



Estudo da Eficiência de Combustão em Sistema de Monitoração e Supervisão de uma Caldeira

Caio Tödling Moscoso
Leonardo Gradin Queiroz

Projeto Final de Curso

Orientadores:

Prof^a. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Prof^a. Belkis Valdman, Ph.D.

Andrea Valdman, M.Sc.

Julho de 2011

Estudo da Eficiência de Combustão em Sistema de Monitoração e Supervisão de uma Caldeira

Caio Tödling Moscoso
Leonardo Gradin Queiroz

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Andréa Medeiros Salgado, D.Sc.

Caetano Moraes, Ph.D.

Luiz Henrique de Oliveira Bispo, M.Sc.

Orientado por:

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Belkis Valdman, Ph.D.

Andrea Valdman, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Julho de 2011

Moscoso, Caio Tödling; Queiroz, Leonardo Gradin; Estudo da Eficiência de Combustão em Sistema de Monitoração e Supervisão de uma Caldeira/ Caio Tödling Moscoso e Leonardo Gradin Queiroz. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011. x, 89 p; il. (Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Rossana Folly, Belkis Valdman e Andrea Valdman

1. Caldeira. 2. Eficiência de Caldeira. 3. Biodiesel. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Rossana Folly, Belkis Valdman e Andrea Valdman.

I. Estudo da Eficiência de Combustão em Sistema de Monitoração e Supervisão de uma Caldeira

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Prof^a. Rossana Folly, à Prof^a. Belkis Valdman e à Andrea Valdman pela orientação cuidadosa e pela presteza nos esclarecimentos de quaisquer questões referentes a este projeto. Agradecemos também a todos os funcionários do Laboratório do Departamento de Engenharia Química (LADEQ) da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, cujo auxílio inestimável muito contribuiu para realização deste trabalho.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Estudo da Eficiência de Combustão em Sistema de Monitoração e Supervisão de uma Caldeira

Caio Tödling Moscoso
Leonardo Gradin Queiroz

Julho, 2011

Orientadores: Prof^a. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.
Prof^a. Belkis Valdman, Ph.D.
Andrea Valdman, M.Sc.

Em consonância com a tendência mundial de redução dos impactos ambientais e da dependência de derivados do petróleo, os investimentos em processos de tecnologia limpa têm se mostrado como uma proposta promissora para mitigar a poluição atmosférica e promover a utilização de fontes renováveis de energia. Nesse sentido, a utilização de biodiesel como combustível substituto ou ainda a sua incorporação como aditivo em misturas diesel/biodiesel vêm sendo alternativas usualmente adotadas em diversos setores da economia.

O presente trabalho se propõe a realizar o estudo da eficiência de uma caldeira flamotubular de pequeno porte da Central de Utilidades do Laboratório do Departamento de Engenharia Química (LADEQ) da Escola de Química da UFRJ, quando da operação com misturas diesel/biodiesel e diferentes porcentagens de excesso de ar de combustão. A metodologia empregada compreendeu cálculos *offline* e *online* da eficiência segundo o Método das Perdas, o qual considera as perdas e créditos de calor sensível inerentes à operação da caldeira, e o poder calorífico do combustível.

O cálculo *offline* da eficiência foi precedido do desenvolvimento de um algoritmo em VBA/Excel, cujas variáveis de entrada correspondem a características do combustível utilizado, do ar e do gás de combustão. As variáveis de saída obtidas correspondem à eficiência e às perdas e créditos de calor sensível oriundos do processo de operação da caldeira. O cálculo *online* da eficiência foi efetuado mediante um algoritmo desenvolvido em VBA/SCADA, no sistema SCADA iFix Proficy[®], que possibilitou a monitoração *online* da eficiência.

Por fim, o algoritmo desenvolvido em VBA/Excel permitiu a validação do Método das Perdas e o algoritmo desenvolvido em VBA/SCADA propiciou a avaliação da eficiência continuamente, em intervalos de 10 segundos.

ÍNDICE

Capítulo I. Introdução e Objetivo.....	1
Capítulo II. Revisão Bibliográfica	3
II.1. Combustão	3
II.2. Combustíveis.....	5
II.3. Óleo Diesel	6
II.3.1. Processos de Obtenção do Óleo Diesel.....	10
II.3.2. Propriedades do Óleo Diesel.....	10
II.3.3. Emissões Provocadas pela Combustão do Óleo Diesel	13
II.3.4. Óleo Diesel de Uso Rodoviário	15
II.4. Biodiesel	16
II.4.1. Matérias-primas utilizadas para Obtenção de Biodiesel.....	16
II.4.2. Reação de Obtenção do Biodiesel	18
II.4.3. Propriedades do Biodiesel	19
II.4.4. Emissões Provocadas pela Combustão do Biodiesel	20
II.5. Caldeiras	21
II.5.1. Caldeiras Flamotubulares ou Fogotubulares.....	21
II.5.2. Caldeiras Aquatubulares	22
II.5.3. Instrumentação aplicada às Caldeiras	23
Capítulo III. Metodologia	26
III.1. Planta Piloto	26
III.2. Testes Experimentais	32
III.3. Cálculo de Eficiência da Caldeira	34
III.3.1. Cálculo da Perda de Calor Sensível pelos Gases.....	38
III.3.2. Cálculo da Perda de Calor Sensível pelos Gases devido à Água	40
III.3.3. Cálculo da Perda de Calor pelas Paredes	41
III.3.4. Crédito devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão	41
III.3.5. Crédito devido ao Calor Sensível do Combustível	42
III.3.6. Crédito devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão ..	43
III.4. Metodologia para Análise de Resultados	43
Capítulo IV. Resultados.....	46

IV.1. Análise das Propriedades Físicas e Químicas das Misturas Diesel/Biodiesel.....	46
IV.1.1. Densidade.....	50
IV.1.2. Teor de Enxofre.....	51
IV.1.3. Teor de Nitrogênio.....	52
IV.1.4. Teor de Carbono.....	53
IV.1.5. Teor de Hidrogênio.....	54
IV.1.6. Teor de Água.....	55
IV.1.7. Poder Calorífico Inferior.....	56
IV.2. Análise das Variáveis de Saída do Algoritmo de Cálculo da Eficiência..	57
IV.2.1. Perda de Calor Sensível pelos Gases.....	59
IV.2.2. Perda de Calor Sensível pelos Gases devido à Água.....	61
IV.2.3. Crédito devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão.....	63
IV.2.4. Crédito devido ao Calor Sensível do Combustível.....	65
IV.2.5. Crédito devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão..	67
IV.2.6. Eficiência.....	69
IV.3. Cálculo de Eficiência em Sistema SCADA.....	71
IV.3.1. Desenvolvimento da Interface Aplicada.....	71
IV.3.2. Resultados Comparativos entre o Algoritmo <i>Online</i> e <i>Offline</i>	73
Capítulo V. Conclusão.....	79
Referências.....	81
Anexo I: Especificações do Óleo Diesel de Uso Rodoviário.....	84
Anexo II: Especificações do Biodiesel.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de Diesel no Brasil (em milhões de m ³) (adaptado de CNT (2008)).....	7
Figura 2 – Consumo de Diesel no Setor de Transportes (em milhões de m ³) (adaptado de CNT (2008))	8
Figura 3 – Reação de transesterificação (adaptado de KNOTHE <i>et al</i> (2006))	18
Figura 4 – Caldeira Flamotubular (adaptado de BIZZO (2003))	22
Figura 5 – Caldeira Aquatubular (adaptado de BIZZO (2003)).....	23
Figura 6 – Planta Piloto da Central de Utilidades do LADEQ	26
Figura 7 – Diagrama P & I da Caldeira.....	28
Figura 8 – Fluxograma de Cálculo da Eficiência da Caldeira	35
Figura 9 – Etapas do Algoritmo para Cálculo da Eficiência da Caldeira	44
Figura 10 – Interface do programa desenvolvido em VBA/Excel	45
Figura 11 – Gráfico da Densidade versus Porcentagem de Biodiesel	50
Figura 12 – Gráfico do Teor de Enxofre versus Porcentagem de Biodiesel.....	51
Figura 13 – Gráfico do Teor de Nitrogênio versus Porcentagem de Biodiesel .	52
Figura 14 – Gráfico do Teor de Carbono versus Porcentagem de Biodiesel....	53
Figura 15 – Gráfico do Teor de Hidrogênio versus Porcentagem de Biodiesel	54
Figura 16 – Gráfico do Teor de Água versus Porcentagem de Biodiesel	55
Figura 17 – Gráfico do Poder Calorífico Inferior versus Porcentagem de Biodiesel.....	56
Figura 18 – Gráfico da Perda P1 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)	59
Figura 19 – Gráfico da Perda P1 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)	59
Figura 20 – Gráfico da Perda P1 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)	60
Figura 21 – Gráfico da Perda P2 versus Porcentagem de Biodiesel (30% Excesso de Ar)	61
Figura 22 – Gráfico da Perda P2 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)	61
Figura 23 – Gráfico da Perda P2 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)	62
Figura 24 – Gráfico do Crédito C1 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)	63
Figura 25 – Gráfico do Crédito C1 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)	63
Figura 26 – Gráfico do Crédito C1 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)	64
Figura 27 – Gráfico do Crédito C3 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)	65
Figura 28 – Gráfico do Crédito C3 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)	65

Figura 29 – Gráfico do Crédito C3 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)	66
Figura 30 – Gráfico do Crédito C4 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)	67
Figura 31 – Gráfico do Crédito C4 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)	67
Figura 32 – Gráfico do Crédito C4 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)	68
Figura 33 – Gráfico de EPCI versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)	69
Figura 34 – Gráfico de EPCI versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)	69
Figura 35 – Gráfico de EPCI versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)	70
Figura 36 – Interface do Sistema SCADA iFix Proficy® para Monitoração <i>online</i> da Eficiência da Caldeira.....	71
Figura 37 – Gráfico da Perda P1 versus Tempo	73
Figura 38 – Gráfico da Perda P2 versus Tempo	74
Figura 39 – Gráfico do Crédito C1 versus Tempo	75
Figura 40 – Gráfico do Crédito C3 versus Tempo	76
Figura 41 – Gráfico do Crédito C4 versus Tempo	77
Figura 42 – Gráfico de EPCI versus Tempo.....	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de Combustíveis no Setor de Transportes (%)	8
Tabela 2 – Consumo de Combustíveis na Indústria Química (em 10 ³ tep)	9
Tabela 3 – Consumo de Combustíveis na Indústria Química (%)	9
Tabela 4 – Panorama da Contribuição de Gases para o Efeito Estufa	14
Tabela 5 – Comparação dos Preços de Biodiesel e Diesel	16
Tabela 6 – Características das Oleaginosas	17
Tabela 7 – Propriedades de Alcoóis (C1 a C4)	18
Tabela 8 – Propriedades de Óleos Vegetais, Biodiesel e Diesel	19
Tabela 9 – Especificações técnicas da Caldeira (Modelo CV-VDM-500)	29
Tabela 10 – Variáveis de Medição Contínua disponíveis na Instrumentação <i>fieldbus</i> da Caldeira	30
Tabela 11 – Variáveis de Medição Discreta disponíveis na Instrumentação Analógica/CLP/ <i>fieldbus</i> da Caldeira	31
Tabela 12 – Variáveis Calculadas Contínuas e Variáveis Informadas ao Sistema SCADA da Caldeira	31
Tabela 13 – Testes Realizados na Caldeira	33
Tabela 14 – Variáveis de Entrada	36
Tabela 15 – Variáveis Intermediárias	37
Tabela 16 – Variáveis de Saída	37
Tabela 17 – Constantes para cálculo de H_{comp}	40
Tabela 18 – Análises das Propriedades Físicas e Químicas das Misturas Diesel/Biodiesel Realizadas em Laboratório	47
Tabela 19 – Valores das Variáveis de Saída do Algoritmo de Cálculo da Eficiência	58
Tabela 20 – Dados do Analisador (iFix Proficy®)	72
Tabela 21 – Variáveis de Saída (iFix Proficy®)	72

Capítulo I. Introdução e Objetivo

O agravamento da poluição atmosférica ocasionado pelo uso excessivo de combustíveis fósseis evidenciou a necessidade de investimentos em processos de tecnologia limpa e de adoção de políticas governamentais fundamentadas no desenvolvimento sustentável. Ademais, as duas grandes crises do petróleo ocorridas na década de 70 promoveram a busca por fontes renováveis de energia e a tentativa de substituição de derivados de petróleo na matriz energética mundial.

