a 57% de diesel substituído, sem a ocorrência de efeito *knocking*). Os testes mais atuais, menos conservadores, apontam para índices de substituição ainda mais expressivos, com resultados em torno de 75% de substituição.

- Custo no setor sucroalcooleiro: as vantagens são bastante significativas, quanto maior a utilização do etanol, ou seja, principalmente para as máquinas que mantém operações com alta carga e baixa rotação.

Em suma, a maturidade tecnológica da alternativa de dupla injeção é um ponto bastante forte, visto os bons resultados encontrados nos testes realizados. Muitos atrativos revelam-se interessantes do ponto de vista do produtor sucroalcooleiro: a garantia da boa estabilidade da combustão, a capacidade de variação da taxa de substituição de diesel para minimização de custos, e, por fim, o desempenho equivalente ao sistema diesel original em termos de torque e potência.

4.2.3 Etanol aditivado

A busca por aditivos que viabilizem a combustão espontânea do etanol por compressão sempre se destacou como uma das linhas de pesquisa no desenvolvimento de soluções para a substituição de diesel em motores pesados. Basicamente, o grande foco se dá na busca por substâncias capazes de aumentar as propriedades cetânicas do álcool hidratado, viabilizando a condição de auto-ignição da mistura em taxas de compressão típicas dos motores diesel convencionais. Este conjunto de aditivos é composto, em sua maioria, por uma combinação de nitratos, peróxidos e nitritos. Em geral, estas substâncias requerem, principalmente por causa das características físico-químicas dos nitratos, manipulação extremamente complexa, pois exalam com facilidade vapores tóxicos, nocivos à saúde humana, com efeitos vasodilatadores bastante agressivos.

No entanto, mais recentemente, uma nova geração de aditivos sem nitratos foi desenvolvida, com grandes avanços em termos das possibilidades de manipulação, devido à menor capacidade de danos à saúde e maior facilidade de prevenção dos riscos de transporte.

Estes novos produtos baseiam-se na utilização de uma substância química denominada polietilenoglicol (conhecida popularmente, na área de farmacologia, pela sigla PEG), sintetizada a partir da reação de polimerização do etilenoglicol. Apesar de ter menor efeito no aumento da octanagem do etanol se comparada às alternativas com nitratos, o PEG, além das vantagens de manipulação, tem propriedades lubrificantes interessantes para seu uso em sistemas de injeção. Mesmo tendo efeitos tóxicos bem mais brandos, é importante salientar que essa substância, no Brasil, também tem o uso controlado por medidas de segurança governamentais, já que é extremamente inflamável. A mistura de PEG ao etanol exige um processo químico-industrial especializado, que é realizado globalmente por apenas uma empresa, na Suécia, na produção de uma mistura com álcool hidratado. Em virtude das restrições de segurança, o polietilenoglicol é transportado ao Brasil diluído, no próprio etanol, a 50% da proporção real de operação, encarecendo significativamente os custos de importação.

A razão da produção da mistura etanol-PEG ocorrer na Suécia não é casual. A empresa que desenvolve os motores movidos ao etanol aditivado é originária deste país, prospectando soluções sustentáveis para substituição do diesel na frota de ônibus sueca desde 1980. O objetivo da empresa, àquela época, era de se posicionar como organização pioneira na busca por soluções industriais que viabilizassem a sustentabilidade ecológica a médio e longo prazo, com produtos em acordo com as novas regras da regulamentação de emissões proposta pelos órgãos ambientais da União Européia. Já na terceira geração de motores, a empresa segue os padrões impostos recentemente pelo conjunto de normas Euro 5, com novos padrões para a emissão de poluentes na atmosfera a partir de 2009.

Seiscentos ônibus municipais fabricados pela companhia estão em circulação em cidades como a capital Estocolmo, movidos a uma mistura entre o etanol brasileiro e o PEG sueco. Mais recentemente, um projeto global de disseminação desta solução tecnológica foi iniciado: o projeto BEST (*BioEthanol for Sustainable Transportation* – Bio-etanol para transporte sustentável) envolve testes com ônibus coletivos em nove cidades do mundo, inclusive São Paulo, única cidade participante na América. Um grande conglomerado de empresas parceiras, com apoio do governo municipal, uniu esforços para implementar o projeto no Brasil, vigente desde Outubro de 2007, com a importação de motores da fabricante sueca e construção dos ônibus por montadora brasileira.

Tecnicamente, a adaptação do motor ciclo diesel para o uso do etanol aditivado exige algumas modificações. A principal diferença se dá na necessidade de alteração geométrica do

pistão, para aumento expressivo da taxa de compressão de 17:1 para 28:1. Esta alteração baseia-se no projeto de pistões com menor “volume morto”, ou seja, com menor volume entre cilindro e câmara de compressão, para que a pressão neste espaço seja potencializada. Na taxa de 28:1, a temperatura na câmara alcança 360°C, o que viabiliza a ignição por compressão do etanol aditivado, mesmo com octanagem ainda cinco vezes inferior ao diesel convencional. Outras alterações mecânicas são necessárias tanto para os bicos injetores, que devem possuir maior capacidade volumétrica para compensar a menor densidade energética do etanol, quanto para outros diversos componentes do motor, que necessitam de um tratamento especial anticorrosão. O tanque de combustível também deve ser redimensionado, possibilitando o armazenamento de 60% mais combustível, devido à diferença de rendimento entre o etanol aditivado e o diesel para se manter constante a autonomia dos veículos. Outra importante alteração do motor refere-se à necessidade de inclusão de um sistema de recirculação de gases de exaustão (*Exhaust Gas Recirculation – EGR*), com a função de neutralizar um efeito indesejável decorrente da maior taxa de compressão: o aumento de emissões de óxido de nitrogênio favorecido pelas maiores temperatura e pressão na câmara de compressão. O EGR consiste em um sistema de ciclo fechado no qual parte dos gases exauridos volta para o coletor de admissão após resfriamento em dois estágios, o primeiro por meio de água, o segundo por um radiador de ar.

Em termos de resultados, as curvas de torque e potência obtidas nos testes suecos são bastante similares àquelas dos motores diesel convencionais, sem grandes alterações na relação destes parâmetros com a rotação do motor. Os resultados parciais dos testes de campo realizados no Brasil também foram satisfatórios, com boa avaliação no que se refere à redução de emissões, segundo os índices definidos pelo PROCONVE.

Um empecilho encontrado na adaptação do motor a etanol aditivado no Brasil diz respeito a uma alteração técnica de tropicalização: em dias mais quentes, com temperatura ambiente acima dos 26°C, o motor em teste costumeiramente apresentava superaquecimento em baixas velocidades, com condições atípicas de temperatura e pressão na linha de combustível. Após uma análise criteriosa, constatou-se que estas alterações decorriam da ação de uma micro-câmara de pré-aquecimento anexa ao tanque de combustível, que foi extraída, solucionando o problema. Em geral, os veículos da segunda fase do projeto BEST na cidade de São Paulo funcionam atualmente sem requerer quaisquer cuidados adicionais, se comparados aos veículos coletivos convencionais.

Em termos gerais, a alternativa de uso de etanol aditivado com polietilenoglicol tem resultados de desempenho satisfatórios, porém ainda enfrenta grandes empecilhos para se viabilizar no mercado, já que a dificuldade de fabricação no Brasil e os atuais altos custos para a importação fazem com o combustível etanol-PEG se comporte como uma opção cara, com expectativas reduzidas de diminuição de preço para os produtos sucroalcooleiros em curto prazo.

4.2.4 Diesel de Cana

Antes de detalhar mais a fundo a solução a seguir, faz-se importante, primeiramente, salientar a peculiaridade da presença, neste trabalho, de uma alternativa que não envolve o uso de etanol, mas sim a utilização do diesel oriundo do processamento da cana-de-açúcar (diesel de cana). Apesar do foco do projeto explicitamente ter sido, até este ponto, em torno de soluções que viabilizassem o etanol como combustível substituto do diesel, desprestigiando-se estudos mais específicos a respeito do cenário de produção do biodiesel de óleos vegetais tradicional, o diesel de cana revela-se como uma interessante alternativa a ser considerada, exatamente pelo fato de ser um derivado da cana-de-açúcar, produzido em um processo similar àquele do etanol. A substituição do diesel pelo diesel de cana, portanto, é análoga, para a indústria, à substituição do diesel pelo etanol, já que as duas possibilidades alinham-se ao principal objetivo deste trabalho: o aproveitamento, por parte dos produtores, de um exumo sucroalcooleiro como recurso combustível às máquinas envolvidas nos diferentes processos da cadeia produtiva, otimizando a sustentabilidade da produção em termos ambientais e econômicos.

A proposição de motores movidos a diesel de cana é, de fato, dentre as soluções tecnológicas do portfólio deste trabalho, a alternativa com desenvolvimento mais recente. O produto é uma aposta de uma *joint venture* entre uma empresa norte-americana de biotecnologia e uma grande companhia brasileira de comercialização de etanol e açúcar. Para viabilizar a tecnologia de produção em larga escala, a parceria também contou com aportes de investimentos provenientes de fundos ligados ao empreendedorismo.

O diesel de cana é na realidade uma substância denominada farneseno, uma secreção de leveduras do tipo *Saccharomyces cerevisiae* modificadas geneticamente. Estas leveduras são as mesmas responsáveis pela transformação do caldo de cana em etanol durante o processo de fermentação nas usinas sucroalcooleiras. Para gerar esta modificação

biotecnológica, a empresa desenvolvedora da substância utilizou um processo denominado reengenharia de metabolismo, pelo qual é possível, a partir de técnicas de seqüenciamento de genoma, modificar os genes que codificam as enzimas das leveduras responsáveis pela transformação do açúcar em etanol, alterando a rota metabólica dos microorganismos para a secreção de outro produto com atributos pré-determinados. A molécula farneseno, um caro subproduto extraído comumente de plantas como a citronela, apresentava-se como uma excelente alternativa ao diesel, por possuir propriedades químicas bastante semelhantes no que diz respeito às condições e resultados da combustão. Dessa forma, a partir de microcirurgias em alguns exemplares, a empresa conseguiu obter o farneseno após modificações genéticas em quinze genes distintos do DNA da levedura.

No âmbito industrial, com a modificação genética das leveduras, a cadeia de produção do diesel de cana praticamente equivale à própria cadeia de produção de etanol, com apenas três alterações pontuais:

- adição de um procedimento de remoção de impurezas após a fase de fermentação do caldo de cana;
- exclusão do processo de desidratação do caldo após a fermentação, já que hidrocarbonetos como o farneseno podem ser facilmente separados da água por decantação;
- inclusão de um processo final de tratamento químico para conversão do produto final em combustível.

No entanto, mesmo com a aparente facilidade de produção, a tecnologia de produção de diesel de cana tende a enfrentar dificuldades de posicionamento no mercado, pelo menos em curto prazo. O processo burocrático de elaboração de patentes deve reduzir as opções de oferta a poucas indústrias. Além disso, segundo estimativas do próprio desenvolvedor, mesmo com as vantagens de redução de custo na obtenção de sacarose e carbono especificamente da cana-de-açúcar brasileira e não de outras culturas agrícolas, o diesel de cana tende a ser mais dispendioso do que o próprio etanol, por estar vinculado a um processo industrial ainda recente, sem aperfeiçoamentos industriais e com uma nova expressiva parcela de gastos provenientes das etapas de tratamento biotecnológico. De fato, a aplicação do farneseno produzido como diesel de cana ainda concorrerá com a possibilidade de uso em outros contextos, como por exemplo, para a produção de querosene de aviação, gasolina, lubrificantes, cosméticos, surfactantes e aditivos plásticos.

Alguns testes de campo em protótipos movidos parcialmente a diesel de cana já vêm sendo realizados, com o apoio técnico de uma grande montadora de veículos pesados e da secretaria municipal de trânsito da cidade de São Paulo. Os resultados parciais obtidos são animadores: para uma mistura de 10% de diesel de cana, 4% de biodiesel convencional e 86% de diesel abastecendo motores diesel convencionais, não são verificadas diferenças significativas de desempenho, em termos de torque, potência e consumo de combustível. Este resultado é interessante, já que não são realizadas quaisquer alterações mecânicas nos componentes dos motores originais, diferentemente do que ocorre para outras alternativas de substituição do diesel em motores de combustão a compressão. Em relação à emissão de poluentes, para a mistura em testes, somente a emissão de partículas em suspensão (PM) apresentou redução, em torno de 9%. No entanto, estimativas para a situação de total abastecimento com farneseno indicam a redução de GEE em mais de 90%, se realizada a comparação com as emissões decorrentes da queima de óleo diesel. Esta redução é ainda mais expressiva do que a alcançada com o uso do próprio etanol de cana-de-açúcar.

Em suma, apesar de atualmente apresentar custos de produção elevados, o diesel de cana parece ser uma alternativa de médio prazo bastante interessante, conciliando a capacidade de redução drástica de emissões à praticidade de produção seriada sem modificações dos projetos convencionais de motores diesel.

4.3 Avaliação das alternativas

Após a apresentação do portfólio de soluções, e do detalhamento das características técnicas de cada uma destas, parte-se para a etapa de avaliação das alternativas. Etapa esta que é composta essencialmente por três fases:

1. Definição de critérios e aplicação do AHP;
2. Classificação da maturidade das soluções;
3. Plotagem das alternativas no diagrama Viabilidade x Maturidade.

Ao fim deste processo espera-se chegar à solução com maior propensão a se tornar a primeira alternativa tecnológica a ser amplamente utilizada, no setor sucroalcooleiro brasileiro, como facilitadora da substituição do diesel por um combustível proveniente da cana-de-açúcar em motores pesados.