A preponderância do modal rodoviário no transporte brasileiro teve como consequência um alto consumo nacional de óleo diesel – segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o país consumiu em média 40 bilhões de litros anuais de óleo diesel entre 2000 e 2010. Adicionalmente, a média anual de importação de óleo diesel, no mesmo período, foi de 5 bilhões de litros (ANP, 2010).

Todavia, uma alternativa para diminuição das emissões de gases de efeito estufa e de material particulado, bem como para redução da demanda nacional de óleo diesel, vem sendo a incorporação de biodiesel como aditivo em misturas comerciais diesel/biodiesel, no setor de transportes. O biodiesel também pode atuar como combustível substituto nos setores agropecuário e de geração de energia elétrica.

O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), instituído em 2004, apresenta como principais diretrizes a inclusão social; a garantia de preços competitivos, de qualidade e de suprimento para o biodiesel; e a produção de biodiesel mediante diferentes fontes oleaginosas e em regiões diversas. Inicialmente, o programa inseriu o biodiesel no cenário de combustíveis com a adição de biodiesel ao diesel na proporção de 2% (v/v) de biodiesel (B2), por meio da lei 11.097, de janeiro de 2005, e do decreto 5.448, de maio de 2005. Essa porcentagem aumentou gradativamente até que, a partir de 2010, a mistura B5 passou a ser comercializada.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta como objetivo o estudo da eficiência de uma caldeira flamotubular de pequeno porte localizada na Central de Utilidades do Laboratório do Departamento de Engenharia Química (LADEQ), quando da utilização de misturas diesel/biodiesel e sob a operação com diferentes porcentagens de excesso de ar de combustão. A metodologia desenvolvida permitiu o cálculo da eficiência *offline*, utilizando dados armazenados em histórico de testes realizados na caldeira, e *online*, mediante o uso de um sistema de monitoração e supervisão da caldeira.

Dessa forma, os principais objetivos desse trabalho são:

- Levantamento das propriedades físicas e químicas de misturas diesel/biodiesel em diferentes proporções;
- Levantamento de dados de histórico das variáveis de processo dos testes experimentais anteriores realizados na caldeira do LADEQ, utilizando misturas diesel/biodiesel em diferentes proporções;
- Aplicação da metodologia sugerida pela *American Society of Mechanical Engineers (ASME)* para o cálculo da eficiência da caldeira; e
- Aplicação de algoritmo para cálculo *online* da eficiência.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma, no capítulo 2 é exibida uma revisão bibliográfica acerca da reação de combustão e dos possíveis tipos de combustíveis, ressaltando-se o óleo diesel e o biodiesel, bem como são apresentados os tipos e o funcionamento de caldeiras. No capítulo 3, detalha-se a metodologia baseada no Método das Perdas que foi utilizada para cálculo da eficiência da caldeira do LADEQ. No capítulo 4 são relatados os resultados obtidos e as discussões pertinentes. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas conclusões e sugestões relevantes para trabalhos futuros.

Capítulo II. Revisão Bibliográfica

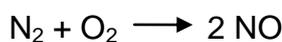
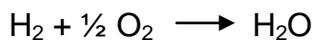
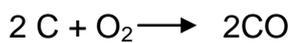
A combustão é amplamente utilizada em uma grande variedade de processos industriais que envolvem a queima de combustíveis em fornos e caldeiras, tais como as indústrias do ferro, aço, alumínio, vidro, cimento e cerâmica, entre outras. A generalidade dos modos de transporte atuais recorre, quase exclusivamente, à combustão como fonte energética através da queima de combustíveis em motores de combustão interna ou turbinas a gás. Vale ressaltar, também, a importância da combustão na incineração de resíduos industriais ou ainda no fornecimento da energia necessária ao aquecimento em edifícios.

Entretanto, da reação de combustão resultam compostos nocivos à saúde humana e causadores do efeito estufa, cuja composição química está relacionada com o tipo de combustível. O carvão, usado em grande escala nas centrais termoeletricas, é o combustível potencialmente mais poluente, no tocante à emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre, material particulado e metais pesados. As tecnologias para a remoção destes poluentes dos produtos de combustão são, em geral, extremamente caras e impõem custos de manutenção elevados. A formação de óxidos de nitrogênio pode, no entanto, ser reduzida alterando a configuração de queimadores e fornalhas. Adicionalmente, os tipos de combustão influem na segurança de muitos processos industriais.

II.1. Combustão

A combustão ou queima é um caso particular de reação de oxidação, de caráter exotérmico, onde o agente redutor é chamado de combustível e o agente oxidante, usualmente o oxigênio proveniente do ar, é chamado de comburente.

As reações básicas de combustão são:



O fenômeno de combustão pode ser dividido em quatro eventos que acontecem em sequência, iniciando-se pela ignição da mistura, desenvolvimento ou formação de uma chama, propagação ou deslocamento, e término ou extinção da chama (VIVAS, 2010).

A reação de combustão pode ser classificada segundo dois critérios: velocidade de reação e extensão de reação. Quanto à velocidade de reação, a combustão pode ocorrer de quatro formas: combustão lenta, combustão viva, deflagração e explosão.

A combustão lenta ocorre quando a temperatura é baixa, geralmente abaixo de 500 °C, não havendo produção de chamas. É o caso da formação de ferrugem e da respiração celular.

A combustão viva acontece de maneira mais rápida, se comparada com a combustão lenta, promovendo a formação de chamas ou incandescência. As chamas constituem uma mistura de gases combustíveis ou vapores de líquidos combustíveis com o ar; por outro lado, a incandescência se restringe à combustão viva de sólidos e se manifesta pelo aparecimento de sinais luminosos ao longo dos mesmos.

A deflagração é a designação atribuída à combustão que apresenta velocidade subsônica. Nesse caso uma diferença de pressão de 8:1 se estabelece entre reagentes e produtos. Um exemplo dessa reação é a queima da pólvora utilizada em armamentos.

A explosão é uma forma muito agressiva de combustão, cuja velocidade é superior à velocidade do som. Nesse caso, a pressão atinge valores aproximadamente 40 vezes maiores que os valores da pressão da mistura reagente.

A reação de combustão pode ser classificada quanto à sua extensão como combustão completa ou combustão incompleta. Na combustão completa, obtém-se um número limitado de produtos. Quando o combustível é um hidrocarboneto, os produtos são dióxido de carbono e água. Em se tratando de nitrogênio e enxofre, essa reação produz os dióxidos de nitrogênio e enxofre, respectivamente. A combustão completa é incomum, sendo possível apenas em situações de controle minucioso da reação, como ocorre em um laboratório.

Em contrapartida, a combustão incompleta ocorre na insuficiência do suprimento de oxigênio necessário à combustão completa, originando uma grande variedade de produtos como, por exemplo: dióxido de carbono, monóxido de carbono, água, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio. Esse tipo de combustão é o mais freqüente e compreende os processos de combustão industrial.

A combustão é um fenômeno que consiste de vários estágios, cuja extensão depende de vários fatores, a saber: o combustível, o grau de mistura com o oxigênio, a geometria e tamanho do vaso de contenção, temperatura, pressão etc (GARCIA, 2002). Outro aspecto importante é a observância do limite inferior de inflamabilidade (LII) e do limite superior de inflamabilidade (LSI) do combustível.

O LII e o LSI correspondem respectivamente às frações volumétricas (ou porcentagem em volume) mínimas e máximas de combustível em uma mistura comburente que quando submetida a uma fonte de ignição provoca uma combustão auto-sustentada (VIVAS, 2010). De forma simplificada, estes conceitos estabelecem que um requisito mínimo para o desencadeamento da queima é a mistura comburente apresentar concentração de combustível no intervalo de inflamabilidade – isto é, acima do LII e abaixo do LSI.

O aumento da temperatura da mistura, normalmente, alarga a faixa de inflamabilidade. Quando a temperatura é aumentada a níveis elevados, atinge-se a temperatura de auto-ignição, na qual ocorre a combustão espontânea (GARCIA, 2002).

O aumento da pressão praticamente não exerce influência sobre o LII; ao passo que, implica progressivo aumento do LSI. Portanto, as misturas podem tornar-se inflamáveis com a elevação da pressão (GARCIA, 2002).

II.2. Combustíveis

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), os combustíveis são produtos utilizados com a finalidade de liberar energia diretamente a partir da sua queima ou pela sua transformação em outros produtos também combustíveis (ANP, 2011).

O combustível pode ser líquido, sólido ou gasoso, porém a grande maioria precisa passar pelo estado gasoso para se combinar com oxigênio. A passagem de um combustível sólido para o estado gasoso dar-se-á pela pirólise, que é a decomposição química através do calor. Para um combustível líquido essa passagem dar-se-á pela vaporização (ARNDT, 2008).

Os combustíveis sólidos são utilizados como fonte de energia em fornos e fornalhas que são aparelhos em que o material é aquecido sob condições controladas, cujas condições podem ser velocidade de chama, temperatura máxima, temperatura de aquecimento, rapidez de esfriamento, controle da atmosfera etc. No Brasil, os combustíveis sólidos mais utilizados são o carvão mineral e a lenha. O carvão mineral está restrito a região sul, onde é utilizado principalmente na produção de energia termoelétrica e na indústria de cimento. Devido ao seu alto teor de cinzas e enxofre, o carvão não é muito utilizado

industrialmente quando fica longe das minas produtoras. A lenha é um combustível amplamente utilizado na área industrial e doméstica. Na indústria, seu uso se destina à geração de vapor, principalmente em pequenas unidades produtoras. Outra característica importante é o seu baixo teor de cinzas, ausência total de enxofre e umidade variável, que depende do método de armazenagem. Outros exemplos de combustíveis sólidos são: o bagaço de cana, o bagaço de casca de laranja, o coque verde de petróleo, a casca de dendê etc (BIZZO, 2003; OLIVEIRA; BISPO, 2008).

Os combustíveis líquidos são amplamente utilizados na indústria pelas facilidades de armazenamento, operação e transporte. Tais combustíveis podem ser de origem mineral ou não mineral. Os minerais, constituídos basicamente de hidrocarbonetos, são obtidos pela refinação do petróleo, destilação do xisto betuminoso ou hidrogenação do carvão. Os mais usados são a gasolina, o óleo diesel, o óleo combustível e o querosene de aviação. Os não minerais incluem os alcoóis e os óleos vegetais. Em se tratando dos alcoóis, o metanol, obtido de vias petroquímicas ou minerais, e o etanol, obtido por via fermentativa, têm especial destaque. Os óleos vegetais passam por uma reação de transesterificação, antes de serem usados como combustível, originando um produto praticamente isento de enxofre conhecido como biodiesel (BIZZO, 2003; OLIVEIRA; BISPO, 2008).

Os combustíveis gasosos têm aumentado sua aplicabilidade na indústria nacional, respondendo a demanda por fontes de energia mais limpas e eficientes. A limitação de seu crescimento está na disponibilidade e distância dos centros consumidores pela sua maior dificuldade de transporte. O gás liquefeito de petróleo (GLP) é um importante combustível, tanto de aplicação industrial como doméstica. O gás natural tem sido explorado recentemente, porém, deve ser transportado por gasodutos, o que dificulta sua maior utilização, dada a necessidade de investimento em infra-estrutura. Outros gases de grande importância são o gás hidrogênio, usado em foguetes e células a combustível, e o monóxido de carbono, utilizado em caldeiras de CO (BIZZO, 2003; OLIVEIRA; BISPO, 2008).

II.3. Óleo Diesel

O óleo diesel é um derivado do petróleo obtido na faixa de destilação entre 200 °C e 370 °C, contendo moléculas de 12 a cerca de 24 átomos de carbono. Sua formulação decorre da mistura de diversas correntes, tais como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das etapas de processamento do petróleo bruto (VALLE, 2007).

O óleo diesel é utilizado em motores de ignição por compressão (motores do ciclo diesel) empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas,

máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo).

No Brasil, os óleos usados em motores automotivos são obtidos, predominantemente, por destilação atmosférica. O óleo obtido por craqueamento catalítico, denominado óleo leve de resíduo, é de baixa qualidade e necessita de tratamentos adicionais. O diesel usado em transporte marítimo é obtido de frações residuais, possui uma maior viscosidade e maior teor de enxofre, se comparado ao diesel rodoviário (VALLE, 2007).

O consumo de diesel no Brasil pode ser dividido em quatro grandes setores: o de transportes, representando mais de 79% do total; o agropecuário, representando cerca de 14% do consumo; o de transformação, que utiliza o diesel na geração de energia elétrica e corresponde a cerca de 4% do consumo total de diesel; e a indústria, cuja parcela do consumo total é de 2% – conforme apresentado na figura 1.

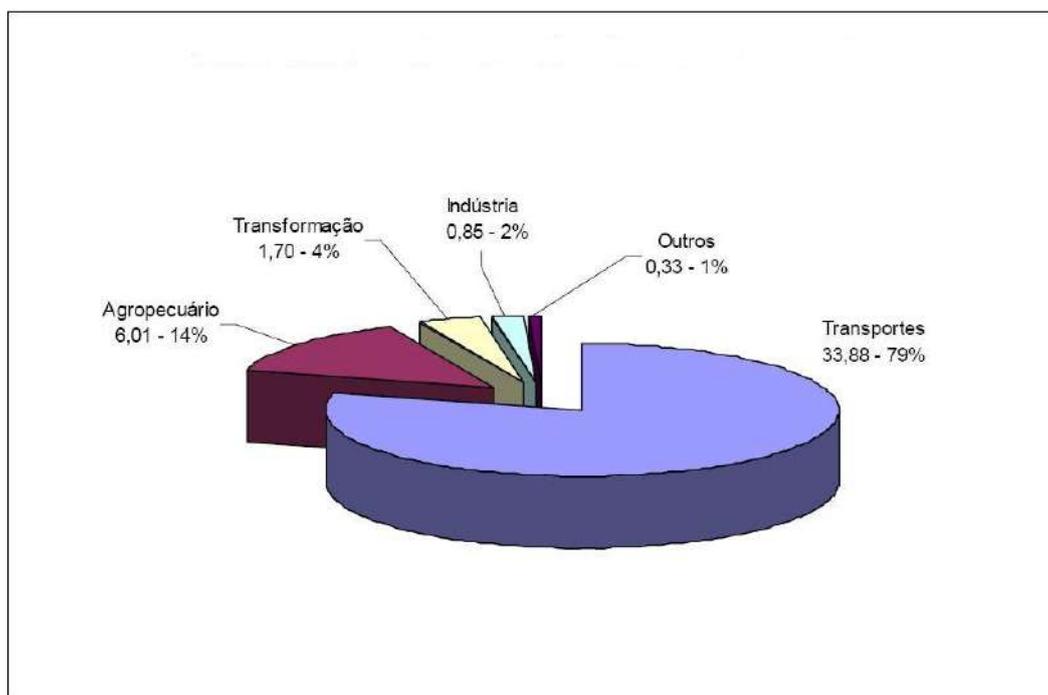


Figura 1 – Consumo de Diesel no Brasil (em milhões de m³)
(adaptado de CNT (2008))

O óleo diesel é notavelmente o combustível mais consumido no setor de transportes (MME, 2010), segundo evidencia a tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de Combustíveis no Setor de Transportes (%)

Fontes	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Óleo Diesel	50,8	52	52,5	52	52,1	50,9	50,9	49,9	49,2	48,4
Óleo Combustível	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,6	1,7	1,6
Gasolina Automotiva	28,0	27,2	25,3	27,2	26,3	25,9	27,1	24,8	23,3	23,4
Querosene	6,6	6,7	6,3	4,6	4,6	4,9	4,5	4,5	4,5	4,5
Álcool Etílico	12,3	11,2	12,4	12,0	12,5	13,3	12,0	14,9	17,6	18,8
Outras	0,9	1,4	2,0	2,7	3,0	3,5	4,1	4,2	3,8	3,3
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: MME (2010)

No setor de transportes, observa-se o predomínio do modal rodoviário, correspondendo a 97% do consumo de diesel; seguido pelos modais ferroviário e hidroviário, com participações de 2% e 1%, respectivamente – conforme mostra a figura 2.

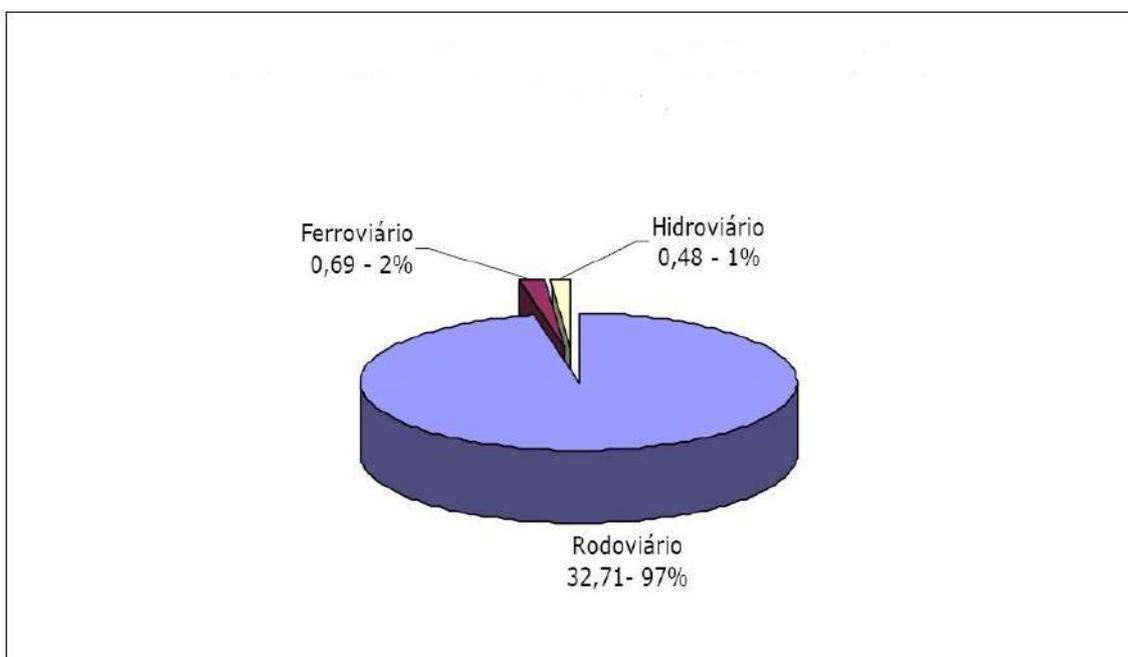


Figura 2 – Consumo de Diesel no Setor de Transportes (em milhões de m³)
(adaptado de CNT (2008))

Na indústria química, o consumo de diesel aumentou de maneira gradual entre os anos de 2000 e 2009. Contudo, as maiores parcelas do consumo no

setor são representadas pela eletricidade, gás natural e óleo combustível, de acordo com as tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Consumo de Combustíveis na Indústria Química (em 10³ tep¹)

Fontes	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Gás Natural	1252	1368	1630	1651	2063	2159	2236	2218	2323	1762
Carvão Vapor	79	75	71	77	73	116	63	69	92	66
Lenha	74	52	42	47	49	50	52	51	51	45
Bagaço de Cana/Outras	154	143	139	141	101	96	98	0	95	84
Óleo Diesel	83	76	119	137	149	133	137	152	154	136
Óleo Combustível	1136	1085	929	739	643	622	643	481	476	476
GLP	14	18	17	18	20	21	61	62	66	60
Nafta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Querosene	2	1	1	3	1	0	0	0	0	0
Gás Canalizado	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eletricidade	1483	1420	1524	1629	1859	1814	1880	1985	1901	1991
Carvão Vegetal	0	0	0	19	16	17	17	17	17	18
Outras de Petróleo	2143	2119	2124	2085	2141	2139	2178	2622	2033	2170
Total	6421	6357	6595	6547	7115	7168	7364	7657	7209	6808

Fonte: MME (2010)

Tabela 3 – Consumo de Combustíveis na Indústria Química (%)

Fontes	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Gás Natural	19,5	21,5	24,7	25,2	24,0	30,1	30,4	29,0	25,9	25,7
Carvão Vapor	1,2	1,2	1,1	1,2	1,0	1,6	0,9	0,9	1,0	1,2
Lenha	1,2	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
Óleo Combustível	17,7	17,1	14,1	11,3	9,0	8,7	8,7	6,3	7,0	7,1
Eletricidade	23,1	22,3	23,1	24,9	26,1	25,1	25,5	25,9	29,3	28,0
Outras	37,3	37,1	36,4	36,7	34,1	33,6	33,8	37,3	36,3	37,6
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: MME (2010)

As caldeiras industriais de grande porte operam com óleo combustível, enquanto as caldeiras de pequeno porte utilizam óleo diesel para combustão,

¹ Tonelada equivalente de petróleo

em virtude da menor quantidade de combustível requerida. Vale ressaltar que a caldeira utilizada neste trabalho opera com óleo diesel automotivo como combustível.

II.3.1. Processos de Obtenção do Óleo Diesel

O petróleo cru contém centenas de hidrocarbonetos. A refinaria aquece o petróleo cru e os vapores entram em uma coluna de destilação onde sobem e, à medida que são resfriados abaixo de seu ponto de ebulição, condensam. As cadeias longas e complexas de hidrocarbonetos ou suas frações condensam em altas temperaturas, próximas do fundo; os hidrocarbonetos curtos e mais simples condensam em temperaturas mais baixas, nas partes superiores. Processos como o craqueamento e a reforma refinam ainda mais os produtos. No processo inicial de destilação atmosférica obtêm-se, entre outras, as frações denominadas óleo diesel leve e pesado, essenciais para a produção do óleo diesel, às quais podem ser agregadas outras frações como a nafta, o querosene e o gasóleo leve de vácuo (BRANCO, 2008).

O óleo diesel também pode ser obtido a partir de processos XTL, a saber: o processo *coal-to-liquids* (CTL), que usa carvão mineral como insumo; o processo *gas-to-liquids* (GTL), cujo insumo é o gás natural; e o processo *biomass-to-liquids* (BTL), no qual o insumo é a biomassa. Tais processos se subdividem em três etapas básicas: produção de gás de síntese (ou *syngas*) a partir do insumo; conversão do gás de síntese (ou *syngas*) em uma mistura complexa de hidrocarbonetos lineares, não-lineares e produtos oxigenados; e beneficiamento (ou *upgrading*) dessa mistura para obtenção dos produtos finais – como, por exemplo, o óleo diesel – mediante processos convencionais de refino, tais como: o hidrocraqueamento, reforma catalítica, hidrotratamento, alquilação e isomerização (SOUSA-AGUIAR, 2010; BRANCO, 2008).

As três etapas, quando consideradas individualmente, são tecnologias bem estabelecidas, otimizadas e com viabilidade comercial comprovada. Contudo, o uso conjunto das três tecnologias, para formarem os processos XTL ainda não é muito utilizado. Portanto, o projeto de uma planta XTL, comercialmente competitiva, enfrenta desafios não só relacionados aos aspectos conhecidos dessas tecnologias, mas também àqueles que não estão em fase de comercialização, mas sim em fases iniciais de desenvolvimento.

II.3.2. Propriedades do Óleo Diesel

O óleo diesel é produzido de modo a atender os diversos requisitos em sua utilização em motores e tem algumas características controladas para que os veículos tenham desempenho adequado, com emissões de acordo com as normas estabelecidas pelos órgãos ambientais. Dentre as características aferidas, têm-se o número de cetano, a destilação, a corrosividade ao cobre, a

densidade, o teor de enxofre, a viscosidade, o ponto de fulgor e o comportamento a baixas temperaturas. Com relação ao aproveitamento do calor de combustão, avaliam-se também o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior.

Número de Cetano e Índice de Cetano:

Nos motores diesel, o combustível é injetado na câmara de combustão imediatamente antes do instante em que o processo de combustão deva ser iniciado. O tempo decorrido entre o início da injeção e o início da combustão é chamado de retardo de ignição (RI). Essa característica está relacionada com a estrutura química do combustível, sendo expressa pelo número de cetano (NC). Quanto maior o NC, menor o RI e melhor a qualidade de ignição do combustível. Porém, essa relação só é válida para combustíveis destilados, excluindo-se aqueles contendo resíduos de petróleo (combustível para navios).