4.3.1 Aplicação do AHP

O primeiro passo para a aplicação do AHP consiste na definição dos critérios pelos quais as soluções serão avaliadas. Tais parâmetros, de caráter econômico e ambiental, devem abranger todos os aspectos relevantes para o julgamento e comparação das soluções. Com as informações obtidas durante as entrevistas, e o auxílio do orientador deste projeto, obteve-se um conjunto de seis critérios para a constituição do modelo AHP. São eles:

- Aplicabilidade à frota existente - Econômico: Expressa a facilidade de adaptação dos motores existentes às soluções apresentadas, tanto sob a ótica de custos como de tecnologia. Este aspecto se mostra relevante devido à baixa taxa de renovação da frota caminhoneira e de máquinas agrícolas no Brasil. Desta forma, soluções que podem ser facilmente aplicadas aos motores existentes desfrutam de importante vantagem competitiva, já que possuem um mercado potencial significativamente maior;
- Incremento no preço do motor - Econômico: Reflete a magnitude do possível aumento no preço de venda do motor. Alternativas mais complexas, que exigem maior número de modificações nos motores convencionais, provavelmente terão custos de produção mais elevados, acarretando em preços de venda mais altos, menos atrativos economicamente para os consumidores;
- Custo de operação - Econômico: Expressa o custo de operação associado ao novo motor. Este parâmetro é função de basicamente dois fatores, o consumo de combustível da solução em questão (por km, tonelada de cana, ou qualquer outra medida padrão), e o custo do combustível utilizado. É exatamente este parâmetro que determinará a potencial economia para o usineiro, associada à adoção das alternativas tecnológicas apresentadas;
- Performance do motor - Técnico/Econômico: Reflete o desempenho apresentado pelo novo motor, comparado com um motor diesel equivalente (em potência). Aquelas soluções que melhoraram, ou não comprometem, a performance do equipamento ou veículo são preferíveis àquelas que exigem a utilização de um motor maior e mais potente para realizar a mesma função;
- Emissões - Ambiental: Expressa o nível de emissões de poluentes projetado para as diversas alternativas. Quanto menor a quantidade de elementos como NOx, dióxido de enxofre e monóxido de carbono, gerada pelo motor, mais bem posicionada estará a solução neste critério;

- Sustentabilidade – diesel substituído - Ambiental: Reflete a quantidade potencial de diesel que será substituído com a aplicação de cada solução, e consequentemente a redução da pegada de carbono associada a esta substituição. Quanto maior a quantidade de diesel que deixa de ser queimado devido à utilização de uma determinada alternativa, mais sustentável ambientalmente esta será.

Com os critérios de avaliação bem definidos, pode-se então construir a hierarquia que representa o problema em questão. A Figura 38 ilustra os componentes e a estrutura desta hierarquia, que servirá de base para a aplicação do AHP.

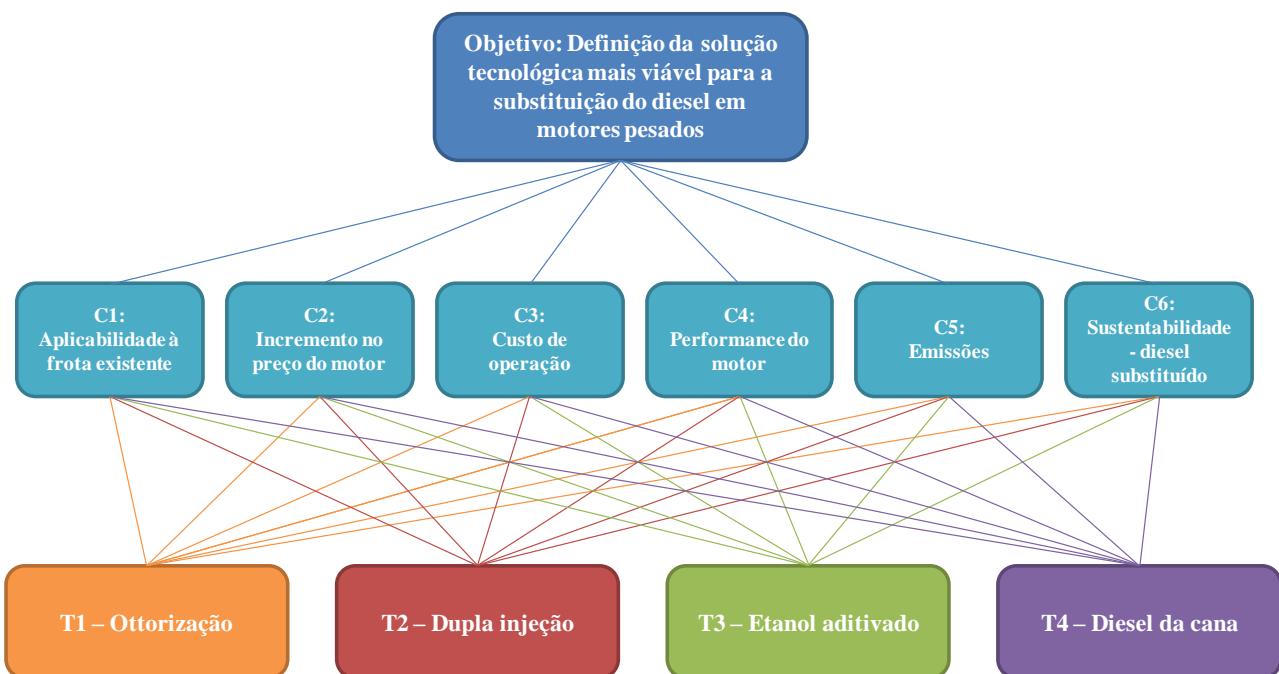


Figura 38 – Hierarquia do método AHP

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma vez definida a hierarquia, parte-se para a comparação par a par dos componentes de cada nível hierárquico, como descrito na revisão bibliográfica deste trabalho. Para esta tarefa é utilizada a escala de ponderação sugerida por Saaty (1990), apresentada na Figura 4.

A primeira fase de comparações é feita entre os critérios componentes do segundo nível hierárquico, visando avaliar a importância destes para o alcance do objetivo em questão. Para a realização desta tarefa, foi construída uma matriz de comparação segundo a escala de Saaty, que foi preenchida e normalizada, possibilitando o cálculo do vetor de prioridades

deste nível hierárquico (as matrizes e cálculos realizados podem ser encontrados no Anexo C). A Figura 39 apresenta o vetor e a taxa de consistência obtidos nesta fase.

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
C1: Aplicabilidade à frota existente	16,18%	N	6,00
C2: Incremento no preço do motor	14,29%	RI	1,24
C3: Custo de operação	39,07%	λ_{\max}	6,33
C4: Performance do motor	20,09%	CI	6,65%
C5: Emissões	6,88%	CR	5,36%
C6: Sustentabilidade - diesel substituído	3,49%		

Figura 39 – Vetor de prioridade e taxa de consistência do segundo nível hierárquico do AHP

Fonte: Elaborado pelo autor

Os diferentes termos do vetor de prioridades resultante da análise para o segundo nível hierárquico pode ser enxergado como um conjunto discreteizado dos pesos de ponderação correlacionados a cada um dos critérios pré-definidos. Estes representam, na prática, a importância de cada critério para o alcance do objetivo principal. A Figura 40 a seguir apresenta graficamente estes pesos.

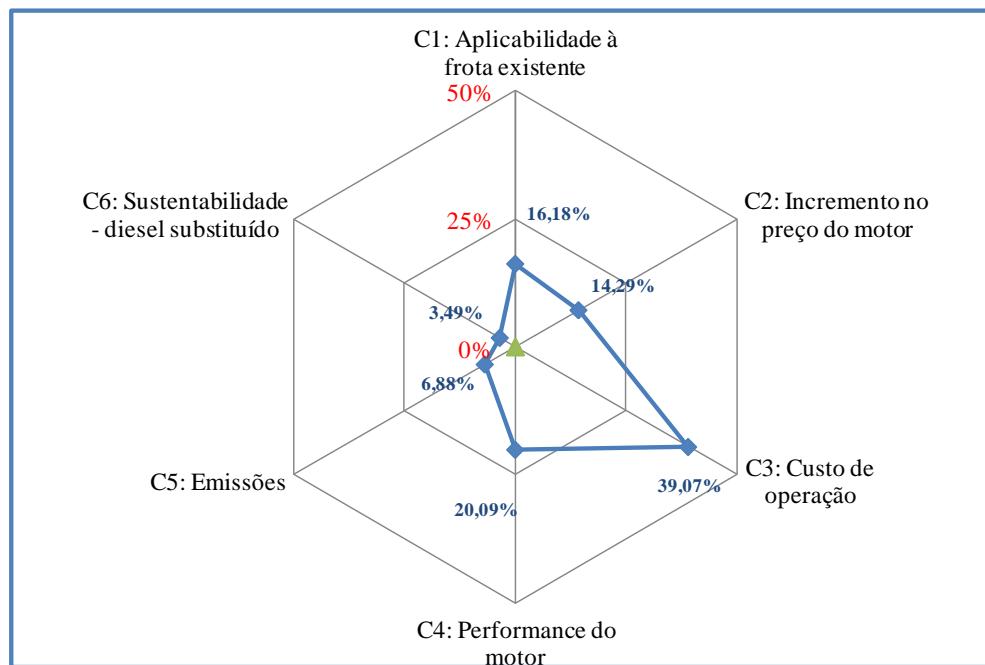


Figura 40 – Pesos de ponderação dos critérios

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise comparativa é realizada sob a perspectiva dos potenciais consumidores destas novas tecnologias, ou seja, os produtores de cana-de-açúcar do Brasil. Desta forma, especial importância foi dada aos critérios de aspecto econômico (somados C1, C2 e C3 representam aproximadamente 70% da priorização), devido à sensibilidade deste grupo específico de consumidores em relação aos custos de operação e às necessidades de investimento.

Esta tendência é claramente refletida nos resultados do vetor de prioridade. O critério de maior peso é C3 – Custo de operação, com 39,07%, seguido por C4 – Performance do motor, com 20,09%. Os outros dois critérios econômicos apresentam prioridade moderada, gravitando em torno de 15%, e por fim os critérios C5 – Emissões e C6 – Sustentabilidade, de caráter ambiental, se mostraram os menos determinantes para a escolha da alternativa mais viável.

Uma vez encontrado o vetor de prioridade do segundo nível hierárquico, inicia-se então o mesmo processo para o terceiro nível, o nível das soluções. Nesta fase, cada solução será comparada par a par, em processo idêntico ao realizado com os critérios, mas desta vez avaliando a importância de cada uma em relação a cada um dos elementos do nível hierárquico superior. No final serão obtidos seis vetores prioridade, que avaliam o desempenho das soluções para cada um dos critérios. As seções a seguir, apresentam estes resultados (as matrizes e cálculos realizados podem ser encontrados no Anexo C).

C1 – Aplicabilidade à frota existente

A primeira comparação das soluções se dá em relação ao critério C1 – Aplicabilidade à frota existente. Os principais resultados podem ser encontrados na Figura 41 abaixo:

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
T1 – Ottorização	28,64%	N	4,00
T2 – Dupla injeção	15,70%	RI	0,90
T3 – Etanol aditivado	4,19%	λ_{\max}	4,25
T4 – Diesel da cana	51,46%	CI	8,32%
		CR	9,25%

Figura 41 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C1

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 42 apresenta graficamente o desempenho das soluções.

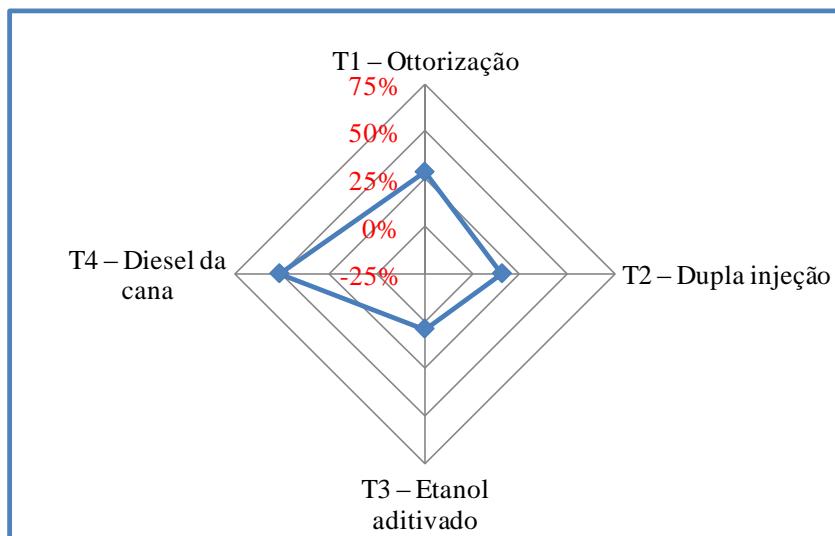


Figura 42 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C1

Fonte: Elaborado pelo autor

A solução com maiores vantagens em termos de aplicabilidade é, de fato, a utilização de diesel de cana que, de acordo com a empresa desenvolvedora da tecnologia, não exige quaisquer alterações dos motores diesel convencionais instalados atualmente nas máquinas agrícolas e de transporte do processo de produção sucroalcooleira. A seguir, na ordem de prioridade, destaca-se o procedimento de Ottorização, já disseminado em boa parte das usinas e, portanto, bastante aplicável aos motores diesel, mesmo exigindo certas modificações mecânicas nestes sistemas. O sistema de dupla injeção, que exige alterações maiores relacionadas à inclusão de um novo sistema de injeção pulverizada de etanol, além da

inserção de um sistema de sincronização eletrônica de injetoras, tem nível de prioridade reduzido em comparação às duas primeiras colocadas. Por fim, em último lugar na avaliação para C1, o uso de etanol aditivado exige um processo de construção de motores específicos, sendo pouco aplicável sobre a frota de veículos e equipamentos existentes.