A determinação de NC é realizada mediante a comparação do comportamento do diesel ao de dois hidrocarbonetos puros, selecionados como referência: o n-cetano ou n-hexadecano ($\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{14} - \text{CH}_3$), para o qual $\text{NC} = 100$; e α -metilnaftaleno, com $\text{NC} = 0$. Dessa forma, o NC de um combustível representa um desempenho equivalente a uma mistura com NC% de n-cetano e $(100-\text{NC})\%$ de α -metilnaftaleno. Posteriormente, o heptametilnonano (isocetano) foi adotado como substituto do α -metilnaftaleno em decorrência de sua maior estabilidade. Em geral, o valor adequado de NC situa-se na faixa de 40 a 60.

Um método alternativo para verificação da qualidade de ignição de um combustível é o índice de cetano (IC). Esse índice é função do ponto de destilação médio e da densidade, apresentando boa correlação com o NC.

Destilação:

O perfil de destilação de um combustível relaciona-se diretamente com propriedades como a viscosidade, pressão de vapor e poder calorífico, entre outras. A especificação do ponto final da destilação do diesel é importante, porque atua diretamente na emissão de poluentes. Se o ponto de destilação é muito baixo, a emissão de NO_x decresce ligeiramente, porém aumenta a de hidrocarbonetos e CO.

Corrosividade ao Cobre:

Essa propriedade avalia o potencial de corrosividade do combustível em relação às peças metálicas presentes nos sistemas de combustível dos veículos e equipamentos, bem como das instalações de armazenamento. Os ácidos orgânicos contidos no diesel também podem provocar corrosão; porém,

a presença desses compostos é menos importante para o diesel com baixo teor de enxofre, pois os hidrotreatamentos destroem tais compostos.

Densidade:

A necessidade de especificação do valor máximo e do mínimo para a densidade do óleo diesel é justificada pela operação da bomba de injeção de combustível, que é regulada por vazão volumétrica. Densidades acima do valor máximo especificado acarretam uma queima incompleta na câmara de combustão do motor, aumentando as emissões de poluentes; enquanto que densidades abaixo do valor mínimo especificado resultam em perda de potência do motor.

Teor de Enxofre:

A presença de compostos sulfurados é indesejável no diesel, devido à sua ação corrosiva e à formação óxidos de enxofre (SO_x). Esses compostos podem se depositar, na forma de sulfatos sólidos, na câmara de combustão, ou reagir com a água para produzir ácidos. Outro inconveniente é a emissão de material particulado resultante da conversão do enxofre do combustível em sulfato na exaustão.

Viscosidade:

A viscosidade de um combustível influi diretamente na queda de pressão na bomba e nos injetores, podendo diminuir a pressão de injeção e o grau de atomização do combustível, quando apresenta valores elevados. Por outro lado, viscosidades muito baixas ocasionam problemas operacionais na bomba de injeção. A lubrificidade também está associada à viscosidade. Combustíveis com alta viscosidade proporcionam uma melhor lubrificação hidrodinâmica.

Ponto de Fulgor:

O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual o produto se vaporiza em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar. Sua determinação está associada à segurança no manuseio e transporte do combustível. O ponto de fulgor varia em função do teor de leves existentes na amostra, limitando o início da faixa de destilação do diesel.

Comportamento a Baixas Temperaturas:

O comportamento do diesel a baixas temperaturas pode ser avaliado por meio do ponto de névoa, ponto de fluidez e o ponto de entupimento de filtro a frio.

O ponto de névoa, geralmente situado na faixa de 0 °C a 10 °C, pode ser determinado visualmente e representa a temperatura na qual cristais de

parafinas normalmente dissolvidas começam a se separar, afetando a limpidez do produto. Quando o combustível é resfriado abaixo de seu ponto de névoa, haverá uma temperatura na qual ele pára de escoar livremente, denominada ponto de fluidez, que varia na faixa de -15 °C a -30 °C.

O ponto de entupimento de filtro a frio corresponde à temperatura na qual um determinado volume de diesel passa através de um filtro padronizado em um dado intervalo de tempo.

Poder Calorífico Superior:

O poder calorífico superior (PCS) corresponde à quantidade de energia liberada, na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura inicial dos reagentes, sendo que a água formada na combustão está no estado líquido (ANP, 2011).

Poder Calorífico Inferior:

O poder calorífico inferior (PCI) é definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura inicial dos reagentes, sendo que todos os produtos inclusive a água formada na combustão estão no estado gasoso (ANP, 2011).

II.3.3. Emissões Provocadas pela Combustão do Óleo Diesel

A combustão incompleta do óleo diesel produz, além da água, gás carbônico, monóxido de carbono e NO_x, que juntamente com o metano e os CFCs, são os principais responsáveis pelo efeito estufa. A tabela 4 associa os gases citados com os seus respectivos tempos de vida na atmosfera, taxa anual atual de aumento e contribuição relativa ao efeito estufa.

Tabela 4 – Panorama da Contribuição de Gases para o Efeito Estufa

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC	O ₃	CO	H ₂ O
Tempo de vida na atmosfera	50-60 anos	10 anos	150 anos	60-100 anos	semanas ou meses	meses	dias
Taxa anual atual de aumento	0,50%	0,90%	0,30%	4%	0,5 a 2%	0,7 a 1,0%	desconhecido
Contribuição para efeito estufa	60%	15%	5%	12%	8%	0%	desconhecido

Fonte: SANTOS (2007)

A tabela 4 ressalta a predominância do gás carbônico como agravante do efeito estufa, não só por seu longo tempo de vida na atmosfera, mas também pela contribuição relativa de 60% para o efeito estufa. Destaca-se também a contribuição relativa do metano e do N₂O, 15% e 5%, respectivamente, que constituem as principais emissões do setor agropecuário.

Por fim, outro aspecto peculiar da queima de óleo diesel é a emissão de óxidos de enxofre e compostos orgânicos voláteis (COV), em particular os hidrocarbonetos. Os SO_x provocam problemas respiratórios e a chuva ácida. Alguns COV causam irritações nos olhos e na pele, tosse etc. O tipo mais abundante de hidrocarbonetos em combustíveis fósseis são os alcanos, sendo o metano o mais abundante na atmosfera.

II.3.4. Óleo Diesel de Uso Rodoviário

O óleo diesel utilizado neste trabalho é de uso rodoviário, cuja classificação é realizada segundo dois tipos possíveis:

- Óleo diesel tipo A – combustível produzido por processos de refino de petróleo e processamento de gás natural destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel.
- Óleo diesel tipo B – combustível produzido por processos de refino de petróleo e processamento de gás natural destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, com adição de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

Ademais, os óleos tipo A e B devem apresentar a seguinte nomenclatura conforme o teor de enxofre:

- Óleo diesel A S50 e B S50 – combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 50 mg/kg.
- Óleo diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg.
- Óleo diesel A S1800 e B S1800: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 1800 mg/kg.

As especificações da ANP para o óleo diesel de uso rodoviário encontram-se no anexo I.

II.4. Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores de combustão interna com ignição por compressão ou para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (BRASIL, 1997). Quimicamente, o biodiesel consiste em uma mistura de ésteres alquílicos derivados de ácidos graxos presentes em óleos vegetais, gorduras animais e óleos reciclados da cocção de alimentos (frituras).

O biodiesel nacional vem se desenvolvendo em decorrência da sua obrigatoriedade legal, uma vez que seu preço sempre foi maior que o preço do diesel, tornando-o, portanto, pouco competitivo, como mostra a tabela 5.

Tabela 5 – Comparação dos Preços de Biodiesel e Diesel

Ano	Biodiesel(R\$/Litro)	Diesel(R\$/Litro)	Diferença(%)
2005	1,9	1,25	52
2006	1,79	1,36	31,6
2007	1,86	1,36	36,8
2008	2,60	1,47	76,8
2009	2,26	1,43	58,5

Fonte: MENDES; DA COSTA (2010)

Entretanto, não é esperado um retrocesso em relação a tal obrigatoriedade, pois o biodiesel representa uma alternativa ambientalmente mais correta, se comparada com o diesel; e devido ao baixo impacto da mistura do biodiesel ao diesel no preço do diesel, caso a porcentagem de biodiesel seja pequena.

II.4.1. Matérias-primas utilizadas para Obtenção de Biodiesel

Em geral, toda substância contendo ácidos graxos pode ser utilizada como matéria-prima para produção de biodiesel. As matérias-primas mais empregadas para produção de biodiesel são os óleos vegetais, as gorduras animais e os óleos e gorduras residuais (GUARIEIRO, 2006).

Algumas fontes para extração de óleo vegetal, com potencial para ser utilizado na produção de biodiesel, são: baba de mamona, polpa do dendê, amêndoa do coco de dendê, amêndoa do coco de babaçu, semente de girassol, amêndoa do coco da praia, caroço de algodão, grão de amendoim, semente de canola, semente de maracujá, polpa de abacate, caroço de oiticica, semente de linhaça, semente de tomate e de nabo forrageiro.

Entre as gorduras animais, destacam-se o sebo bovino, os óleos de peixes, o óleo de mocotó, a banha de porco, entre outros, que são exemplos de gordura animal com potencial para produção de biodiesel.

Algumas possíveis fontes dos óleos e gorduras residuais são: lanchonetes e cozinhas industriais, indústrias onde ocorre a fritura de produtos alimentícios, os esgotos municipais onde a nata sobrenadante é rica em matéria graxa, águas residuais de processos de indústrias alimentícias.

Em âmbito nacional, a cadeia produtiva da soja exerce papel crucial na obtenção de biodiesel, em virtude da consolidação e competitividade desse setor no mercado internacional, quando da implantação do PNPB. Porém, em virtude da baixa produtividade de óleo por área plantada, a soja deve ser progressivamente substituída por outras culturas – de acordo com a tabela 6.

Tabela 6 – Características das Oleaginosas

Espécie	Teor de Óleo (%)	Ciclos (anos)	Meses de Colheita	Produtividade (ton óleo/ha)
Dendê	20	8	12	0,3-0,6
Babaçu	66	7	12	0,1-0,3
Girassol	38-48	anual	3	0,5-1,9
Canola	40-48	anual	3	0,5-0,9
Mamona	43-45	anual	3	0,5-0,9
Soja	17	anual	3	0,2-0,4
Algodão	15	anual	3	0,1-0,2

Fonte: MENDES; DA COSTA (2010)

II.4.2. Reação de Obtenção do Biodiesel

A transesterificação é o método predominante para produção de biodiesel, consistindo na reação de um triglicerídeo com um álcool de cadeia curta na presença de um catalisador ácido ou básico – conforme a figura 3.

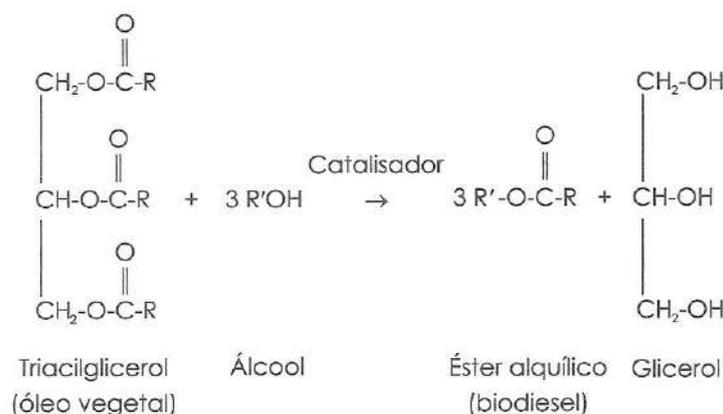


Figura 3 – Reação de transesterificação (adaptado de KNOTHE *et al* (2006))

O metanol geralmente é o álcool mais barato; no entanto, no Brasil, o etanol é a alternativa menos dispendiosa, conduzindo a obtenção de ésteres etílicos. Além do metanol e do etanol, outros alcoóis que podem ser utilizados estão relacionados na tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades de Alcoóis (C1 a C4)

Nome	Massa Molar	Ponto de Ebulição (°C)	Ponto de Fusão (°C)	Densidade (g/mL)
Metanol	32,042	65	-93,9	0,791420/4
Etanol	46,069	78,5	-117,3	0,789320/4
1-Propanol	60,096	97,4	-126,5	0,803520/4
2-Propanol	60,096	82,4	-89,5	0,785520/4
1-Butanol	74,123	117,2	-89,5	0,809820/4
2-Butanol	74,123	99,5	-	0,808020/4
2-Metil-1-propanol	74,123	108	-	0,801820/4
2-Metil-2-propanol	74,123	82,3	22,5	0,788720/4

Fonte: KNOTHE *et al* (2006)

Geralmente, a transesterificação pode ser realizada por catálise ácida ou básica. No entanto, em catálise homogênea, catalisadores alcalinos (hidróxido de sódio ou potássio) proporcionam processos muito mais rápidos que catalisadores ácidos (KNOTHE *et al*, 2006). Na transesterificação alcalina, soluções de alcóxidos com o álcool correspondente são mais vantajosas que

os hidróxidos, uma vez que evitam a formação de água no meio reacional e posterior hidrólise do biodiesel formado.

Outros fatores como a razão molar entre álcool e óleo vegetal, a temperatura, o tempo de reação, o grau de refino do óleo vegetal empregado e o efeito da presença de umidade e ácidos graxos livres (AGL) também influenciam no rendimento da reação de transesterificação. Para a transesterificação apresentar rendimentos máximos, o álcool deve se livre de umidade e o conteúdo de AGL do óleo vegetal deve ser inferior a 0,5% (KNOTHE *et al*, 2006).

II.4.3. Propriedades do Biodiesel

As propriedades do biodiesel dependem do óleo vegetal utilizado na sua produção, como ilustra a tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades de Óleos Vegetais, Biodiesel e Diesel.

Óleo Vegetal	Índice de Iodo	Número de Cetano	PCS (kJ/Kg)	Viscosidade (mm ² /s)	Ponto de Névoa (°C)	Ponto de Fluidez (°C)	Ponto de Fulgor (°C)
Óleo Vegetal							
Babaçu	out/18	38	-	-	-	-	-
Mamona	82-88	-	39500	297 (38°C)	-	-31,7	260
Milho	103-140	37,6	39500	34,9 (38°C)	-	-	-
Dendê	35-61	42	-	-	-	-	-
Soja	117-143	37,9	39623	32,6 (38°C)	-2,9	-12,2	254
Girassol	110 -143	37,1	39575	37,1 (38°C)	7,2	-15	274
Éster Metílico							
Soja	-	46,2	39800	4,08 (40°C)	2	-1	171
Girassol	-	46,6	39800	4,22 (40°C)	0	-4	-
Éster Etilico							
Dendê	-	56,2	39070	4,5 (37,8°C)	8	6	190
Soja	-	48,2	40000	4,4 (40°C)	1	-4	174
Óleo Diesel							
Óleo Diesel	-	47	45343	2,7 (38°C)	-15	-33	52

Fonte: SANTOS (2007)

O biodiesel tem baixo poder calorífico quando comparado ao diesel; porém, apresenta número de cetano e ponto de fulgor maiores, permitindo melhorias na ignição, manuseio e transporte desse biocombustível. Vale ressaltar a grande diferença entre as viscosidades dos óleos vegetais e do óleo diesel, inferindo-se que a reação de transesterificação atua, entre outros fatores, no sentido de auferir ao biodiesel formado uma viscosidade mais próxima do óleo diesel. Quanto às propriedades a baixas temperaturas,

observa-se que o biodiesel apresenta pontos de névoa e de fluidez maiores que os do óleo diesel.

II.4.4. Emissões Provocadas pela Combustão do Biodiesel

O uso de biodiesel como combustível apresenta algumas vantagens em relação ao óleo diesel destinado para o mesmo fim tais como: o ciclo de carbono fechado propiciado pela absorção, pela planta, do CO₂ proveniente da combustão; a minimização da concentração de SO_x na atmosfera, uma vez que o biodiesel é isento de enxofre em sua composição; e um balanço energético favorável, ou seja, a parcela de energia solar armazenada na planta é menor que a parcela destinada à produção do óleo vegetal (SANTOS, 2007).

Todavia, a queima do biodiesel libera monóxido de carbono e NO_x na atmosfera. O monóxido de carbono (CO) afeta a capacidade de transporte de oxigênio no sangue. A afinidade da hemoglobina pelo CO é aproximadamente 200 vezes maior que sua afinidade pelo oxigênio. Os NO_x são potenciais contribuintes para a chuva ácida e também participam na formação do *smog* fotoquímico, um aerossol branco, irritante aos olhos e mucosas, cuja procedência deriva da interação dos NO_x com aldeídos, nitratos de alquila, ozônio e nitrato de peroxiacila (SANTOS, 2007).

Mais de 95% das emissões de NO_x estão sob a forma de monóxido de nitrogênio (NO). O monóxido de nitrogênio (NO) é um gás extremamente irritante, capaz de produzir irritação dos olhos e nariz, além de provocar enfisema pulmonar. Esse gás é formado, sobretudo, em consequência da alta temperatura na câmara de combustão dos motores e não representaria perigos à saúde humana. No entanto, ele reage com oxigênio, formando o dióxido de nitrogênio (NO₂). Já o dióxido de nitrogênio (NO₂) é uma substância altamente tóxica, que ao penetrar no organismo pode levar a formação de compostos carcinogênicos (SANTOS, 2007; OLIVEIRA; BISPO, 2008).

Em comparação ao diesel, pode-se dizer que o biodiesel contribui de forma mais significativa para o aumento de NO_x na atmosfera, não só em decorrência da combustão, mas também como resultado da atividade agrícola envolvida na produção desse biocombustível. As especificações da ANP para o biodiesel encontram-se no anexo II.

II.5. Caldeiras

Uma caldeira é um equipamento cuja função é produzir vapor através do aquecimento da água. As caldeiras produzem vapor para alimentar máquinas térmicas, autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos e de outros produtos orgânicos, calefação ambiental e outras aplicações do calor utilizando-se o vapor.

Uma caldeira é composta de dois sistemas básicos separados: o sistema vapor-água, também chamado de lado da água da caldeira, e o sistema combustível-ar-gás da combustão, também chamado de lado do fogo da caldeira.

A entrada do sistema vapor-água ou lado de água da caldeira é a água. Esta água, que recebe o calor através de uma barreira de metal sólido, é aquecida, convertida em vapor e deixa o sistema na forma de vapor. As entradas do sistema combustível-ar-gás de combustão ou lado do fogo da caldeira são o combustível e o ar de combustão necessário à queima deste combustível. Neste sistema, o combustível e o ar de combustão são completa e cuidadosamente misturados, sendo em seguida queimados na câmara de combustão. A combustão propicia a conversão de energia química do combustível em energia térmica, ou seja, calor. Este calor é transferido para o sistema vapor-água, para geração de vapor.

As caldeiras podem ser de dois tipos: caldeiras flamotubulares (ou fogotubulares) ou caldeiras aquatubulares.

II.5.1. Caldeiras Flamotubulares ou Fogotubulares

Nas caldeiras flamotubulares, os gases quentes da combustão passam por dentro e a água da caldeira passa por fora dos tubos, ou seja, o lado do fogo fica por dentro e o lado da água fica por fora dos tubos.

O vapor é gerado pelo calor transferido dos gases quentes da combustão, através das paredes metálicas dos tubos, para a água que fica circundando estes tubos. À medida que os gases da combustão fluem através dos tubos, eles são resfriados pela transferência de calor para a água; portanto, quanto maior o resfriamento dos gases, maior a quantidade de calor transferida. O resfriamento dos gases da combustão é função da condutividade dos tubos, da diferença de temperatura entre os gases e a água da caldeira, da área de transferência de calor, do tempo de contato entre os gases e a superfície dos tubos da caldeira, e de outros fatores (BEGA, 2003). A figura 4 mostra um esquema de caldeira flamotubular.

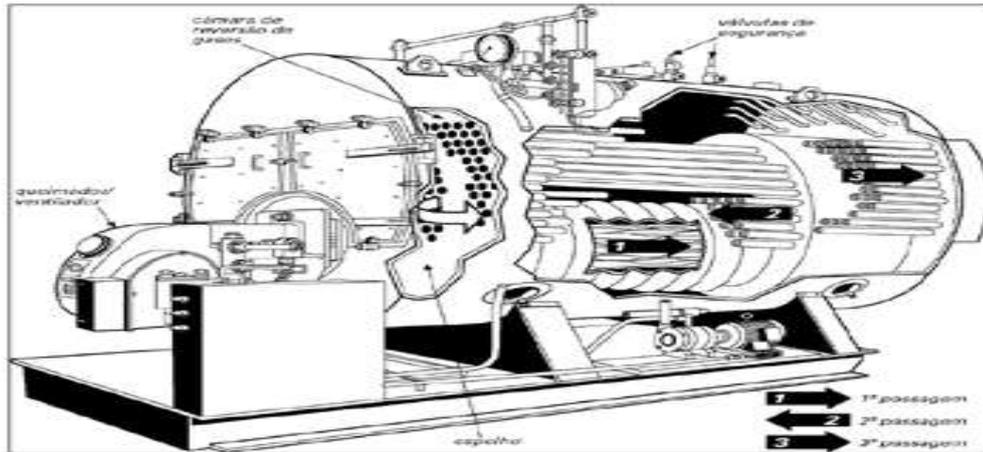


Figura 4 – Caldeira Flamotubular (adaptado de BIZZO (2003))

Embora as caldeiras flamotubulares sejam simples, por problemas construtivos e de competitividade econômica, suas aplicações são restritas aos casos em que se necessita de pequenas ou médias vazões de vapor (até 10 ton/h), pressões de trabalho não superiores a 10 Kgf/cm² (150 psi) e somente vapor saturado (BEGA, 2003).

II.5.2. Caldeiras Aquatubulares

Neste tipo de caldeira, a água passa por dentro e os gases quentes da combustão passam por fora dos tubos, ou seja, o lado de água fica por dentro e o lado do fogo fica por fora dos tubos. Esses tubos são normalmente conectados entre dois ou mais tubulões cilíndricos.

O tubulão superior, onde se dá a separação da fase líquida e do vapor, e o tubulão inferior, onde é feita a decantação e purga dos sólidos em suspensão. Os tubos podem ser retos ou curvados. As primeiras caldeiras aquatubulares utilizavam tubos retos; entretanto, essa configuração foi sendo progressivamente abandonada ao longo dos anos. A caldeira de tubos curvados, interligando os balões, proporciona arranjo e projeto de câmaras de combustão completamente fechada por paredes de água, com capacidades praticamente ilimitadas. Dada à maior complexidade construtiva em relação às caldeiras flamotubulares, as aquatubulares são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, exatamente onde o custo de fabricação do outro tipo começa a aumentar desproporcionalmente (BIZZO, 2003).

Em se tratando dos modos de transferência de calor nessa caldeira, distinguem-se duas seções básicas: a seção de radiação, onde a troca de calor se dá por radiação direta da chama aos tubos de água, os quais geralmente delimitam a câmara de combustão; e seção de convecção, onde a troca de calor se dá por convecção forçada, dos gases quentes que saíram da

câmara de combustão atravessando um banco de tubos de água – como ilustra a figura 5.

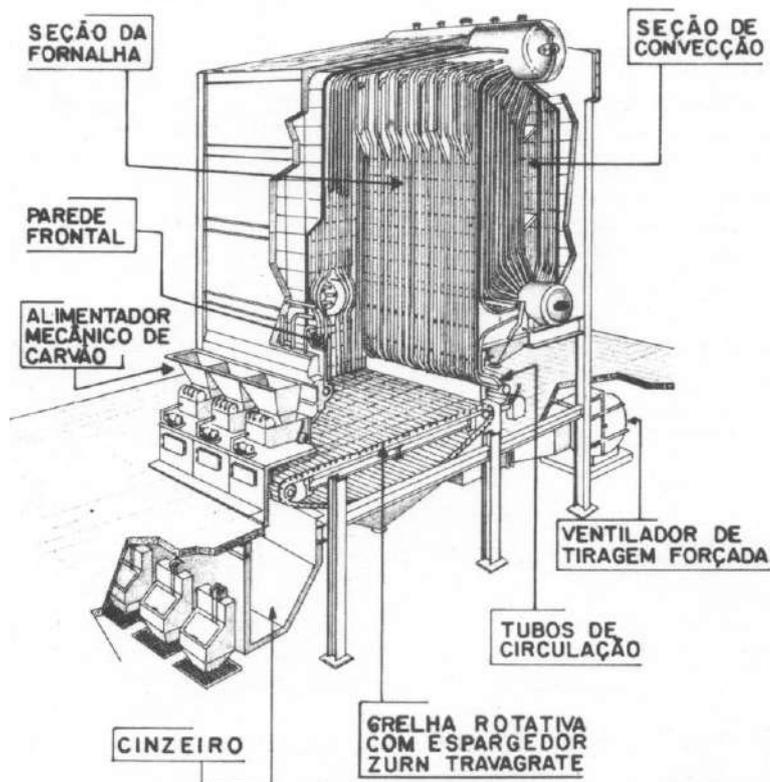


Figura 5 – Caldeira Aquatubular (adaptado de BIZZO (2003))

Encontram-se hoje caldeiras que produzem até 750 ton/h de vapor com pressões até 3450 atm. Para aplicação industrial, as capacidades variam da ordem de 15 a 150 ton/h, com pressões até 90-100 bar (BIZZO, 2003).