C2 – Incremento no preço do motor

A segunda comparação das soluções se dá em relação ao critério C2 – Incremento no preço do motor. Os principais resultados podem ser encontrados na Figura 43 abaixo:

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
T1 – Ottorização	21,70%	N	4,00
T2 – Dupla injeção	21,70%	RI	0,90
T3 – Etanol aditivado	3,99%	λ_{\max}	4,13
T4 – Diesel da cana	52,60%	CI	4,19%
		CR	4,65%

Figura 43 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C2

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 44 apresenta graficamente o desempenho das soluções.

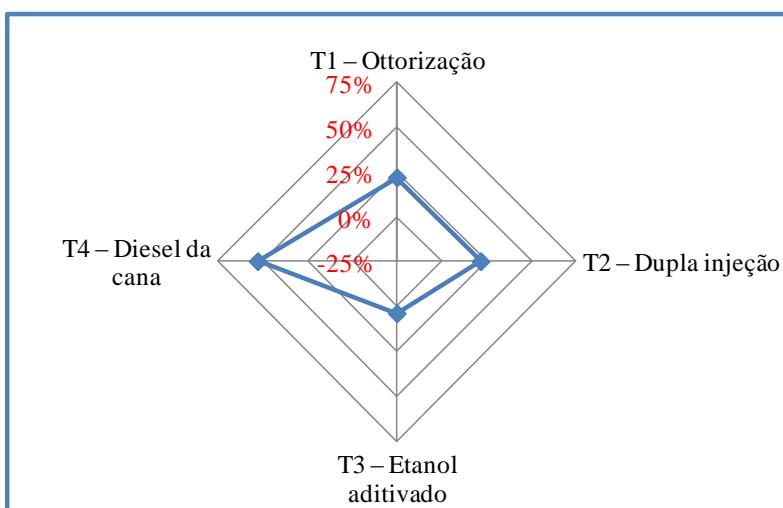


Figura 44 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C2

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores obtidos refletem, de fato, as expectativas práticas de incrementos de preço julgados necessários para cada uma das alternativas do portfólio. Enquanto a solução de uso do farneseno como combustível não tem influência alguma sobre a especificação dos motores diesel inalterados, as demais opções de substituição do diesel provavelmente acarretam em incrementos mais significativos. Neste âmbito, os processos de Ottorização e de comercialização de motores de dupla injeção tendem a gerar aumentos de preços praticamente equivalentes, derivados, na maior parte, de ações bastante similares na alteração mecânica dos bicos injetores dos motores convencionais. A utilização de etanol aditivado mais uma vez não apresenta resultados satisfatórios, já que os incrementos esperados de preço do motor são elevados devido a uma série de modificações aos motores, na composição mecânica dos pistões, na criação de um sistema de reaproveitamento de gases de escape e, fundamentalmente, no tratamento especial anticorrosão dos diversos componentes do sistema de combustão.

C3 – Custo de operação

A terceira comparação das soluções se dá em relação ao critério C3 – Custo de operação. Os principais resultados podem ser encontrados na Figura 45 abaixo:

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
T1 – Ottorização	20,23%	N	4,00
T2 – Dupla injeção	59,17%	RI	0,90
T3 – Etanol aditivado	5,18%	λ_{\max}	4,09
T4 – Diesel da cana	15,42%	CI	2,92%
		CR	3,25%

Figura 45 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C3

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 46 apresenta graficamente o desempenho das soluções.

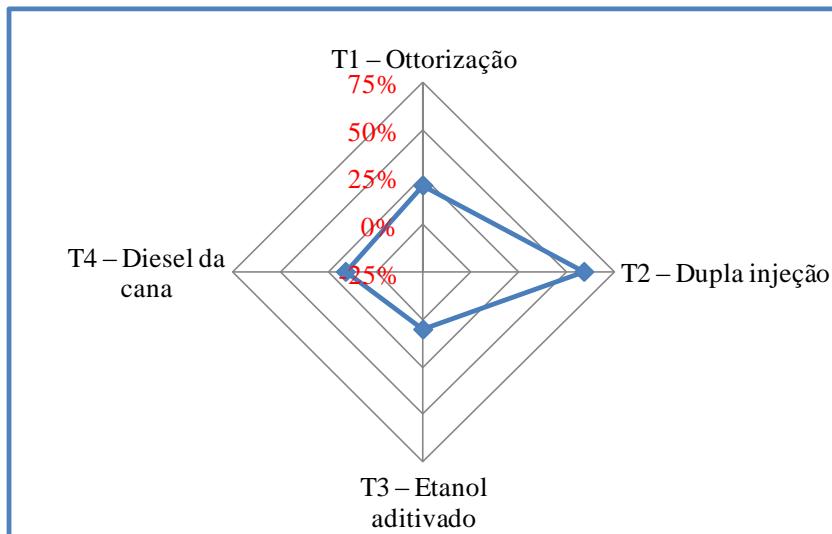


Figura 46 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C3

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise de custos de operação se pauta pela avaliação de dois principais parâmetros: a estimativa dos custos dos insumos requeridos periodicamente para o funcionamento dos equipamentos da produção e a análise do grau de flexibilidade proporcionado pela solução na escolha de combustível por parte dos produtores sucroalcooleiros.

O sistema de dupla injeção substancialmente prepondera sobre as demais alternativas, tanto por não implicar em modificações de preços do diesel e etanol convencionais, quanto por permitir a flexibilidade de abastecimento destes combustíveis em diferentes proporções, para as mais diversas situações de mercado. A solução de Ottorização de motores diesel obtém valor de prioridade menor, principalmente em decorrência do comprometimento da capacidade de escolha de combustível, já que os motores ciclo Otto não podem ser movidos a diesel. Para as alternativas de uso de diesel de cana e de etanol aditivado, existem significativas desvantagens econômicas, no que se refere a custos operacionais, vinculadas ao alto preço de mercado dos novos combustíveis propostos. Enquanto o preço do farneseno obtido da cana-de-açúcar parece apresentar tendência de queda no médio prazo, devido à natural otimização dos processos de produção e à expansão da oferta, o preço do polietilenoglicol não deve sofrer alterações consideráveis, já que este aditivo depende de um complexo processo de importação, controlado por restrições de segurança específicas para a manipulabilidade de uma substância altamente inflamável, cuja produção em larga escala no território nacional é considerada inviável.

C4 – Performance do motor

A quarta comparação das soluções se dá em relação ao critério C4 – Performance do motor. Os principais resultados podem ser encontrados na Figura 47 abaixo:

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
T1 – Ottorização	5,36%	N	4,00
T2 – Dupla injeção	42,05%	RI	0,90
T3 – Etanol aditivado	22,93%	λ_{\max}	4,15
T4 – Diesel da cana	29,66%	CI	4,89%
		CR	5,44%

Figura 47 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C4

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 48 apresenta graficamente o desempenho das soluções.

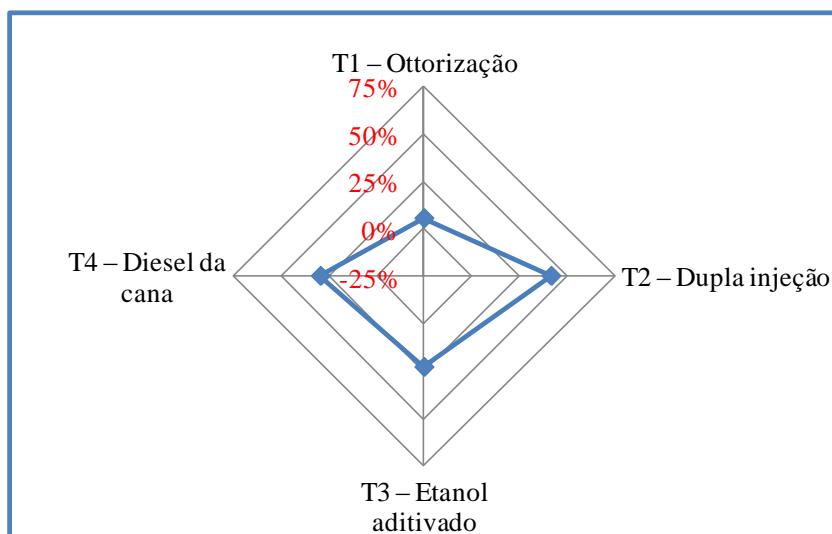


Figura 48 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C4

Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de dupla injeção novamente prepondera sobre as demais alternativas, agora para o critério de previsão de performance do motor. Basicamente, isto se deve ao fato do escopo do projeto desta solução orientar-se pelas mesmas curvas de torque e potência dos

motores diesel convencionais, o que é observado na prática nos resultados dos testes realizados. A solução de utilização de diesel de cana obtém o segundo lugar no ranking de prioridade, já que os testes atuais conduzidos ainda se limitam ao uso de apenas 10% do combustível alternativo em misturas farneseno-diesel-biodiesel, o que não assegura as expectativas otimistas de bom desempenho dos motores à compressão no cenário de substituição integral de óleo diesel. O uso de etanol aditivado ocupa o terceiro lugar na análise, em decorrência de prováveis empecilhos de desempenho mais freqüentes em um sistema complexo, cujos testes de campo no Brasil apontaram para a necessidade de tropicalização do projeto sueco original. O processo de Ottorização não tem como objetivo prioritário a manutenção dos resultados de torque e potência dos motores diesel modificados e, por tal motivo, não possui boa avaliação em termos de performance.

C5 – Emissões

A quinta comparação das soluções se dá em relação ao critério C5 – Emissões. Os principais resultados podem ser encontrados na Figura 49 abaixo:

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
T1 – Ottorização	5,30%	N	4,00
T2 – Dupla injeção	14,04%	RI	0,90
T3 – Etanol aditivado	30,14%	λ_{\max}	4,25
T4 – Diesel da cana	50,52%	CI	8,22%
		CR	9,13%

Figura 49 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C5

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 50 apresenta graficamente o desempenho das soluções.

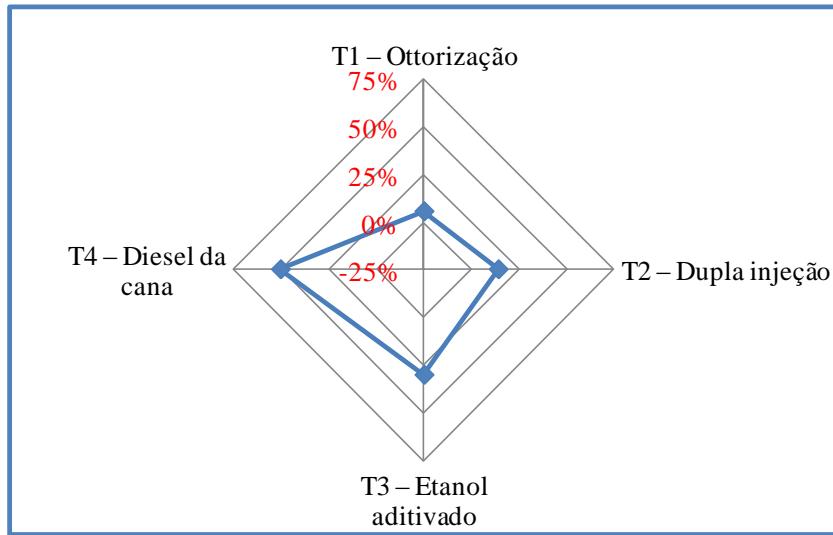


Figura 50 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C5

Fonte: Elaborado pelo autor

No que diz respeito às emissões, a comparação entre alternativas revela como prioritária a solução de adoção do farneseno para combustão em motores diesel convencionais. As estimativas da desenvolvedora do produto são de reduções na emissão de GEE e de gases poluentes ainda maiores do que aquelas verificadas com o uso de etanol de cana-de-açúcar. O desenvolvimento de motores movidos a etanol aditivado também apresenta prioridade relativamente alta, já que sua concepção parte fundamentalmente das intenções da empresa montadora em cumprir às exigentes restrições de emissões ditadas pela regulamentação Euro 5. Em terceiro lugar no ranking de priorização, o sistema de dupla injeção demonstra resultados satisfatórios nos testes de avaliação de emissões, porém, conforme apontado pelos próprios responsáveis pelo projeto, ainda permite boas ações de otimização em termos ambientais. O processo de Ottorização, apesar de revelar alguma redução de emissão de óxido de nitrogênio e fumaça, tem como foco principal a minimização de custos, o que justifica os resultados menos expressivos dos testes realizados.

C6 – Sustentabilidade – diesel substituído

A sexta comparação das soluções se dá em relação ao critério C6 – Sustentabilidade – diesel substituído. Os principais resultados podem ser encontrados na Figura 51 abaixo:

CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADE		CÁLCULO DA TAXA DE CONSISTÊNCIA	
T1 – Ottorização	45,54%	N	4,00
T2 – Dupla injeção	9,71%	RI	0,90
T3 – Etanol aditivado	36,97%	λ_{\max}	4,06
T4 – Diesel da cana	7,78%	CI	2,14%
		CR	2,37%

Figura 51 – Vetor de prioridade e taxa de consistência para o critério C6

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 52 apresenta graficamente o desempenho das soluções.