II.5.3. Instrumentação aplicada às Caldeiras

A instrumentação é a ciência que desenvolve e aplica técnicas de medição, indicação, registro e controle de variáveis físicas presentes em processos industriais visando à otimização dos mesmos. A automação é a ciência que, a partir da instrumentação, desenvolve dispositivos que governam a si próprios quase sem interferência humana. (VALDMAN; FOLLY; SALGADO, 2008).

Com o advento da eletrônica, todas as informações sobre um determinado processo industrial podem ser visualizadas na sala de controle, dispensando a verificação das variáveis de processo diretamente no campo. Para isso, criaram-se instrumentos denominados transmissores, cuja função é medir determinada variável (pressão, temperatura, vazão, nível) e converter os valores encontrados em um sinal eletrônico, que é enviado para a sala de

controle por meio de cabos de sinais eletrônicos. Ao chegar à sala de controle, esse sinal é convertido em indicações visuais pelos computadores.

Os controladores recebem o sinal proveniente do campo, comparando com um valor de controle (*set point*) e estabelecem um sinal eletrônico de saída, contendo o valor de correção a ser aplicado ao processo, de modo a tornar a variável de processo mais próxima ou igual ao *set point*. A correção no processo é efetuada por instrumentos denominados atuadores, que são as válvulas de controle.

Para o desenvolvimento da automação de um processo industrial, visando o seu controle, os instrumentos utilizados podem se comunicar mediante quatro tipos de sinais:

- Sinal analógico – é o sinal elétrico que pode ser convertido em um sinal eletrônico, cuja representação é uma sequência de dígitos binários que compõem uma informação flutuante na qual o valor da resposta pode variar ao longo de uma faixa de leitura, conforme a calibração do instrumento. Os instrumentos industriais de tecnologia analógica podem gerar e/ou receber sinais contínuos dentro de uma faixa padrão preestabelecida internacionalmente que varia entre 4 mA e 20 mA ou 0 mA a 20 mA. Os transmissores de nível, vazão, pressão e temperatura são exemplos de instrumentos que usam sinais analógicos de comunicação.
- Sinal discreto – é o tipo de sinal fornecido através de contatos elétricos abertos ou fechados. Estes contatos possuem uma posição normal de operação, definida como normalmente aberta (NA), ou uma posição de descanso, definida como normalmente fechada (NF), dependendo da condição de operação de segurança. Dessa forma, os instrumentos que utilizam a tecnologia discreta, geram apenas dois tipos de informação, também chamada de *status* de determinada variável: 0 (não tem sinal) ou 1 (tem sinal). Os termostatos, pressostatos, chaves de nível e válvulas solenóides são exemplos de instrumentos que utilizam sinais discretos de comunicação.
- Sinal pneumático – é o sinal gerado pela variação de pressão de ar comprimido num sistema bico-palhetas, podendo este valor de resposta variar ao longo de uma faixa de leitura, conforme a calibração do instrumento. Os instrumentos de tecnologia pneumática podem gerar e/ou receber sinais contínuos dentro da faixa padrão preestabelecida internacionalmente que varia de 3 a 15 psi. Atualmente, a utilização do sinal pneumático abrange quase que somente os atuadores, como, por exemplo, as válvulas de controle.

- Sinal digital *fieldbus foundation* – consiste em um sinal plenamente digital. Nesse caso, o sistema de comunicação entre os instrumentos é totalmente digital, serial e bidirecional, funcionando como uma rede local dedicada a equipamentos utilizados na automação industrial. Cada instrumento integrante da rede possui microprocessadores e memória com várias funções definidas, entre elas o intercâmbio de informações diretamente entre os dispositivos de campo e ações efetivas de controle.

Dentre as variáveis controladas e monitoradas em uma caldeira destacam-se o nível de água, a vazão de ar de combustão e a pressão do vapor. As malhas de controle de nível devem procurar eliminar a interação existente entre o sistema de nível e o de combustão, pois uma vazão irregular de água de alimentação implica perturbações na pressão do vapor, ocasionando variações na taxa de aquecimento, sem, no entanto, terem ocorrido variações na demanda de vapor (BEGA, 2003). As dificuldades para o controle de nível são provenientes da expansão e contração e das variações na pressão do sistema de fornecimento da água de alimentação da caldeira. Quanto maior a capacidade da caldeira, mais estreitos serão os limites de variação do nível e, conseqüentemente, mais completa deverá ser a malha de controle utilizada.

A vazão de ar de combustão tem importância crucial na extensão da reação de combustão. Se abaixo do requerido para combustão completa, aumenta a emissão de poluentes atmosféricos; se em demasia, provoca o desperdício de energia para aquecimento de uma quantidade de ar que não será aproveitada na combustão. A injeção de ar nas câmaras de combustão é realizada com o auxílio de ventiladores. Os sistemas de ventilação que operam com rotação variável são mais eficientes, na medida em que controlam a vazão sem introduzir perda de carga no processo, e menos ruidosos; porém, em função do custo relativamente alto de implantação desse tipo de sistema, sua utilização tem se restringido a aplicações específicas. Os sistemas que operam com velocidade constante geralmente são baratos e simples, embora tendam a ser menos eficientes, mais ruidosos e possuem menor tempo de vida útil em comparação com os sistemas de velocidade variável (BEGA, 2003). Os sistemas de velocidade constante têm sido os mais utilizados em caldeiras. Nesse caso, a vazão de ar pode ser controlada através de *dampers* localizados na saída ou na entrada do ventilador.

As malhas de controle de combustão de caldeiras utilizando combustível líquido e/ou gasoso mantêm a pressão do vapor, variando a vazão do combustível e do ar de combustão injetado no queimador. Quanto maior a vazão do combustível e do ar de combustão, maior a troca de calor, maior a produção de vapor; quanto menor a vazão, menor a troca, menor a produção

de vapor. Tais malhas também atuam de maneira a manter a relação ar-combustível adequada, assegurando um bom rendimento da combustão.

Capítulo III. Metodologia

Este capítulo apresenta a descrição do processo que ocorre na planta piloto do LADEQ, dos testes experimentais previamente realizados na caldeira (VALDMAN *et al*, 2010), bem como das metodologias utilizadas para o cálculo da eficiência e para análise dos resultados obtidos.

III.1. Planta Piloto

O presente trabalho propõe-se a avaliar a eficiência da caldeira flamotubular de pequeno porte, modelo CV-VDM-500, situada na planta piloto da Central de Utilidades do LADEQ/EQ/UFRJ, ilustrada na figura 6.



Figura 6 – Planta Piloto da Central de Utilidades do LADEQ

O processo da planta piloto consta de três tanques de armazenamento de biodiesel, um tanque de armazenamento de óleo diesel de uso rodoviário, um tanque de mistura e alimentação à caldeira, uma caldeira, um tanque de armazenamento de água e uma linha de vapor saturado. O queimador da caldeira recebe o combustível, bombeado do tanque de alimentação, e o ar, bombeado através de um soprador, em uma proporção para queima. O ignitor é responsável por dar a partida na queima. A água retida dentro da caldeira é aquecida até a produção de vapor saturado, que pode ser utilizado pelos

setores subsequentes da planta através da linha de vapor. O excesso de vapor é liberado para a atmosfera, através de um silenciador e um tanque de retenção de líquido. A água da caldeira é repostada, conforme a demanda de vapor exigida, através da bomba de alimentação de água de reposição, bombeada do tanque de armazenamento (VALDMAN, 2010).

O diagrama P & I da planta piloto, contendo o fluxograma de processo e a instrumentação instalada na planta, é apresentado na figura 7.

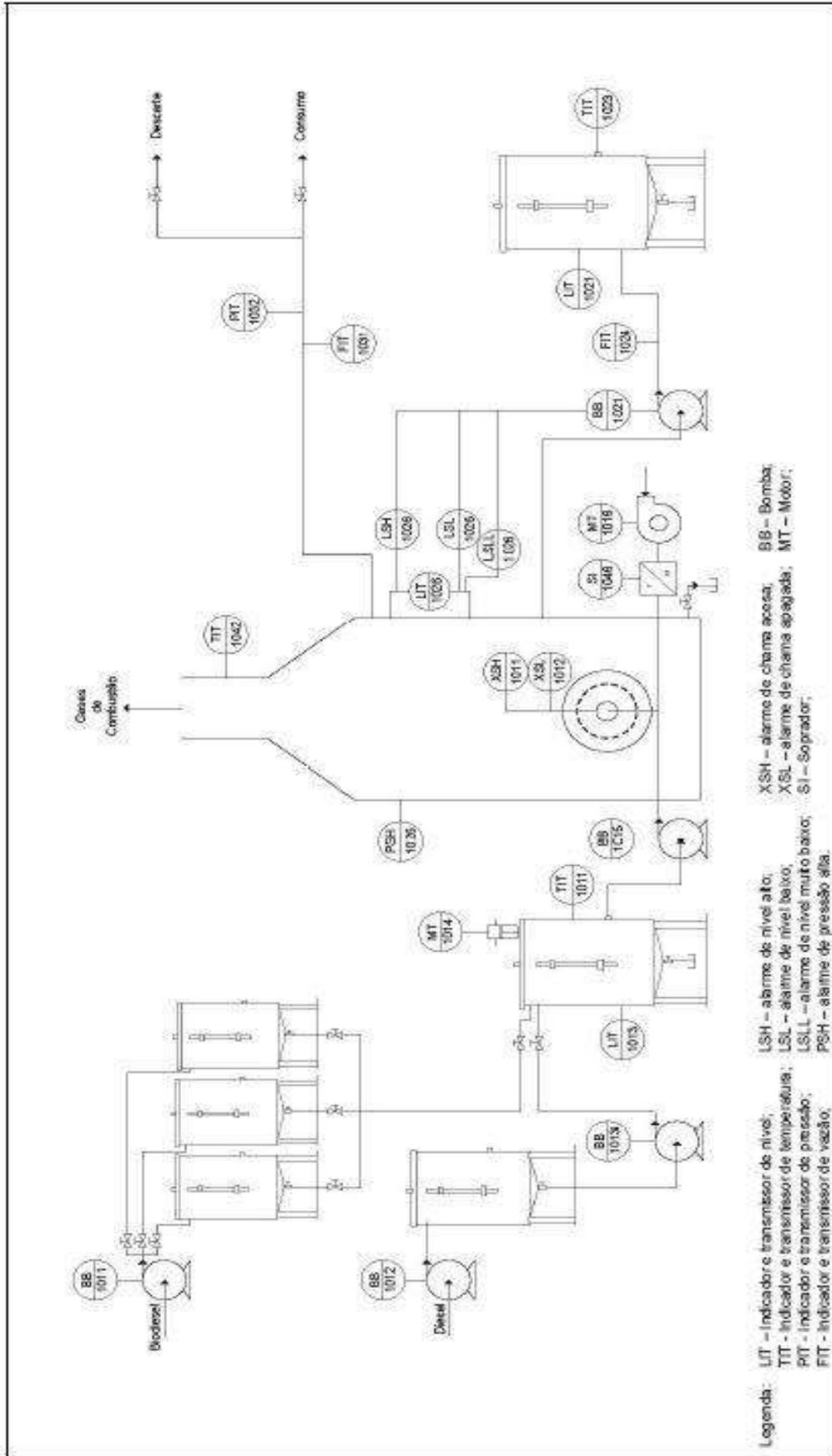


Figura 7 – Diagrama P & I da Caldeira

Fonte: VALDMAN (2010)

As especificações técnicas da caldeira são apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Especificações técnicas da Caldeira (Modelo CV-VDM-500)

Variável	Valor
Capacidade de Produção de Vapor, com água a 20°C	500 kg/h
Potencia térmica nominal	0,3 MW
Característica do Vapor	saturado
Pressão máxima de trabalho	8,00 kgf/cm ²
Categoria	B
Combustível principal	óleo diesel
Combustível auxiliar	não possui
Tiragem	forçada por insuflação
Superfície de aquecimento	22,80 m ²
Número de Passes	01 (um)
	01 (uma)
	94 (noventa e quatro)
	câmara de combustão
	tubos de 1 ½ " de diâmetro com 1,938m
Volume médio de água durante o uso normal	0,6m ³
Vaporização específica por m ³ de superfície de aquecimento	25 kg/h
Saída de gases (Chaminé)	
Seção de passagem	Circular
Dimensão	300 mm de diâmetro
Área média	900 cm ²

Fonte: VALDMAN (2010)

A tabela 9 evidencia que o óleo diesel deve ser utilizado como combustível da caldeira. Entretanto, considerando o projeto do bico dos queimadores da caldeira, compatível com as características físico-químicas do óleo diesel de uso rodoviário e do biodiesel, torna-se possível a operação com estes combustíveis puros ou misturados em diferentes proporções. Visando manter a demanda de vapor constante, a vazão de vapor foi fixada através de uma válvula manual que permite o descarte de toda a produção para a atmosfera, através de uma linha de saída concebida para este fim.