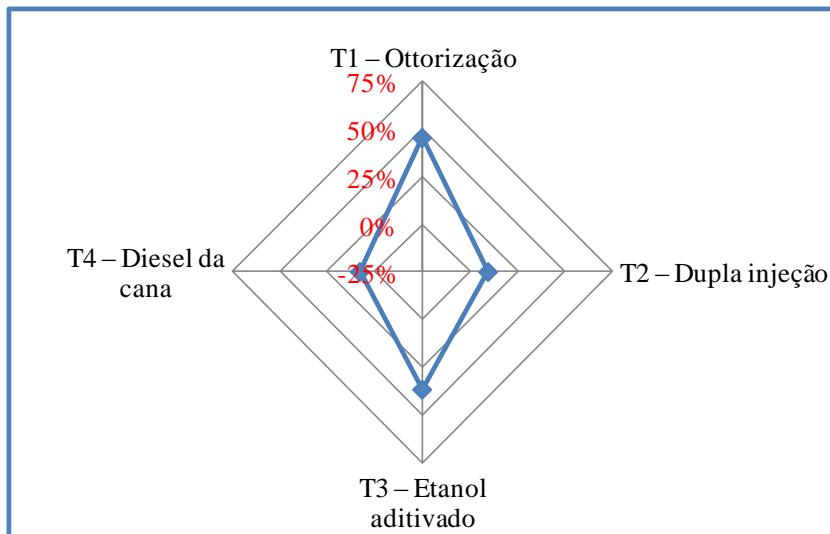


Figura 52 – Representação gráfica do vetor de prioridades do critério C6

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da quantidade de diesel passível de substituição divide as alternativas do portfólio em dois grupos. O primeiro, composto pela solução de Ottorização e pela opção de uso de motores movidos a etanol aditivado, tem índice de priorização bastante expressivo, já que para ambos os casos a substituição do óleo diesel é integral. A ligeira desvantagem da alternativa de utilização de etanol aditivado se dá pelo efeito mais agressivo do polietilenoglicol em termos da sustentabilidade da solução. O segundo grupo, composto pelas soluções de dupla injeção e de uso de farneseno, não apresenta índices de substituição tão elevados: enquanto os testes para sistemas de dupla injeção alcançam níveis de troca do diesel

por etanol de até 75%, os ensaios preliminares com o uso de diesel de cana ainda exigem 86% de óleo diesel na composição da mistura farneseno-diesel-biodiesel, o que denota o baixo índice de prioridade observado.

Com o procedimento de cálculo do vetor de prioridade finalizado para a interface entre segundo e terceiro níveis hierárquicos, pode-se partir para o cálculo do vetor de resultados finais que vincula cada solução tecnológica ao objetivo final de projeto. A Figura 53 abaixo sumariza todos os vetores de prioridade encontrados:

Viabilidade	Prioridade	Prioridade	Prioridade	Prioridade	Prioridade	Prioridade
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
T1 – Ottorização	28,64%	21,70%	20,23%	5,36%	5,30%	45,54%
T2 – Dupla injeção	15,70%	21,70%	59,17%	42,05%	14,04%	9,71%
T3 – Etanol aditivado	4,19%	3,99%	5,18%	22,93%	30,14%	36,97%
T4 – Diesel da cana	51,46%	52,60%	15,42%	29,66%	50,52%	7,78%

Figura 53 – Consolidação dos vetores de prioridade

Fonte: Elaborado pelo autor

O vetor de resultados finais pode, enfim, ser obtido pelo produto entre a matriz apresentada anteriormente e o peso de cada critério na composição do objetivo principal, dado pelo respectivo termo do vetor de prioridade calculado para a interface entre primeiro e segundo níveis hierárquicos (Figura 40). A Figura 54 apresenta o resultado final da análise através de modelo AHP, um indicador de 0 a 100% que, em termos práticos, traduz o quanto viável é cada uma das soluções do portfólio avaliado.

Viabilidade	RESULTADOS	RANKING
T1 – Ottorização	18,67%	3º
T2 – Dupla injeção	38,51%	1º
T3 – Etanol aditivado	11,24%	4º
T4 – Diesel da cana	31,58%	2º

Figura 54 – Resultados finais e classificação do AHP

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar a preponderância da solução tecnológica de dupla injeção sobre as outras alternativas. Isto se deve, principalmente, pelos bons resultados apresentados nos critérios de cunho econômico, de maior peso na composição do objetivo principal. Em segundo lugar, o uso de diesel de cana destaca-se pela capacidade de substituição integral do óleo diesel, porém, por ser uma alternativa ainda bastante incipiente, vinculada a um processo de produção ainda caro, tem seu desempenho geral comprometido na análise de custos para o produtor sucroalcooleiro. O processo de Ottorização obteve a terceira posição do ranking, principalmente pelo fato de ser uma alternativa de implementação menos dispendiosa, com resultados satisfatórios, mas que tendem a ser ultrapassados conforme o avanço das outras tecnologias consideradas. Finalmente, o uso de etanol aditivo se mostra como a opção menos interessante em termos de viabilidade, principalmente por estar vinculado à necessidade de uso do polietilenoglicol, aditivo de delicada manipulação, com produção restrita e importação altamente controlada.

4.3.2 *Maturidade das soluções*

A comparação das soluções realizada através do método AHP permite determinar o posicionamento das mesmas no eixo das ordenadas do gráfico Viabilidade x Maturidade. Inicia-se em seguida, a comparação destas alternativas no eixo das abscissas, ou seja, em relação à maturidade de cada uma das soluções.

Por maturidade objetiva-se traduzir o período de tempo estimado para que as soluções do portfólio sejam passíveis de exploração comercial em larga escala. Devido à limitação de informações precisas a este respeito, decidiu-se criar três categorias de maturidade para alocação das alternativas, cada qual representando uma faixa temporal correspondente à época em que cada solução tem maior propensão de consolidação no mercado. Com esta categorização, busca-se diminuir a subjetividade da avaliação, direcionando as informações para intervalos de tempo ao invés de pontos temporais específicos. As três categorias definidas são:

- Imediato: disponível em menos de um ano;
- Curto prazo: disponível no intervalo entre um e três anos;
- Médio prazo: disponível entre três e cinco anos;

Para a avaliação de cada solução foram utilizados dados do estágio de desenvolvimento de cada uma, obtidos durante as entrevistas e através de pesquisas, que indicam em qual categoria de prazos cada solução deve ser enquadrada. Deste modo, informações sobre os tipos de testes já realizados, quantidade de protótipos, fabricações e plantas experimentais, além das formas de exploração comercial, compõem as principais ferramentas para a determinação da maturidade das diferentes alternativas.

A Ottorização, como mencionado anteriormente, é uma alternativa que já vem sendo utilizada na indústria há algum tempo, através da adaptações mecânicas realizadas nas próprias usinas. Desta forma, considera-se que sua disponibilização para exploração comercial se daria em prazo imediato, dependendo apenas de planejamento para a produção industrial destes motores. Já o sistema de dupla injeção, apesar de ter sido testado extensivamente nas mais diversas condições e em diferentes tipos de motores, ainda requer aperfeiçoamentos técnicos e um plano de produção industrial para sua fabricação em escala, sendo deste modo classificado como uma solução de curto prazo. Por fim, tanto o etanol aditivado como o diesel de cana se apresentam como alternativas de médio prazo, dependendo de avanços técnicos, políticos e industriais para se tornarem atrativas economicamente e amplamente disponíveis para o mercado. A Figura 55 abaixo resume a classificação da maturidade das quatro soluções.

Maturidade	
T1 – Ottorização	Imediato
T2 – Dupla injeção	Curto prazo
T3 – Etanol aditivado	Médio prazo
T4 – Diesel da cana	Médio prazo

Figura 55 – Avaliação de maturidade das soluções

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente com todas as soluções devidamente avaliadas, pode-se plotar o gráfico Viabilidade x Maturidade (Figura 56).

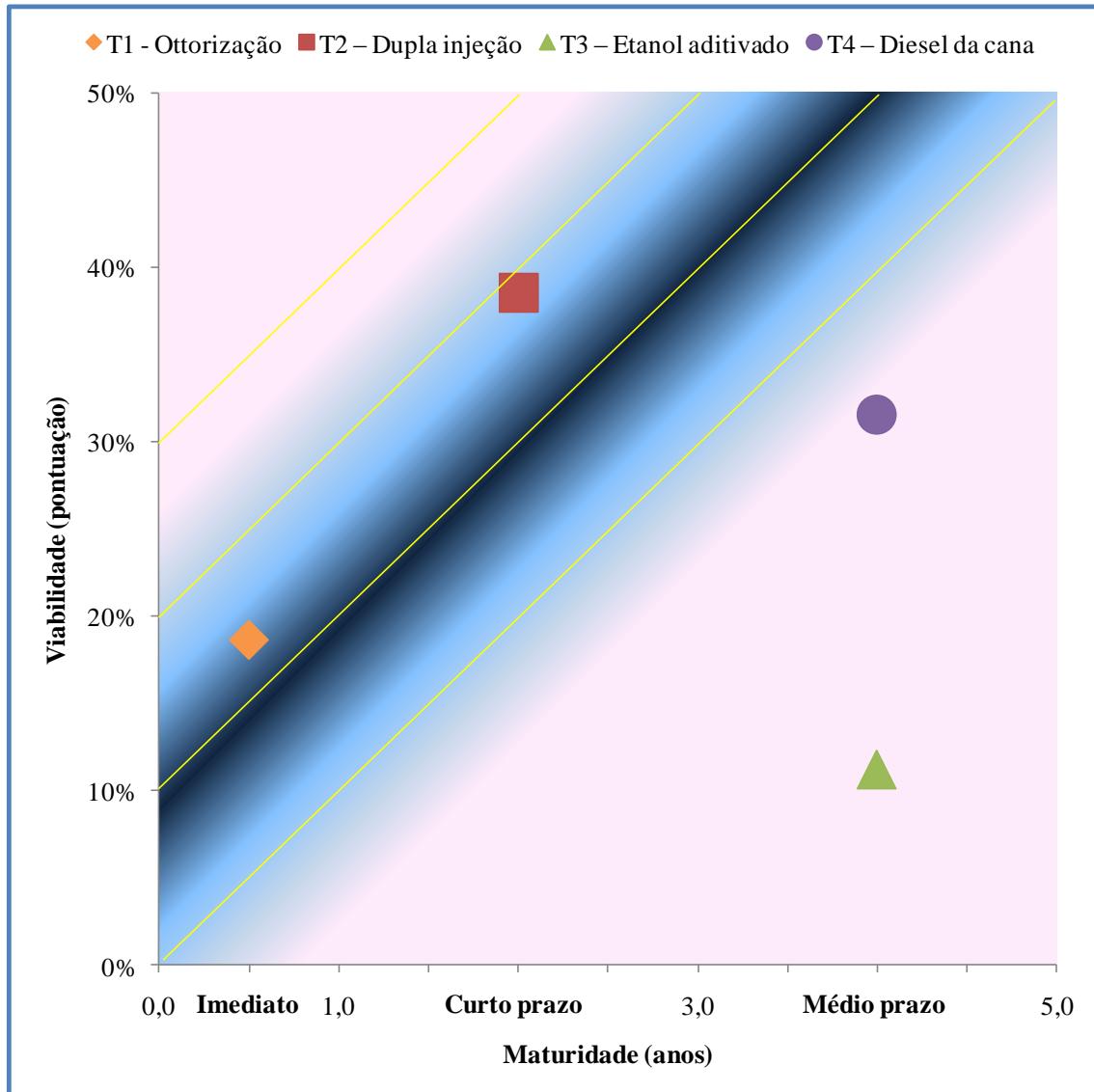


Figura 56 – Gráfico Viabilidade x Maturidade

Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico acima evidencia a Dupla Injeção, dentre as alternativas analisadas, como a solução que melhor responde tanto aos requisitos econômicos e ambientais de viabilidade, quanto às expectativas de maturidade tecnológica e industrial, no curto prazo. Por se portar como a opção mais propícia a ser amplamente explorada no mercado sucroalcooleiro brasileiro, o sistema de Dupla Injeção passa a ser o alvo da análise de impactos a ser detalhada no próximo capítulo.

5. Impactos

Este tópico descreve a parte final das análises propostas por este trabalho de formatura, a estimativa de impactos da aplicação da solução tecnológica priorizada. Objetiva-se neste capítulo avaliar quais seriam os efeitos econômicos e ambientais da implementação em massa da Dupla Injeção nos motores utilizados na indústria sucroalcooleira.

Os cálculos e análises desta etapa seguem a metodologia apresentada no Capítulo 3 deste trabalho, mais especificamente no tópico referente à fase quantitativa do Método (Fase 2), e são apresentados em 3 seções: Modelo Base, Avaliação de impactos econômicos e Avaliação de impactos ambientais.

5.1 Modelo Base

Para a formulação do modelo de cálculos foi tomado como base o trabalho de Macedo et al (2004). Utilizando os dados e a lógica descrita nesta referência, construiu-se um modelo que quantifica o consumo total de diesel numa usina de etanol. Este consumo é dividido em três grandes áreas: operações agrícolas, colheita e transporte.

5.1.1 *Operações agrícolas*

As operações agrícolas envolvem todas as atividades relacionadas ao plantio e manutenção da cana-de-açúcar e da soqueira de cana-de-açúcar, e para os fins deste modelo são divididas em duas partes: preparo de solo e plantio, e tratos de cana soca. As tabelas 15 e 16 a seguir apresentam os resultados de cada uma destas fases, assumindo uma produtividade média de 68,7 toneladas de cana por hectare.