A instrumentação aplicada à caldeira é composta de:

- Controlador dedicado – é o equipamento responsável pela partida da caldeira, diagnóstico de falha e manutenção da segurança da operação;
- Controlador lógico programável (CLP) – é o equipamento responsável pela monitoração das variáveis discretas envolvidas no diagnóstico de falha e por disponibilizá-las na rede de instrumentação *fieldbus* utilizada para monitoração *online*;
- Transmissores *fieldbus* – são os instrumentos responsáveis pela monitoração das variáveis contínuas do processo; e
- Sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) iFix Proficy® – é o *software* responsável pela monitoração e supervisão das variáveis de processo através de telas gráficas, armazenamento de dados e geração de relatórios.

As variáveis monitoradas pelo sistema SCADA, desenvolvidas em trabalhos anteriores (VALDMAN *et al*, 2010), podem ser classificadas segundo a nomenclatura: variáveis de medição contínua, obtidas pelos transmissores *fieldbus*; variáveis de medição discreta, disponibilizadas pelo CLP; e variáveis calculadas contínuas disponibilizadas no próprio sistema SCADA ou informadas pelo operador ao longo do processo. Tais variáveis encontram-se discriminadas nas tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 – Variáveis de Medição Contínua disponíveis na Instrumentação *fieldbus* da Caldeira

TAG	Descrição	Faixas de Medida
LIT-1013	Nível do tanque de alimentação de combustível	37,50 a 353,00 L
LIT-1021	Nível do tanque de alimentação de água	0 a 100,00%
LIT-1026	Nível da caldeira	0 a 100,00%
FIT-1024	Vazão de água de alimentação	0 a 5,2 m ³ /h
FIT-1031	Vazão de vapor	0 a 500,00 kg/h
PIT-1032	Pressão de vapor na linha	0 a 100,00 psi
TIT-1011	Temperatura do óleo combustível	0 a 100,00 °C
TIT-1023	Temperatura da água de alimentação	0 a 400,00 °C
TIT-1042	Temperatura dos gases residuais	0 a 100,00 °C

Fonte: VALDMAN (2010)

Tabela 11 – Variáveis de Medição Discreta disponíveis na Instrumentação Analógica/CLP/ fieldbus da Caldeira

TAG	Descrição
BB-1011	Bomba de alimentação de biodiesel aos tanques de armazenamento
BB-1012	Bomba de alimentação de diesel aos tanques de armazenamento
BB-1013	Bomba de alimentação de diesel ao tanque de mistura
MT-1014	Motor de agitação ao tanque de mistura
PSH-1026	Alarme – pressostato de alta
LSSL-1026	Alarme – nível baixo de água
BB-1015	Bomba de alimentação de combustível à caldeira
BB-1021	Bomba de alimentação de água à caldeira
MT-1016	Soprador
XSL-1012	Alarme – falha de chama
XSH-1011	Queimador ligado

Fonte: VALDMAN (2010)

Tabela 12 – Variáveis Calculadas Contínuas e Variáveis Informadas ao Sistema SCADA da Caldeira

TAG	Descrição	Faixas de Medida	Característica
SI-1046	Ajuste do excesso de ar a ser fornecido à caldeira	0 a 100%	entrada manual
COMB	Proporção de biodiesel na mistura	0 a 100%	entrada manual
DENS	Densidade da mistura	0 a 1,000 kg/m ³	entrada manual
PCALOR	Poder calorífico da mistura	0 a 50000 kJ/kg	entrada manual
TMFIT-1031	Totalização de vapor produzido	0 a 999999 kg/h	calculada
CA_EF	Eficiência da caldeira	0 a 100,00%	calculada

Fonte: VALDMAN (2010)

As variáveis de medição discreta são visualizadas através de símbolos gráficos com cores padronizadas: vermelho, para indicar equipamento ligado ou operação em falha para as condições de alarme; e verde, para indicar equipamento desligado ou operação normal para as condições de alarme. No entanto, para efeitos de armazenamento de dados, estas variáveis assumem o

valor de 1 para equipamentos ligados ou indicação de alarme e 0 para equipamentos desligados ou operação normal (VALDMAN, 2010).

Às variáveis densidade de mistura (DENS), poder calorífico da mistura (PCALOR), ajuste do excesso de ar a ser fornecido à caldeira (SI-1046) e proporção de biodiesel na mistura (COMB) foram atribuídas a designação de variáveis manuais, uma vez que seus valores foram específicos para cada teste realizado na caldeira (VALDMAN, 2010).

Finalmente, visando à análise do gás de combustão, acoplou-se à caldeira um Analisador de Gases, da marca Testo 350M/XL, equipado com uma entrada de sonda, uma sonda de pressão diferencial integrada e uma caixa analisadora com cinco células eletroquímicas de medição de: O₂, CO, NO, NO₂ e SO₂ e uma célula de infravermelho de CO₂ (VALDMAN, 2010).

III.2. Testes Experimentais

Na planta piloto do LADEQ foram previamente realizados os testes listados na tabela 13 (VALDMAN *et al*, 2010), com o objetivo de avaliar a eficiência da caldeira quando da operação com óleo diesel, biodiesel de óleo de dendê ou mistura desses combustíveis, em diferentes proporções. Foram usadas duas remessas de óleo diesel. Em cada teste, a combustão foi efetuada em corridas com porcentagens de 30%, 20% e 10% de excesso de ar, aplicadas em intervalos sucessivos de uma hora, respectivamente. Vale ressaltar que os testes foram precedidos de análises em laboratório das propriedades físicas e químicas das misturas diesel/biodiesel, acionamento do soprador para a purga inicial, abertura das válvulas de combustível e o centelhamento para dar início ao processo de queima. Dessa forma, cada teste apresentou duração superior às três horas de operação efetiva da caldeira.

Tabela 13 – Testes Realizados na Caldeira

Teste	Remessa de Diesel	Porcentagem de Biodiesel (%)	Nomenclatura
1	1	0	D
2	1	20	DBd20
3	1	40	DBd40
4	1	50	DBd50
5	1	0	D_2
6	1	50	DBd50_2
7	1	30	DBd30
8	1	40	DBd40_2
9	2	0	D_3
10	2	60	DBd60
11	2	60	DBd60_2
12	2	30	DBd30_2
13	-	100	Bd
14	2	0	D_4
15	2	0	D_5
16	2	30	DBd30_3

Na tabela 13, adotou-se a nomenclatura:

DBdXX_Y

D – Diesel de uso rodoviário

Bd – Biodiesel proveniente de óleo de dendê

XX – Porcentagem de biodiesel na mistura (%v/v)

Y – Número da réplica (começando a partir de 2)

O sistema SCADA possibilitou, para cada teste, a aquisição e monitoração dos dados da caldeira mostrados nas tabelas 10, 11 e 12, cujo armazenamento foi realizado em uma planilha de Excel denominada “Completo”. Por outro lado, o Analisador de Gases forneceu a composição do gás de combustão liberado pela chaminé, para cada teste, sendo o armazenamento dos dados realizado na planilha “Analisador”. Durante a sua execução, cada teste contou ainda com o registro de todas as informações pertinentes à operação da caldeira na planilha “Relatório”.

III.3. Cálculo de Eficiência da Caldeira

A eficiência de uma caldeira é uma medida da transferência de energia do combustível para o vapor na forma de calor. Contudo, uma parcela dessa energia é perdida para o ambiente, devido à transferência de calor por radiação e convecção. Devem ser considerados também os créditos de calor sensível provenientes dos reagentes envolvidos na combustão. Genericamente, o cálculo da eficiência se resume à subtração de 100 do quociente de perdas/créditos, conforme a equação (1):

$$Eficiência(\%) = 100 - \frac{Perdas(\%)}{Créditos(\%)} \quad (1)$$

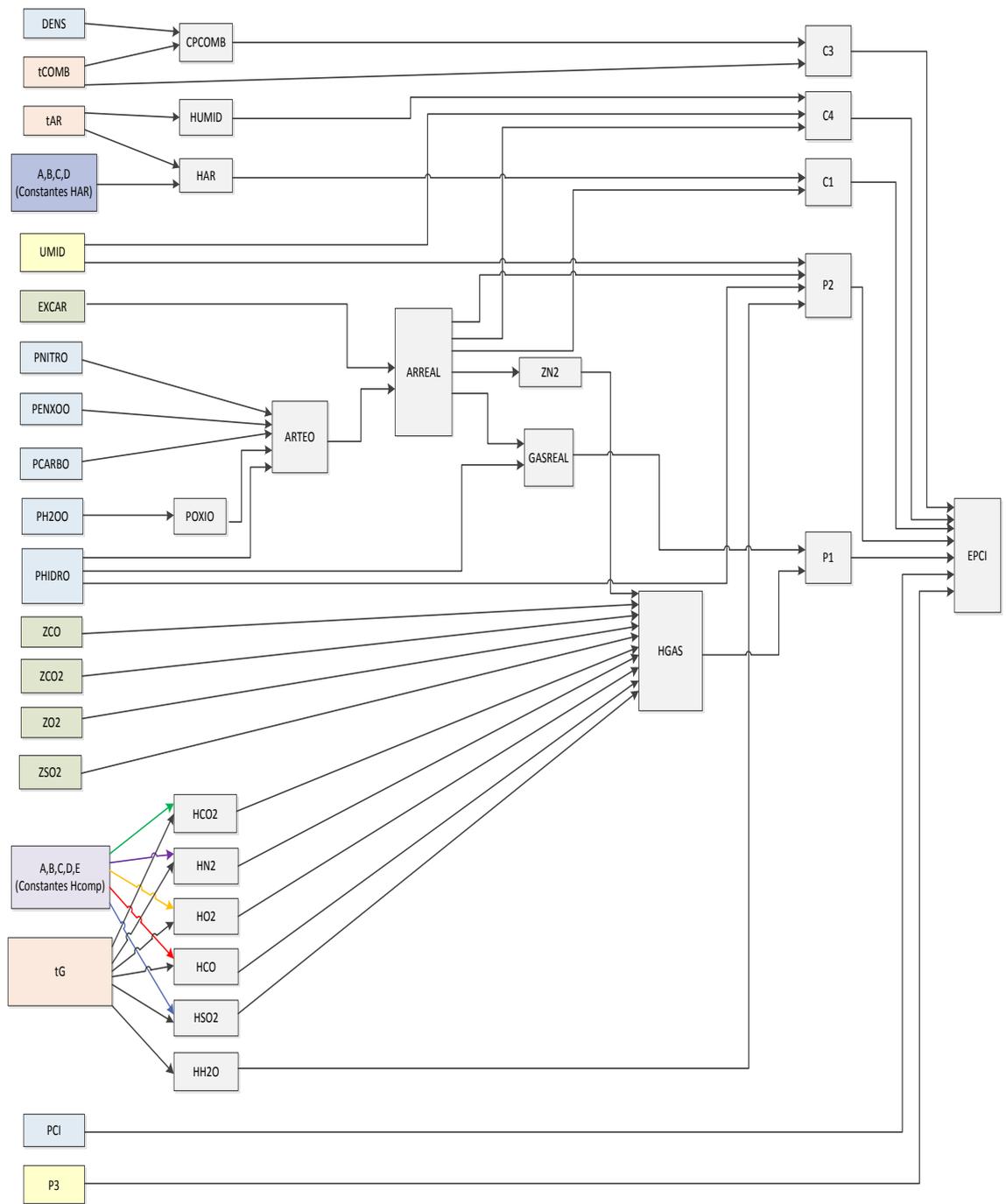
Segundo ASME (2008), o cálculo da eficiência (EPCI) de uma caldeira pelo Método das Perdas é realizado considerando perdas e créditos de calor sensível, bem como o poder calorífico inferior, de acordo com a equação (2):

$$EPCI(\%) = 100 \times \left(1 - P3 - \frac{P1+P2}{PCI+C1+C2+C3+C4} \right) \quad (2)$$

Onde:

- P1: Perda de calor sensível pelos gases, em base seca (kcal/kg)
- P2: Perda de calor sensível pelos gases devido à água (kcal/kg)
- P3: Perda de calor pelas paredes (adimensional)
- C1: Crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (kcal/kg)
- C2: Crédito devido ao calor sensível do vapor de atomização – considerado nulo, nesse trabalho, uma vez que a caldeira não apresenta vapor de atomização (kcal/kg)
- C3: Crédito devido ao calor sensível do combustível (kcal/kg)
- C4: Crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão (kcal/kg)
- PCI: Poder calorífico inferior do combustível (kcal/kg)
- EPCI: Eficiência da caldeira (%)

O fluxograma da figura 8 ilustra o encadeamento das variáveis utilizadas no Método das Perdas.