Tabela 15 – Consumo total de diesel por atividade de preparo de solo e plantio

Preparo de Solo e Plantio	Nº Equip.	Cap. Trab. (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total (l diesel/TC)
Aplicação de calcário	1	1,61	3,73	1,00	0,054
Eliminação mecânica de soqueira	13	1,10	11,09	0,30	0,048
Eliminação química de soqueira	9	2,50	1,60	0,30	0,007
Gradagem pesada I	2	1,30	21,23	0,90	0,278
Subsolagem	3	1,00	26,00	0,70	0,265
Gradagem pesada II	4	1,35	20,44	0,70	0,208
Gradagem pesada III	4	1,35	20,44	0,30	0,089
Gradagem de acabamento	5	1,60	9,38	0,90	0,123
Sulcação e adubação	6	1,10	13,64	1,00	0,199
Distribuição de mudas	7	0,60	6,67	1,00	0,097
Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	8	1,80	2,67	1,00	0,039
Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	1,00	0,023
Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	10	1,30	6,15	0,70	0,063
					1,494

Fonte: Elaborado pelo autor**Tabela 16 – Consumo total de diesel por atividade de tratos de cana soca**

Tratos de cana soca	Nº Equip.	Cap. Trab. (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total (l diesel/ha)
Aleiramento de palha	11	1,50	2,67	0,25	0,010
Cultivo tríplice operação	12	1,30	7,08	1,00	0,103
Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	0,85	0,020
					0,133

Fonte: Elaborado pelo autor

A produção agrícola de cana-de-açúcar tem um ciclo completo de seis anos, neste período o preparo de solo e plantio da cana é realizado uma vez, enquanto os tratos de cana soca são realizados quatro vezes. Por este motivo, faz-se necessário ponderar os números de consumo pela quantidade de aplicações no ciclo completo de seis anos. A Figura 57 abaixo apresenta os resultados finais de consumo das operações agrícolas.

Consumo Operações Agrícolas	(l diesel/TC)	0,343
Cana - Planta	(l diesel/TC)	0,254
Consumo específico	(l diesel/TC)	1,494
Fator de Aplicação		17%
Cana - Soca	(l diesel/TC)	0,089
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,133
Fator de Aplicação		67%

Figura 57 – Consumo de diesel em operações agrícolas**Fonte:** Elaborado pelo autor

5.1.2 Colheita

A colheita da cana-de-açúcar ocorre em cinco dos seis anos do ciclo canavieiro, e envolve o corte, carregamento e transbordo da cana. São duas as formas mais comuns de colheita, a mecânica e a manual. Existe uma pressão política forte para a extinção da colheita manual, pelas duras condições de trabalho impostas aos cortadores de cana. Apesar destas pressões, e da crescente mecanização da lavoura, a colheita manual ainda se faz presente em grande parte das operações sucroalcooleiras.

A primeira etapa para a determinação do consumo de diesel destas operações baseia-se na listagem da utilização do combustível nas máquinas associadas à colheita (Tabela 17)

Tabela 17 – Consumo total de diesel por atividade de tratos de cana soca

Colheita	Nº Equip.	Capacidade operacional (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total
					(l diesel/TC)
Colhedora Case	14	0,55	74,00	1,00	1,078
Carregadora Santal	15	0,56	12,70	0,20	0,037
Reboque de Julieta/Trasbordo	25	0,42	21,20	0,60	0,185

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a colheita mecanizada utiliza-se a colhedora Case, enquanto para o processo manual utiliza-se a carregadora Santal. Além destes equipamentos, faz-se necessário, em ambas as atividades, o uso do reboque de julieta, em diferentes proporções de uso de acordo com as especificidades de cada procedimento. A partir destas considerações, podem ser obtidos os valores de consumo apresentados na Figura 58.

Colheita Mecânica	(l diesel/ha)	1,263
Consumo na colheita	(l diesel/ha)	74
Consumo no reboque e transbordo	(l diesel/ha)	12,72
Colheita Manual	(l diesel/ha)	0,160
Consumo na colheita	(l diesel/ha)	2,54
Consumo no reboque e transbordo	(l diesel/ha)	8,48

Figura 58 – Consumo de diesel nas colheitas mecânica e manual

Fonte: Elaborado pelo autor

É importante ressaltar que para a colheita manual a utilização do reboque e transbordo é menor que aquela apresentada pela colheita mecanizada. Desta forma, o consumo associado a esta atividade na operação manual foi assumido dois terços daquele da operação mecanizada.

Finalmente, depois de consolidar os números para cada tipo de colheita (assumiu-se 65% de colheita manual e 35% de colheita mecanizada, baseado nas premissas de Macedo et al (2004)), chega-se ao consumo total de diesel apresentado na Figura 59.

Consumo Colheita	(l diesel/TC)	0,453
Colheita Mecânica	(l diesel/TC)	0,367
Consumo específico	(l diesel/TC)	1,263
Participação na colheita	(l diesel/TC)	35%
Fator de Aplicação	(l diesel/TC)	83%
Colheita Manual	(l diesel/TC)	0,087
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,1605
Participação na colheita	(%)	65%
Fator de Aplicação	(%)	83%

Figura 59 – Consumo de diesel total na colheita

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.3 Transporte

O transporte é a última porção do modelo de cálculo do consumo de diesel na produção de cana-de-açúcar, e inclui as seguintes operações:

-
- Transporte de cana;
 - Transporte de mudas;
 - Transporte de torta de filtro;
 - Transporte e aplicação de vinhaça;
 - Transporte de adubo;

O consumo atribuído às diversas operações de transporte segue a mesma lógica de cálculo. Parte-se do consumo específico de diesel (em litros de diesel por quilômetro), multiplicado pelo trajeto médio de serviço (em quilômetros por hectare), e dividido pela produtividade média (em toneladas de cana por hectare), obtendo o consumo total em litros de diesel por tonelada de cana. Existem, no entanto, pequenas variações no método em duas das operações listadas. É o caso do transporte de cana, onde o consumo específico já é dado em litros de diesel por quilômetro por tonelada de cana, e o caso do transporte de vinhaça, que é medido em litros de diesel por metro cúbico de vinhaça transportada. A Figura 60, abaixo, apresenta estes cálculos.

Transporte de Cana					
Operações	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto médio	Consumo Total
		(km/l diesel)	(l diesel/TC.km)	(km)	(l diesel/TC)
Transporte de Cana - Rodotrem	18	1,10	0,0157	40,00	0,628
Transporte de Mudas					
Operações	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto médio	Consumo Total
		(km/l diesel)	(l diesel/km)	(km/ha)	(l diesel/TC)
Transporte de Muda - Truck	16	2,30	0,4348	40,00	0,253
Torta de Filtro					
Operações	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto médio	Consumo Total
		(km/l diesel)	(l diesel/km)	(km/ha)	(l diesel/TC)
Basculante	19	2,50	0,4000	24,00	0,140
Vinhaça					
Operações	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto médio	Fração da área trab. Consumo Total
		(km/l diesel)	(l diesel/m3)	(m3/ha)	(l diesel/TC)
Transporte de vinhaça (truck)	21	2,20	0,4242	100,00	0,060 0,037
Transporte de vinhaça (rodotrem)	23	1,30 (m3/h)	0,3077	100,00	0,310 0,139
Aplic. de vinhaça (aspersão)	24	120,00	0,1333	150,00	0,630 0,183
Adubo					
Operações	Nº Equip.	Cap.Trab.	Consumo específico	Trajeto médio	Consumo Total
		(km/l diesel)	(l diesel/km)	(km/ha)	(l diesel/TC)
Transporte de adubo	20	2,50	0,4000	4,00	0,023

Figura 60 – Consumo de diesel nas operações de transporte**Fonte:** Elaborado pelo autor

Finalmente, parte-se para a consolidação dos consumos das operações de transporte, baseado simplesmente na ponderação dos valores calculados em vista de dois fatores: a participação individual de cada atividade na área total trabalhada, e o fator de aplicação, que

traduz em quantos dos seis anos do ciclo canavieiro cada operação é aplicada. A Figura 61 detalha este procedimento.

Consumo Transporte	(l diesel/TC)	0,764
Transporte de Cana	(l diesel/TC)	0,628
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,628
Participação	(%)	100%
Fator de Aplicação	(%)	100%
Transporte de Mudas	(l diesel/TC)	0,043
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,253
Participação	(%)	100%
Fator de Aplicação	(%)	17%
Torta de Filtro	(l diesel/TC)	0,007
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,140
Participação	(%)	30%
Fator de Aplicação	(%)	17%
Vinhaça	(l diesel/TC)	0,0723
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,3595
Participação	(%)	30%
Fator de Aplicação	(%)	67%
Adubo	(l diesel/TC)	0,0135
Consumo específico	(l diesel/TC)	0,0233
Participação	(%)	70%
Fator de Aplicação	(%)	83%

Figura 61 – Consumo de diesel total nos transportes

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.4 Taxa de substituição e rendimento

Para o cálculo de impactos econômicos e ambientais, em posse do consumo total de diesel na cadeia produtiva sucroalcooleira, faz-se necessário determinar a taxa de substituição proporcionada pelo sistema de dupla injeção, além do rendimento relativo entre diesel e etanol.

O rendimento relativo entre os combustíveis pode ser obtido a partir do Poder Calorífico Inferior (PCI) e a densidade das duas substâncias. Utilizando dados do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), são obtidos os resultados apresentados na Tabela 18, abaixo.

Tabela 18 – Rendimento energético dos combustíveis

Rendimento	PCI (MJ/kg)	Densidade (kg/l)	PCI (MJ/l)	Proporção (l etanol/l diesel)
Diesel	42,3	1,174	36,040	
Etanol	26,4	0,810	32,593	1,11

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a taxa de substituição permitida pela dupla injeção, foram assumidos três cenários. O cenário base assume 50% de substituição média, enquanto o conservador assume 25%, e o otimista utiliza 75%. Além disso, é importante diferenciar os desempenhos associados às operações agrícolas daqueles observados nas operações de transporte.

O primeiro grupo de atividades impõe sobre o motor uma demanda variada de carga e rotação, visto que suas operações envolvem períodos intermitentes de esforço e trabalho. O segundo grupo, ao contrário, caracteriza-se pela aplicação de cargas e rotação relativamente constantes. Deste modo, para refletir a relação inversa entre taxa de substituição e constância de carga e rotação, admite-se que a taxa nas operações agrícolas será 70% daquela observada nas operações de transporte. A Figura 62, a seguir, sumariza estas premissas.

Premissas

Produtividade agrícola média	(TC / hectare)	68,7
Produtividade industrial média - etanol hidratado	(l etanol/TC)	91,8
Taxa de Substituição Agrícola	(% da Tx Base)	70%
Taxa de Substituição Transporte	(% da Tx Base)	100%

Cenários

Cenário 1	Tx de Substituição Base	25%
Cenário 2	Tx de Substituição Base	50%
Cenário 3	Tx de Substituição Base	75%

Figura 62 – Cenários e taxas de substituição

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente, pode-se obter os valores para a quantidade de diesel substituído, e a quantidade de etanol utilizado nesta substituição. Todos os cálculos serão aplicados primeiramente ao cenário base, sendo feita posteriormente uma análise de sensibilidade dos resultados à alteração dos cenários.

Tabela 19 – Diesel substituído e consumo adicional de etanol

Consumo	Tx de Substituição (l diesel/TC)	(%)	Diesel substituído (l diesel/TC)	Consumo adicional de etanol (l etanol/TC)
Agrícola	0,796	35%	0,279	0,309
Transporte	0,764	50%	0,382	0,424

Fonte: Elaborado pelo autor

Em posse dos valores apresentados na Tabela 19, parte-se para a avaliação dos impactos econômicos e ambientais.

5.2 Avaliação de impactos econômicos

O primeiro passo para a estimativa dos efeitos econômicos da utilização da dupla injeção, nos motores do ciclo produtivo sucroalcooleiro, é a obtenção dos custos associados à utilização do diesel e do etanol. Para o combustível derivado do petróleo é usado o preço médio para o distribuidor publicado pela ANP, para o mês de maio de 2011. Para o etanol adota-se uma estimativa do custo de produção deste combustível, decorrente de conversas com especialistas do setor sucroalcooleiro.

Premissas econômicas

Preço do diesel na usina	(R\$/ l diesel)	1,82
Custo de produção do etanol	(R\$/ l etanol)	0,75

Figura 63 – Premissas econômicas**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em seguida, conforme descrito na apresentação do método, calcula-se o coeficiente de economia, baseado nos preços e rendimentos dos combustíveis. Coeficiente este, que aplicado sobre a quantidade de diesel substituída, fornece a economia total propiciada pela adoção da dupla injeção, em Reais por tonelada de cana (Tabela 20).

Tabela 20 – Economia total

Cálculos	Diesel substituído (l diesel/TC)	Coeficiente de economia (R\$/l diesel subs)	Economia (R\$/TC)
Total	0,661	0,99	0,652

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente, pode-se comparar a economia proporcionada pela nova tecnologia com o custo total associado ao diesel na produção de etanol, visualizando a redução percentual obtida para cada cenário de taxa de substituição (Tabela 21).

Tabela 21 – Economia percentual para os Cenários 1, 2 e 3

Custos com combustíveis (R\$/TC)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Diesel - Integral	2,840	2,840	2,840
Economia	0,326	0,652	0,979
<i>Economia Percentual</i>	11,5%	23,0%	34,5%

Fonte: Elaborado pelo autor

A implementação do sistema de dupla injeção nos motores diesel da cadeia sucroalcooleira se mostra, desta forma, extremamente benéfica sob a perspectiva econômica. O cenário base mostra uma economia de 65 centavos por tonelada de cana, representando uma redução de 23% nos gastos com combustíveis associados às operações analisadas.

Este resultado se mostra bastante expressivo no contexto das operações agrícolas da cana-de-açúcar. Uma usina de médio porte, que produza 5 milhões de toneladas por ano, economizaria mais de R\$ 3 milhões anuais com a adoção do sistema de dupla injeção em suas máquinas e caminhões, valores que denotam a atratividade econômica desta solução.

5.3 Avaliação de impactos ambientais

Para a obtenção dos impactos ambientais da implementação da solução priorizada são utilizadas as premissas e o modelo de cálculo apresentado por Macedo et al (2004). A Figura 64 descreve os dados que darão suporte às análises subsequentes.

Premissas ambientais		
Carbono direto IPCC - 2001 - diesel	(kg C/GJ)	20,2
Emissões - diesel	(kcal/l diesel)	11.414
Emissões - etanol hidratado	(kg CO2 eq./TC)	33,0

Figura 64 – Premissas ambientais**Fonte:** Elaborado pelo autor

Com a taxa de conversão de carbono direto para o diesel, e com os valores energéticos totais das emissões associadas a este combustível, pode-se calcular a emissão em quilogramas de CO2 equivalente por litro de diesel queimado. A Tabela 22 detalha este cálculo.

Tabela 22 – Conversão energética das emissões do diesel

Conversão energética	gC/MJ	gCO2/MJ	gCO2/kJ	gCO2/kcal	kg CO2 Eq/l diesel
Diesel	20,2	74,067	0,074	0,310	3,537

Fonte: Elaborado pelo autor

Em posse dos valores de emissão do diesel e do etanol convencional, passa-se então aos cálculos da redução da pegada de carbono associada à diminuição do uso de diesel, e ao aumento da PC associada ao etanol queimado no sistema de dupla injeção. Os valores obtidos assumem produtividade industrial média de 91,8 litros de etanol por tonelada de cana, e são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Cálculo da pegada de carbono associada à substituição do diesel

Cálculos	Diesel substituído (l diesel/TC)	PC economia de diesel (Kg CO2 Eq/l etanol)	Consumo adicional de etanol (l etanol/TC)	PC adicional de etanol (Kg CO2 Eq/l etanol)
Total	0,661	0,025	0,733	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, através dos cálculos descritos no capítulo 3 deste trabalho, chega-se à pegada de carbono resultante do processo de produção do etanol, caso seja aplicada a dupla injeção nos motores diesel. A Tabela 24 sumariza os valores de PC obtidos para cada um dos cenários, e a consequente redução que estes representam em relação aos valores originais do etanol hidratado.

Tabela 24 – Redução percentual da PC para os cenários 1,2 e 3

Pegada de carbono (PC) (Kg CO2 Eq/l etanol)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Etanol hidratado - convencional	0,359	0,359	0,359
Etanol - solução priorizada	0,348	0,337	0,325
Redução da pegada de carbono	0,011	0,023	0,034
<i>Redução percentual</i>	<i>3,15%</i>	<i>6,33%</i>	<i>9,54%</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

É evidente, desta forma que a implementação da dupla injeção no ciclo produtivo sucroalcooleiro apresenta, além de significativas vantagens econômicas, importantes resultados ambientais, reduzindo, no cenário base, em 6,33% a pegada de carbono atrelada à produção do etanol.

6. Conclusão

O presente projeto de formatura contribui tanto à academia quanto aos diferentes agentes do setor sucroalcooleiro brasileiro, explicitando em detalhes uma abordagem metodológica para mapeamento e avaliação das diferentes alternativas de substituição do diesel na cadeia produtiva do etanol. A condução das atividades de trabalho fundamentou-se em uma extensa revisão bibliográfica, direcionada principalmente a publicações que acrescentassem conhecimentos em relação ao etanol de cana-de-açúcar sob diversas óticas, desde aspectos mercadológicos até especificidades do processo produtivo, em suas fases agrícola, de corte, carregamento, transporte e industrial. Foram enfatizadas as vantagens competitivas brasileiras, proporcionadas pela cultura específica de cana-de-açúcar, que sustentam o pioneirismo do país no desenvolvimento de alternativas combustíveis renováveis. Além disso, os estudos sobre a literatura buscaram relatar como se dá a organização do setor sucroalcooleiro nacional, impulsionado pelas iniciativas do programa Pró-álcool e, mais recentemente, pelo crescimento vertiginoso da oferta de veículos bicompostíveis.

A revisão bibliográfica também inclui discussões acadêmicas em torno do conceito de aquecimento global, destacando os diferentes indicadores ambientais propostos por especialistas e órgãos governamentais. Outro enfoque, de cunho mais tecnológico, foi dado para a descrição técnica dos sistemas de combustão interna, diferenciando os motores ciclo Diesel e ciclo Otto e já apresentando detalhes a respeito de algumas alternativas para troca total ou parcial de óleo diesel por álcool hidratado em motores de combustão a compressão.

A metodologia foi estruturada a partir da escolha de um modelo de gestão do portfólio composto pelas diferentes soluções tecnológicas a serem avaliadas. Decidiu-se pela priorização da solução que melhor se comportasse em relação a dois principais parâmetros: viabilidade de implementação e maturidade tecnológica. No estudo da viabilidade, preferiu-se pela adoção do processo de análise hierárquica (modelo AHP), que facilita a tomada de decisão em contextos com multiplicidade de critérios. Para o mapeamento das diferentes alternativas, buscou-se o contato com uma série de prováveis desenvolvedores de soluções, sendo efetivamente realizadas quatro entrevistas com representantes do meio corporativo. Estas entrevistas culminaram no mapeamento das seguintes soluções:

-
- o processo de Ottorização, que consiste basicamente na alteração mecânica de motores diesel para o incremento de um sistema de ignição por centelha;
 - o sistema de dupla injeção de combustíveis, através de controle eletrônico para sincronização da ação de bicos injetores distintos na combustão a compressão de uma mistura diesel-etanol;
 - o uso de etanol hidratado aditivado com polietilenoglicol, em motores especificamente projetados para tal fim;
 - o abastecimento de motores a compressão com diesel de cana (farneseno), combustível obtido por processo de produção similar ao de etanol, com leveduras de fermentação geneticamente modificadas.

Detalhadas as quatro diferentes técnicas, seis critérios de avaliação foram determinados: aplicabilidade à frota existente, incremento no preço do motor, custo de operação, performance do motor, emissões, e, por último, sustentabilidade – quantidade de diesel substituído. Consolidou-se, assim, a hierarquia para aplicação do modelo AHP. Primeiramente, a análise se deu para a interface entre primeiro e segundo níveis hierárquicos, ou seja, para a ponderação dos critérios em relação ao objetivo de projeto. A partir da constituição de uma matriz de comparação e da normalização desta, obteve-se um vetor de prioridades indicativo da relevância de cada critério na composição da meta principal. O mesmo procedimento de cálculo foi realizado outras seis vezes, para a interface entre segundo e terceiro níveis da hierarquia. Enfim, os termos do vetor final de resultados apontaram para solução tecnológica julgada de maior chance de adoção abrangente no curto prazo: o sistema de dupla injeção. Isto se deve ao fato desta alternativa conciliar bom desempenho nos critérios econômicos, com menores gastos de implementação e operação, e ambientais, com bons índices de emissões nos testes de campo. Por também apresentar relativa maturidade tecnológica, com disponibilidade de exploração comercial em curto prazo (1 a 3 anos), esta solução destacou-se como a principal tendência do setor sucroalcooleiro nos próximos anos, para a substituição do diesel por etanol no maquinário da produção.

Partiu-se, dessa forma, para projeções quantitativas, tanto dos impactos econômicos da adoção do sistema de dupla injeção para os produtores, quanto dos impactos ambientais decorrentes de prováveis reduções na emissão de dióxido de carbono equivalente à atmosfera. Para tanto, elaborou-se um modelo inicial com o intuito de se calcular o consumo de diesel por tonelada de cana nas atividades de operação agrícola e transporte. Após isso, três cenários

foram assumidos para a taxa de substituição do diesel: um base de 50% de substituição, um conservador de 25%, e outro otimista de 75%. Para cada uma das taxas de substituição, utilizando a relação de poder energético entre os combustíveis, pôde-se obter a quantidade total de litros diesel substituída (0,66 litros de diesel por tonelada de cana no cenário base) e a correspondente necessidade suplementar em litros de etanol (0,73 litros de etanol por tonelada de cana para o cenário base).

Os impactos econômicos foram calculados a partir da comparação de gastos com combustíveis para as atividades analisadas, antes e após da implementação da solução de dupla injeção. Assumindo-se um preço de compra do diesel de R\$ 1,82 por litro e um custo de produção de etanol de R\$ 0,75; estimou-se uma economia de R\$ 0,65 por tonelada de cana, para o cenário base, o que representa 23% dos custos totais com combustível antes da adoção da alternativa. Para o cenário conservador os valores obtidos são de R\$ 0,33 (11,5% de economia) e, para o cenário otimista, R\$ 0,98 (34,5% de redução de gastos com combustível).

Para a análise ambiental, a primeira ação de trabalho se deu na conversão dos dados de emissão atribuídos ao diesel para quilogramas de CO₂ equivalente por litro deste combustível. Em posse deste dado, da quantidade substituída de litros de diesel e do valor de produtividade média da usina (91,8 litros de etanol por tonelada de cana), foi possível calcular a redução da pegada de carbono associada à economia deste combustível fóssil (0,025 kg CO₂eq por litro de etanol produzido, para o cenário base). Além disso, calculou-se a pegada de carbono atribuída à queima do etanol suplementar (0,003 kg CO₂eq por litro de etanol produzido, para o cenário base). Uma vez obtidos estes valores de variação da pegada de carbono, pôde-se alcançar um novo resultado para as emissões de dióxido de carbono equivalente na produção de etanol: 0,337 kg CO₂eq por litro de etanol produzido, para o cenário base; 0,348, para o cenário conservador; 0,325, para o cenário otimista. Estes valores representam reduções percentuais de 6,33% (base), 9,54% (conservador); 3,15% (otimista).

Os resultados acima são satisfatórios, principalmente do ponto de vista econômico, com uma redução bastante significativa de custos operacionais para o produtor sucroalcooleiro. Já na análise ambiental os resultados são menos expressivos, devido à presença de outros agentes poluidores que contribuem de forma relevante para as emissões de carbono durante o processo de produção de etanol.

Em suma, os principais objetivos deste trabalho de formatura foram devidamente atendidos, definindo-se um panorama das prováveis alternativas a serem desenvolvidas neste ramo nos próximos anos. Algumas considerações finais, contudo, devem ser feitas em relação

a possíveis limitações da abordagem: a pequena amostra de empresas que se disponibilizaram a participar das entrevistas, a falta de profundidade técnica e de atualidade nos relatos dos entrevistados por questões de confidencialidade, e a ausência de um especialista no setor para a definição dos critérios e avaliação das soluções. Estudos futuros podem explorar, com maior profundidade, as especificidades de cada uma das alternativas e os próximos passos necessários ao desenvolvimento destas. Além disso, podem ser realizados métodos mais sofisticados de estimativa do potencial deste novo mercado, como, por exemplo, modelos financeiros para determinação da rentabilidade dos investimentos requeridos para a implementação destas novas tecnologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E. T.; CARVALHO, S. R. G. & SOUZA, L. F. **Programa do Proálcool e o Etanol no Brasil.** Engevista. Volume 11, 2009, pp. 127-136.
- ANDREOLI, C.; SOUZA, S. P. **Cana-de-açúcar: a melhor alternativa para conversão da energia solar e fóssil em etanol.** Conferência Internacional de AgroEnergia. 2006.
- ANDREWS, A. S. & QUICK, G. R. **Fuel substitution in agriculture.** Energy in Agriculture. Volume 3, 1984, pp. 323-332.
- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2010).** Disponível em <http://www.anfavea.com.br/anuario.html>. Acessado em 26 de Março de 2011.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2009).** Disponível em <http://www.anp.gov.br/?dw=14162>. Acessado em 25 de Março de 2011.
- BAJAY, S. V.; NOGUEIRA, L. A. H. & SOUSA, F. J. R. **O etanol na matriz energética brasileira.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. ÚNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.
- BASAK, I. & SAATY, T. L. **Group decision making using the analytic hierarchy process.** Mathematical Computational Modelling. Volume 17, No 4/5, 1993, pp 101-109.
- BENNERTZ, R. **Completa aí... Com álcool! O Fechamento da Controvérsia sobre o Combustível Automotivo Brasileiro.** Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas, SP, 2009.
- BIOEN – Programa Fapesp de Pesquisa em Bionergia. **Research Partners (2011).** Disponível em http://bioenfapesp.org/index.php?option=com_content&view=section&id=13&Itemid=86&lang=en Acessado em 25 de Março de 2011.
- BOZBURRA, F. T.; BESKESE, A.; KAHRAMAN, C. **Priorization of human capital measurement indicators using fuzzy AHP.** Experiment Systems with Applications. Volume 32, 2007, pp 1100 – 1112.

BP STATISTICAL REVIEW – BP Statistical Review of World Energy June 2010 (2010). Disponível em <http://www.bp.com/statisticalreview>. Acessado em 25 de Março de 2011.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R. & DANTAS, G. A. **A bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

CHIEN, C-F. **A Portfolio-evaluation framework for selecting R&D projects.** R&D Management. Volume 32, 2002, pp. 359-368.

COOPER, R. G.; SCOTT, J. E. & KLEINSCHMIDT, E. J. **New Product Management: practices and Performance.** Journal of Product Innovation Management. Volume 16, 1999, pp. 333-351.

COOPER, R. G.; SCOTT, J. E. & KLEINSCHMIDT, E. J. **Portfolio Management for New Product Development: Results of an Industry Practices Study.** R&D Management. Volume 31, nº 4, 2001.

DA SILVA, A. L. **Energia: estratégias e soberania.** Tese (doutorado) – Universidade de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, 1998.

DERMINBAS, M. F & MUSTAFA, B. **Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: A global perspective.** Energy Conversion and Management. Volume 47, 2006, pp. 2371-2381.

FAPESP – Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo. **Brasil líder mundial em conhecimento e tecnologia de cana e etanol (2007).** Disponível em <http://www.fapesp.br/materia/2919>. Acessado em 25 de Março de 2011.

FAPESP – Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo. **Brazilian Research on Bioenergy (2010).** Disponível em www.fapesp.br/publicacoes/pasta_bioen_jun2010.pdf. Acessado em 25 de Março de 2011.

FARINA, E.; VIEGAS, C.; PAREDA, P. & GARCIA, C. **Mercado e concorrência do etanol.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar.** Piracicaba: EME-STAB, 2003.

GALLI, F. A. **Aplicação de ferramentas para o auxílio na seleção de portfólio de projetos em empresas com projetos de inovação.** Trabalho de Formatura – Escolha Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção. São Paulo, 2007.

GARCIA, J. C. & VON SPERLING, E. **Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais.** Eng. Sanit. Ambient. 2010, vol.15, n.3, pp. 217-222.

GOHAN, L. K. & SHINE, K. P. **Equivalent CO₂ and its use in understanding the climate effects of increased greenhouse gas concentrations.** Weather. Nov 2007, p307-311.

HANSEN, A. C.; LYNE, P. W. & ZHANG, Q. **Ethanol-diesel blends: a step towards a bio-based fuel for diesel engines.** ASAE Meeting Presentation. California, EUA. 2001

HANSEN, A. C.; LYNE, P. W. & ZHANG, Q. **Ethanol-diesel fuel blends – a review.** Bioresource Technology. Volume 96, 2005, pp. 277-285.

HERTWICH, E. G. & PETERS, G. P. **Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-linked Analysis.** Environmental Science Technology. Volume 43, 2009, pp. 6414-6420.

JANK, M. S. **Uma matriz de combustíveis para o Brasil.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. ÚNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

JOSEPH Jr, H. **Etanol: do Proálcool ao Flex Fuel.** Painel Bioenergia: Etanol e Biodiesel. São Paulo, 2006.

KENNY, T. & GRAY, N. F. **Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland.** Environmental Impact Assessment Review. Volume 29, 2009, pp. 1-6.

KWANCHAREON, P.; LUENGNARUEMITCHAI, A. & JAI-IN, S. **Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol, its properties, and its emission characteristics from diesel engine.** Fuel First. Volume 86, 2007, pp. 1053-1061.

LIMA, P. C. R. **Os carros flex fuel no Brasil.** Consultoria Legislativa da Área XII. Câmara dos Deputados. Brasília, DF; 2009.

LOPES, L. A. **Desenvolvimento sustentável: uma análise do álcool como alternativa energética.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, 1999.

LOSEKANN, L. & VILELA, T. **Estimação da frota brasileira de automóveis flex e a nova dinâmica do consumo de etanol no Brasil a partir de 2003.** Infopetro. Julho, 2010.

MACEDO, I. C. **Biomass as a source of energy.** InterAcademy Council study on “Transitions to Sustainable Energy Systems”. 2005.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V. & DA SILVA, J. E. A. R. **Balanço das emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso de etanol no Brasil.** Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo. 2004.

MEIRA Filho, L. G. & MACEDO, I. C. **Contribuição do etanol para a mudança do clima.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário Estatístico da Agroenergia (2009).** Disponível em http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/anuario_cana.pdf. Acessado em 25 de Março de 2011.

MORAES, M. A. F. D.; COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M.; SOUZA, L. G. A. & OLIVEIRA, F. C. R. **Externalidades sociais dos combustíveis.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

MOREIRA, J. R.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; APOLINÁRIO, S. M.; MELO, E. H. & ELMADJIAN, P. H. **Projeto BEST – Bioetanol para o transporte sustentável.** Workshop Scania – Ônibus Movido a Etanol; São Paulo, 2008.

MOURAD, A. L. **Carbon Footprint & as Embalagens Celulósicas.** Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens. Volume 21, nº 3, 2009.

MOURÃO, A. S. O. **Sobre o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL).** Monografia de Conclusão de Curso de Ciências Econômicas da Universidade Estadual de Maringá. 2010.

NASCIMENTO, P. T. S.; YU, A. S. O.; QUINELLO, R.; RUSSO, R. F. M.; NIGRO, F. & LIMA, N. C. **Exogenous Factors in the Development of Flexible Fuel Cars as a Local Dominant Technology.** Journal of Technology Management & Innovation. Volume 4, 2009.

NETO, R. A. P. & CUNHA, R. B. C. **O programa brasileiro de biocombustíveis e as tendências para o futuro.** Espaço Energia. Volume 08, 2008.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. & CONSOLI, M. **O mapa sucroenergético do Brasil.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

NIGRO, F. & SZWARC, A. **O etanol como combustível.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. ÚNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

NORDGREN, L. **Logistics of fuel from ethanol producer to forecourt in Sweden and the Netherlands.** BEST Deliverable. Nº 48, 2007.

PADGETT, J. P.; STEINEMANN, A. C.; CLARKE, J. H. & VANDENBERGH, M. P. **A comparison of carbon calculators.** Environmental Impact Assessment Review. Volume 28, 2008, pp. 106-115.

PAIVA, R. P. O. **Um modelo baseado em seleção e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool.** Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de São Carlos, 2006.

PANG, X.; SHI, X.; MU, Y.; HONG, H.; SHUAI, S.; CHEN, H. & LI, R. **Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel-ethanol-diesel as fuel.** Atmospheric Environment. Volume 40, 2006, pp. 7057-7065.

PIRES, A. & SCHECHTMAN, R. **Políticas internacionais de biocombustíveis.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. ÚNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

PLÁ, J. A. **Perspectivas do biodiesel no Brasil.** Indicadores Econômicos FEE. Volume 30, n. 2, 2002, pp. 179-190.

PUERTO RICO, J. A. **Programa de biocombustíveis no Brasil e na Colômbia: uma análise da implantação, resultados e perspectivas.** Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

RIBEIRO, N. M.; PINTO, A. C.; QUINTELLA, C. M.; ROCHA, G. O.; TEIXEIRA, L. S. G.; GUARIEIRO, L. L. N.; RANGEL, M. C.; VELOSO, M. C. C.; REZENDE, M. J. C.; CRUZ, R. S.; OLIVEIRA, A. M.; TORRES, E. A. & ANDRADE, J. B. **The role of additives for diesel and diesel blend (ethanol or biodiesel) fuels: a review.** Energy & Fuels. Volume 21, 2007, pp. 2433-2445.

SAATY, R. W. **The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used.** Mathl Modeling. Volume 9, No 3-5, 1987, PP 161 – 176.

SAATY, T. L. **How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process.** European Journal of Operational Research. Volume 48. 1990, pp 9 – 26.

SALDIVA, P. H. N.; ANDRADE, M. F.; MIRAGLIA, S. G. El-K. & ANDRÉ, P. A. **O etanol e a saúde.** Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. 2010.

SALLES, E.; ZAMBOTTI, A.; GOUVÊA, A.; ASSIS, A. **An Experimental Study of Diesel-Ethanol Combustion Controlled Electronically.** AEA International Symposium. 2010.

SANTOS, C. T.; FAVARO, F. & PARENTE, V. **Previsão de fabricação de carros bicombustíveis e de demanda de etanol no Brasil em 2014.** Profuturo: Programa de Estudos do Futuro. Volume 3, 2010.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil.** Tese (doutorado) – Universidade de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, 2008.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E. & ROMEIRO, A. **Índices versus Indicadores: Precisões Conceituais na Discussão da Sustentabilidade de Países.** Ambiente & Sociedade. Volume 10, nº 2, 2007, pp. 137-148.

TEIXEIRA, E. C. **O desenvolvimento da tecnologia flex fuel no Brasil.** Instituo DNA Brasil. São Paulo, 2005.

VARGAS, R. V. **Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process - AHP) para selecionar projetos na gestão de portfólio.** PMI Global Congress. 2010.

VAZÓLLER, L. F. R. **Do Proálcool ao Bicombustível: mapeamento da produção científica e tecnológica dos motores a álcool e flex.** Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. Campinas, SP, 2010.

VEIGA, J. E. **Indicadores socioambientais: evolução e perspectivas.** Revista de Economia Política. Volume 29, nº 4, 2009, pp. 421-435.

WANG, W. G.; LYONS, D. W.; CLARK, N. N.; GAUTAM, M. & NORTON, P. M. **Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification.** Environmental Science Technology. Volume 34, 2000, pp. 933-939.

WIEDMANN, T. & MINX, J. **A definition of “Carbon Footprint”.** Ecological Economics Research Trends. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA, Capítulo 1, 2008, pp. 1-11.

YU, A. S. O.; NASCIMENTO, P. T. S.; NIGRO, F. E. B.; FREDERICK, B. W. B.; GATTI Jr, W. & MELLO, K. G. P. C. **Supplier Involvement in Flex-Fuel Technology Development: The General Motors and Volkswagen Brazilian Cases.** PICMET Proceedings, Portland, Oregon, USA. 2009.

ANEXO A – ROTEIRO DE ENTREVISTA COM DESENVOLVEDORES

Pergunta 1

Você conhece alguma iniciativa no desenvolvimento de motores que utilizem etanol no lugar do diesel? Por favor, se possível, descrever

Pergunta 2

Quais destas iniciativas poderiam ser utilizadas no próprio setor sucroalcooleiro? Em quais equipamentos, ou veículos?

Pergunta 3

Qual o rendimento energético esperado dessas iniciativas?

Pergunta 4

Quais são, na sua opinião, os três desenvolvimentos com maior chance de sucesso?

Pergunta 5

Quais os maiores desafios tecnológicos para a conclusão destes projetos?

Pergunta 6

Quais as maiores barreiras econômicas para a substituição do diesel pelo etanol?

ANEXO B – MODELO DE EMAIL DE CONTATO COM DESENVOLVEDORES

Prezado Contato X,

Meu nome é Gabriel Motta. Sou aluno de graduação do curso de engenharia da Escola Politécnica da USP e escrevo para convidar a Empresa X para participar de um estudo que está sendo conduzido na Escola Politécnica.

O objetivo do estudo é analisar a viabilidade econômica e o impacto na redução de emissões de diferentes alternativas para a substituição de diesel por etanol em motores pesados. O foco específico é na aplicação desses novos motores na própria indústria sucroalcooleira (por exemplo, no transporte de cana-de-açúcar entre o campo e as usinas). Os resultados devem indicar o potencial desse mercado.

No momento, estamos realizando entrevistas para levantar as alternativas em desenvolvimento em várias empresas (montadoras, fabricantes de motores, fornecedores de autopeças). Dada a importância da Empresa X como líder de mercado, seria importante considerar a perspectiva da empresa. Nesse sentido, gostaríamos de saber se seria possível realizar uma entrevista de 1 hora com uma pessoa da área de desenvolvimento de motores, com conhecimento de aplicações usando etanol.

A entrevista pode ser realizada por telefone ou presencialmente, conforme a disponibilidade e a preferência. Todos os requisitos de confidencialidade serão cumpridos. Os participantes terão prioridade no acesso aos resultados do trabalho, que será concluído no início de julho/2011.

Estamos à disposição para explicar maiores detalhes e para agendar data/horário adequados. Inicialmente, sugerimos que a conversa seja agendada até 15 de abril.

Aguardo contato e desde já agradecemos o interesse.

Atenciosamente,

Gabriel Motta

ANEXO C – MATRIZES DE COMPARAÇÃO E TABELAS DE CÁLCULO DO MÉTODO AHP

Objetivo: Definição da solução tecnológica mais viável para a substituição do diesel em motores pesados	C1: Aplicabilidad e à frota existente	C2: Incremento no preço do motor	C3: Custo de operação	C4: Performance do motor	C5: Emissões	C6: Sustentabilidade - diesel substituído
	1	1	1/3	1	3	5
C1: Aplicabilidade à frota existente	1	1	1/3	1/3	3	5
C2: Incremento no preço do motor	1	1	1/3	1/3	3	5
C3: Custo de operação	3	3	1	3	5	7
C4: Performance do motor	1	3	1/3	1	3	5
C5: Emissões	1/3	1/3	1/5	1/3	1	3
C6: Sustentabilidade - diesel substituído	1/5	1/5	1/7	1/5	1/3	1
TOTAL	6,53	8,53	2,34	5,87	15,33	26,00

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0,1531	0,1172	0,1423	0,1705	0,1957	0,1923
C2	0,1531	0,1172	0,1423	0,0568	0,1957	0,1923
C3	0,4592	0,3516	0,4268	0,5114	0,3261	0,2692
C4	0,1531	0,3516	0,1423	0,1705	0,1957	0,1923
C5	0,0510	0,0391	0,0854	0,0568	0,0652	0,1154
C6	0,0306	0,0234	0,0610	0,0341	0,0217	0,0385

C1: Aplicabilidade à frota existente	T1 – Ottorização	T2 – Dupla injeção	T3 – Etanol aditivado	T4 – Diesel da cana
T1 – Ottorização	1	3	7	1/3
T2 – Dupla injeção	1/3	1	5	1/3
T3 – Etanol aditivado	1/7	1/5	1	1/9
T4 – Diesel da cana	3	3	9	1
TOTAL	4,48	7,20	22,00	1,78

	T1	T2	T3	T4
T1 – Ottorização	0,2234	0,4167	0,3182	0,1875
T2 – Dupla injeção	0,0745	0,1389	0,2273	0,1875
T3 – Etanol aditivado	0,0319	0,0278	0,0455	0,0625
T4 – Diesel da cana	0,6702	0,4167	0,4091	0,5625

C2: Incremento no preço do motor	T1 – Ottorização	T2 – Dupla injeção	T3 – Etanol aditivado	T4 – Diesel da cana
T1 – Ottorização	1	1	7	1/3
T2 – Dupla injeção	1	1	7	1/3
T3 – Etanol aditivado	1/7	1/7	1	1/9
T4 – Diesel da cana	3	3	9	1
TOTAL	5,14	5,14	24,00	1,78

	T1	T2	T3	T4
T1 – Ottorização	0,1944	0,1944	0,2917	0,1875
T2 – Dupla injeção	0,1944	0,1944	0,2917	0,1875
T3 – Etanol aditivado	0,0278	0,0278	0,0417	0,0625
T4 – Diesel da cana	0,5833	0,5833	0,3750	0,5625

C3: Custo de operação	T1 – Ottorização	T2 – Dupla injeção	T3 – Etanol aditivado	T4 – Diesel da cana
T1 – Ottorização	1	1/3	5	1
T2 – Dupla injeção	3	1	9	5
T3 – Etanol aditivado	1/5	1/9	1	1/3
T4 – Diesel da cana	1	1/5	3	1
TOTAL	5,20	1,64	18,00	7,33

	T1	T2	T3	T4
T1 – Ottorização	0,1923	0,2027	0,2778	0,1364
T2 – Dupla injeção	0,5769	0,6081	0,5000	0,6818
T3 – Etanol aditivado	0,0385	0,0676	0,0556	0,0455
T4 – Diesel da cana	0,1923	0,1216	0,1667	0,1364

C5: Performance do motor	T1 – Ottorização	T2 – Dupla injeção	T3 – Etanol aditivado	T4 – Diesel da cana
T1 – Ottorização	1	1/7	1/5	1/5
T2 – Dupla injeção	7	1	3	1
T3 – Etanol aditivado	5	1/3	1	1
T4 – Diesel da cana	5	1	1	1
TOTAL	18,00	2,48	5,20	3,20

	T1	T2	T3	T4
T1 – Ottorização	0,0556	0,0577	0,0385	0,0625
T2 – Dupla injeção	0,3889	0,4038	0,5769	0,3125
T3 – Etanol aditivado	0,2778	0,1346	0,1923	0,3125
T4 – Diesel da cana	0,2778	0,4038	0,1923	0,3125

C5: Emissões	T1 – Ottorização	T2 – Dupla injeção	T3 – Etanol aditivado	T4 – Diesel da cana
T1 – Ottorização	1	1/3	1/7	1/7
T2 – Dupla injeção	3	1	1/3	1/3
T3 – Etanol aditivado	7	3	1	1/3
T4 – Diesel da cana	7	3	3	1
TOTAL	18,00	7,33	4,48	1,81

	T1	T2	T3	T4
T1 – Ottorização	0,0556	0,0455	0,0319	0,0789
T2 – Dupla injeção	0,1667	0,1364	0,0745	0,1842
T3 – Etanol aditivado	0,3889	0,4091	0,2234	0,1842
T4 – Diesel da cana	0,3889	0,4091	0,6702	0,5526

C6: Sustentabilidade - diesel substituído	T1 – Ottorização	T2 – Dupla injeção	T3 – Etanol aditivado	T4 – Diesel da cana
T1 – Ottorização	1	5	1	7
T2 – Dupla injeção	1/5	1	1/3	1
T3 – Etanol aditivado	1	3	1	5
T4 – Diesel da cana	1/7	1	1/5	1
TOTAL	2,34	10,00	2,53	14,00

	T1	T2	T3	T4
T1 – Ottorização	0,4268	0,5000	0,3947	0,5000
T2 – Dupla injeção	0,0854	0,1000	0,1316	0,0714
T3 – Etanol aditivado	0,4268	0,3000	0,3947	0,3571
T4 – Diesel da cana	0,0610	0,1000	0,0789	0,0714

ANEXO D – MODELO DE ANÁLISE DE IMPACTOS

Aba de Equipamentos

1. Equipamentos agrícolas

Nº	Equipamento	Pot. cv	Implementos	Cap.Trab. (ha/h)	Consumo (l diesel/h)
1	MF 290	78	Carreta distribuidora de calcário	1,61	6,00
2	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	1,30	27,60
3	CAT D-6	165	Subsolador de 5 hastas	1,00	26,00
4	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	1,35	27,60
5	Valmet 1780	165	Grade leve 48 D x 20"	1,60	15,00
6	MF 680	170	Sulcador adubador duplo	1,10	15,00
7	MF 275	69	Carreta para plantio	0,60	4,00
8	MF 275	69	Cobridor de cana de 2 linhas	1,80	4,80
9	MF 275	69	Bomba de herbicida	2,50	4,00
10	MF 292	104	Cultivador para quebra do meio	1,30	8,00
11	MF 275	69	Aleirador de palha	1,50	4,00
12	Valmet 1580	143	Cultivador tríplice operação	1,30	9,20
13	Valmet 1580	143	Eliminador mecânico de soqueira	1,10	12,20
14	Case A-7700	330	Colhedora de cana combinada	45 t/h	40,40
15	MF 290 RA	78	Carregadora de cana	46 t/h	7,10
16	MB 2318	180	Transp. de cana (truck = 8%)	2,2 km/l	-
17	MB 2325	250	Transp. de cana (RJ = 25%)	1,6 km/l	-
18	Volvo	360	Transp. de cana (trem.rodot. = 67%)	1,2 km/l	-
19	MB 2318	180	Basculante	2,5 km/l	-
20	MB 2213	130	Carroceria transporte de adubo	2,5 km/l	-
21	MB 2318	180	Transporte de vinhaça (truck)	2,2 km/l	-
22	MB 2220	200	Transporte de vinhaça (RJ)	2 km/l	-
23	Volvo	360	Transporte de vinhaça (rodotrem)	1,3 km/l	-
24	Motobomba	120	Aplic. de vinhaça (aspersão/cam. aspersão)	120 m ³ /h	14,00
25	Valtra BH	180	Reboque de julieta/transbordo	35 t/h	9,00

Aba Agrícola

0. Sumário

Ciclo	(anos)	6
Produtividade agrícola média	(TC/ha.ano)	68,7

Consumo Agrícola (l diesel/TC) 0,796

Consumo Operações Agrícolas (l diesel/TC) 0,343

a. Cana - Planta

Consumo específico	(l diesel/TC)	0,254
Fator de Aplicação	(l diesel/TC)	1,494
		17%

b. Cana - Soca

Consumo específico	(l diesel/TC)	0,089
Fator de Aplicação	(l diesel/TC)	0,133
		67%

Consumo Colheita (l diesel/TC) 0,453

c. Colheita Mecânica

Consumo específico	(l diesel/TC)	0,367
Participação na colheita	(l diesel/TC)	1,263
Fator de Aplicação	(l diesel/TC)	35%
	(l diesel/TC)	83%

d. Colheita Manual

Consumo específico	(l diesel/TC)	0,087
Participação na colheita	(l diesel/TC)	0,1605
Fator de Aplicação	(%)	65%
	(%)	83%

1. Consumo - Operações agrícolas

a. Preparo de Solo e Plantio

Nº	Preparo de Solo e Plantio	Nº Equip.	Cap.T rab. (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Aplicação de calcário	1	1,61	3,73	1,00	0,054
2	Eliminação mecânica de soqueira	13	1,10	11,09	0,30	0,048
3	Eliminação química de soqueira	9	2,50	1,60	0,30	0,007
4	Gradagem pesada I	2	1,30	21,23	0,90	0,278
5	Subsolagem	3	1,00	26,00	0,70	0,265
6	Gradagem pesada II	4	1,35	20,44	0,70	0,208
7	Gradagem pesada III	4	1,35	20,44	0,30	0,089
8	Gradagem de acabamento	5	1,60	9,38	0,90	0,123
9	Sulcação e adubação	6	1,10	13,64	1,00	0,199
10	Distribuição de mudas	7	0,60	6,67	1,00	0,097
11	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	8	1,80	2,67	1,00	0,039
12	Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	1,00	0,023
13	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	10	1,30	6,15	0,70	0,063
						1,494

b. Tratos de cana soca

Nº	Tratos de cana soca	Nº Equip.	Cap.T rab. (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Aleiramento de palha	11	1,50	2,67	0,25	0,010
2	Cultivo tríplice operação	12	1,30	7,08	1,00	0,103
3	Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	0,85	0,020
						0,133

2. Consumo - Colheita

Nº	Colheita	Nº Equip.	Capacidade (ha/h)	Consumo específico (l diesel/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Colhedora Case	14	0,55	74,00	1,00	1,078
2	Carregadora Santal	15	0,56	12,70	0,20	0,037
3	Reboque de Julieta/Trasbordo	25	0,42	21,20	0,60	0,185

a. Colheita Mecânica

Consumo na colheita	(l diesel/ha) 1,263
Consumo no reboque e transbordo	(l diesel/ha) 74

b. Colheita Manual

Consumo na colheita	(l diesel/ha) 0,160
Consumo no reboque e transbordo	(l diesel/ha) 2,54

Aba Transporte

0. Sumário			
Ciclo		(anos)	6
Produtividade agrícola média		(TC/ha.ano)	68,7
Consumo Transporte		(l diesel/TC)	0,764
a. Transporte de Cana		(l diesel/TC)	0,628
Consumo específico		(l diesel/TC)	0,628
Participação		(%)	100%
Fator de Aplicação		(%)	100%
b. Transporte de Mudas		(l diesel/TC)	0,043
Consumo específico		(l diesel/TC)	0,253
Participação		(%)	100%
Fator de Aplicação		(%)	17%
c. Torta de Filtro		(l diesel/TC)	0,007
Consumo específico		(l diesel/TC)	0,140
Participação		(%)	30%
Fator de Aplicação		(%)	17%
d. Vinhaça		(l diesel/TC)	0,0723
Consumo específico		(l diesel/TC)	0,3595
Participação		(%)	30%
Fator de Aplicação		(%)	67%
e. Adubo		(l diesel/TC)	0,0135
Consumo específico		(l diesel/TC)	0,0233
Participação		(%)	70%
Fator de Aplicação		(%)	83%

1. Transporte de Cana

Nº	Operações	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/TC.km)	Trajeto médio (km)	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Transporte de Cana - Rodotrem	18	1,10	0,0157	40,00	0,628

2. Transporte de Mudas

Nº	Operações	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/km)	Trajeto médio (km/ha)	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Transporte de Muda - Truck	16	2,30	0,4348	40,00	0,253

3. Torta de Filtro

Nº	Operações	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/km)	Trajeto médio (km/ha)	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Basculante	19	2,50	0,4000	24,00	0,140

4. Vinhaça

Nº	Operações	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/m3)	Trajeto médio (m3/ha)	Fração da área trab.	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Transporte de vinhaça (truck)	21	2,20	0,4242	100,00	0,060	0,037
2	Transporte de vinhaça (rodotrem)	23	1,30 <i>(m3/h)</i>	0,3077	100,00	0,310	0,139
3	Aplic. de vinhaça (aspersão)	24	120,00	0,1333	150,00	0,630	0,183

5. Adubo

Nº	Operações	Nº Equip.	Cap.Trab. (km/l diesel)	Consumo específico (l diesel/km)	Trajeto médio (km/ha)	Consumo Total (l diesel/TC)
1	Transporte de adubo	20	2,50	0,4000	4,00	0,023

Aba Impactos

Premissas			Simulação	
Produtividade agrícola média	(TC / hectare)	68,7		
Produtividade industrial média - etanol hidratado	(l etanol/TC)	91,8	Cenário 1	
Taxa de Substituição Agrícola	(% da Tx Base)	70%		
Taxa de Substituição Transporte	(% da Tx Base)	100%		
Cenários				
Cenário 1	Tx de Substituição	25%		
Cenário 2	Tx de Substituição	50%		
Cenário 3	Tx de Substituição	75%		
Rendimento	PCI (MJ/kg)	Densidade (kg/l)	PCI (MJ/l)	
Diesel	42,3	1,174	36,040	
Etanol	26,4	0,810	32,593	
Consumo	Tx de Substituição		Diesel substituído	Consumo adicional de etanol (l etanol/l diesel)
	(l diesel/TC)	(%)	(l diesel/TC)	(l etanol/TC)
Agrícola	0,796	18%	0,139	0,155
Transporte	0,764	25%	0,191	0,212

1. Impactos Ambientais

Premissas ambientais					
Carbono direto IPCC - 2001 - diesel	(kg C/GJ) 20,2				
Emissões - diesel	(kcal/l diesel) 11.414				
Emissões - etanol hidratado	(kg CO2 eq./TC) 33,0				
Conversão energética	gC/MJ	gCO2/MJ	gCO2/kJ	gCO2/kcal	Kg CO2 Eq/l diesel
Diesel	20,2	74,067	0,074	0,310	3,537
Pegada de carbono (PC) (Kg CO2 Eq/l etanol)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3		
Etanol hidratado - convencional	0,359	0,359	0,359		
Etanol - solução priorizada	0,348	0,337	0,325		
Redução da pegada de carbono	0,011	0,023	0,034		
<i>Redução percentual</i>	<i>3,15%</i>	<i>6,33%</i>	<i>9,54%</i>		
Cálculos	Diesel substituído (l diesel/TC)	PC economia de diesel (Kg CO2 Eq/l etanol)	Consumo adicional de etanol (l etanol/TC)	PC adicional de etanol (Kg CO2 Eq/l etanol)	
Total	0,330	0,013	0,367	0,001	

2. Impactos Econômicos

Premissas econômicas

Preço do diesel na usina	(R\$/ l diesel)	1,82
Custo de produção do etanol	(R\$/ l etanol)	0,75

Custos com combustíveis (R\$/TC)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Diesel - Integral	2,840	2,840	2,840
Economia	0,326	0,652	0,979
<i>Economia Percentual</i>	<i>11,5%</i>	<i>23,0%</i>	<i>34,5%</i>

Cálculos	Diesel substituído (l diesel/TC)	Coeficiente de economia (R\$/l diesel subs)	Economia (R\$/TC)
Total	0,330	0,99	0,326