Legenda			
	Variável proveniente do Analisador		Constantes referentes ao CO2
	Variável proveniente das Análises em Laboratório		Constantes referente ao N2
	Variável proveniente da Instrumentação da Caldeira		Constantes referentes ao O2
	Constantes Dependentes dos Componentes do Gás de Combustão		Constantes referentes ao CO
	Constantes para Cálculo de HAR		Constantes referentes ao SO2
	Valores Considerados Constantes		
	Variáveis Calculadas		

Figura 8 – Fluxograma de Cálculo da Eficiência da Caldeira

A identificação da interdependência das variáveis permitiu o estabelecimento de um algoritmo para o cálculo da eficiência, no qual se discriminam as variáveis de entrada, intermediárias e de saída mostradas nas tabelas 14, 15 e 16, com suas respectivas procedências.

Tabela 14 – Variáveis de Entrada

Sigla	Descrição	Unidades	Procedência	TAG
DENS	Densidade do óleo combustível	d60/60 ²	AL	-
P3	Perda de calor pelas paredes	-	FX	-
UMID	Umidade absoluta do ar	kg de água/kg de ar	FX	-
PNITRO	Porcentagem em massa de nitrogênio no combustível	% m/m	AL	-
PCARBO	Porcentagem em massa de carbono no combustível	% m/m	AL	-
PENXOO	Porcentagem em massa de enxofre no combustível	% m/m	AL	-
PH ₂ OO	Porcentagem em massa de água no combustível	% m/m	AL	-
PHIDRO	Porcentagem em massa de hidrogênio no combustível	% m/m	AL	-
ZCO ₂	Porcentagem em massa de CO ₂ no gás de combustão, base seca	% m/m	AN	-
ZO ₂	Porcentagem em massa de oxigênio no gás de combustão, base seca	% m/m	AN	-
ZCO	Porcentagem em massa de CO no gás de combustão, base seca	% m/m	AN	-
ZSO ₂	Porcentagem em massa de SO ₂ no gás de combustão, base seca	% m/m	AN	-
EXCAR	Excesso de ar de combustão	kg de ar/kg de combustível	AN	-
PCI	Poder calorífico inferior do combustível	kcal/kg	AL	-
tAR	Temperatura do ar de combustão	°C	IN	TIT-1023
tCOMB	Temperatura do combustível	°C	IN	TIT-1011
tG	Temperatura do gás de combustão	°C	IN	TIT-1042

Na tabela 14, a seguinte nomenclatura é válida:

AL – Análises em laboratório

AN – Analisador

IN – Instrumentação da caldeira

FX – Valor fixado

² Unidade para densidade D60/60 de óleo combustível a 60°F. Valores expressos nessa unidade correspondem aproximadamente aos valores expressos em g/cm³ (ASME, 2008).

Tabela 15 – Variáveis Intermediárias

Sigla	Descrição	Unidades
CPCOMB	Capacidade térmica específica do óleo combustível	kcal/(kg .°C)
HUMID	Entalpia da umidade do ar à temperatura do ar de combustão	kcal/kg
ZN ₂	Porcentagem em massa de nitrogênio no gás de combustão, base seca	% m/m
POXIO	Porcentagem em massa de oxigênio no combustível	% m/m
HAR	Entalpia do ar à temperatura do ar de combustão em base seca	kcal/kg
HCO	Entalpia do componente CO à temperatura do gás de combustão	kcal/kg
HCO ₂	Entalpia do componente CO ₂ à temperatura do gás de combustão	kcal/kg
HGAS	Entalpia do gás de combustão em base seca	kcal/kg
HH ₂ O	Entalpia da água à temperatura do gás de combustão	kcal/kg
HN ₂	Entalpia do nitrogênio à temperatura do gás de combustão em base seca	kcal/kg
HO ₂	Entalpia do oxigênio à temperatura do gás de combustão em base seca	kcal/kg
HSO ₂	Entalpia do componente SO ₂ à temperatura do gás de combustão em base seca	kcal/kg
ARTEO	Ar teórico	kg de ar/kg de combustível
ARREAL	Ar real utilizado na combustão	kg de ar/kg de combustível
GASREAL	Gás real de combustão em base seca	kg de gás/kg de combustível

Tabela 16 – Variáveis de Saída

Sigla	Descrição	Unidades
P1	Perda de calor sensível pelos gases, base seca	kcal/kg
P2	Perda de calor sensível pelos gases devido à água	kcal/kg
C1	Crédito devido ao calor sensível do ar de combustão	kcal/kg
C3	Crédito devido ao calor sensível do combustível	kcal/kg
C4	Crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão	kcal/kg
EPCI	Eficiência da caldeira referida ao PCI	%

III.3.1. Cálculo da Perda de Calor Sensível pelos Gases

A perda de calor sensível pelos gases, em base seca (P1) foi obtida mediante a equação (3):

$$P1 = GASREAL \times HGAS \quad (3)$$

Onde:

GASREAL: gás real de combustão, em base seca (kg de gás/kg de combustível)

HGAS: entalpia do gás de combustão, em base seca (kcal/kg)

P1: perda de calor sensível pelos gases, em base seca (kcal/kg)

O valor de GASREAL foi obtido por meio da equação (4):

$$GASREAL = ARREAL + 1 - 8,937 \times \frac{PHIDRO}{100} \quad (4)$$

Onde:

PHIDRO: porcentagem em massa de hidrogênio no combustível – obtida das análises em laboratório (%m/m)

ARREAL: ar real utilizado na combustão (kg de ar/kg de combustível)

GASREAL: gás real de combustão, em base seca (kg de gás/kg de combustível)

A variável ARREAL foi obtida através da equação (5):

$$ARREAL = ARTEO + EXCAR \quad (5)$$

Onde:

EXCAR: excesso de ar de combustão – obtido do analisador (kg de ar/kg de combustível)

ARTEO: ar teórico de combustão (kg de ar/kg de combustível)

ARREAL: ar real utilizado na combustão (kg de ar/kg de combustível)

A variável ARTEO foi obtida através da equação (6):

$$ARTEO = 0,1144 \times PCARBO + 0,34073 \times PHIDRO + 0,042851 \times PENXOO + 0,098085 \times PNITRO - 0,042932 \times POXIO \quad (6)$$

Onde:

PCARBO: porcentagem em massa de carbono no combustível – obtida das análises em laboratório (%m/m)

PHIDRO: porcentagem em massa de hidrogênio no combustível – obtida das análises em laboratório (%m/m)

PENXOO: porcentagem em massa de enxofre no combustível – obtida das análises em laboratório (%m/m)

POXIO: porcentagem em massa de oxigênio no combustível (%m/m)

A variável POXIO foi obtida através da equação (7):

$$POXIO = 0,8881 \times PH_2OO \quad (7)$$

Onde:

PH₂OO: porcentagem em massa de água no combustível – obtida das análises em laboratório (%m/m)

POXIO: porcentagem em massa de oxigênio no combustível (%m/m)

Em contrapartida, a variável HGAS foi determinada mediante a equação (8):

$$HGAS = \frac{HO_2 \times ZO_2 + HCO_2 \times ZCO_2 + HN_2 \times ZN_2 + HCO \times ZCO + HSO_2 \times ZSO_2}{32 \times ZO_2 + 44,01 \times ZCO_2 + 28,016 \times ZN_2 + 28,01 \times ZCO + 64,06 \times ZSO_2} \quad (8)$$

Onde:

HCO₂: entalpia do CO₂ à temperatura do gás de combustão em base seca (kcal/kg)

HCO: entalpia do CO à temperatura do gás de combustão em base seca (kcal/kg)

HSO₂: entalpia do SO₂ à temperatura do gás de combustão em base seca (kcal/kg)

HO₂: entalpia do O₂ à temperatura do gás de combustão em base seca (kcal/kg)

HN₂: entalpia do N₂ à temperatura do gás de combustão em base seca (kcal/kg)

ZCO₂: porcentagem em massa de CO₂ no gás de combustão, base seca – obtida do analisador (%m/m)

ZCO: porcentagem em massa de CO no gás de combustão, base seca – obtida do analisador (%m/m)

ZSO₂: porcentagem em massa de SO₂ no gás de combustão, base seca – obtida do analisador (%m/m)

ZO₂: porcentagem em massa de O₂ no gás de combustão, base seca – obtida do analisador (%m/m)

ZN₂: porcentagem em massa de N₂ no gás de combustão, base seca (%m/m)

HGAS: entalpia do gás de combustão, em base seca (kcal/kg)

As entalpias HCO₂, HCO, HSO₂, HO₂ e HN₂ foram obtidas mediante as equações (9) e (10):

$$H_{comp} = TG \times \{A + TG \times \{5 \cdot 10^{-4} \times B + TG \times [33,33 \cdot 10^{-8} \times C + (25 \cdot 10^{-11} \times D \times TG)]\}\} - E \quad (9)$$

$$TG = tG + 273,15 \quad (10)$$

Onde:

TG: temperatura do gás de combustão (K)

tG: temperatura do gás de combustão – obtida da instrumentação da caldeira (°C).

As constantes A, B, C, D e E foram determinadas como mostra a tabela 17.

Tabela 17 – Constantes para cálculo de H_{comp}

Componente	A	B	C	D	E
CO ₂	5,14	15,40	-9,94	2,42	2133,94
N ₂	7,07	-1,32	3,31	-1,26	2076,00
SO ₂	5,85	15,40	-11,10	2,91	2336,35
O ₂	6,22	2,71	-0,37	-0,22	1971,24
CO	6,92	-0,65	2,80	-1,14	2056,79

A porcentagem em massa de N₂ (ZN₂) foi obtida pela equação (11):

$$ZN_2 = 0,79 \times ARREAL \quad (11)$$

Onde:

ARREAL: ar real utilizado na combustão – obtido da equação (5) (kg de ar/kg de combustível)

ZN₂: porcentagem em massa de N₂ no gás de combustão (%m/m)

III.3.2. Cálculo da Perda de Calor Sensível pelos Gases devido à Água

A perda de calor sensível pelos gases devido à água (P2) foi determinada como mostra a equação (12):

$$P2 = \left(UMID \times ARREAL + \frac{8,937 \times PHIDRO}{100} \right) \times (HH_2O - 608,2) \quad (12)$$

Onde:

UMID: umidade absoluta do ar – cujo valor foi fixado em 0,01 de acordo com OLIVEIRA; BISPO (2008) (kg de água/kg de ar)

ARREAL: ar real utilizado na combustão – obtido da equação (5) (kg de ar/kg de combustível)

PHIDRO: porcentagem em massa de hidrogênio no combustível – obtida das análises em laboratório (%m/m)

HH₂O: entalpia de água à temperatura do gás de combustão – obtida mediante interpolação linear da temperatura em tabela de vapor superaquecido de SMITH *et al* (2007) (kcal/kg)

P2: perda de calor sensível pelos gases devido à água (kcal/kg)

III.3.3. Cálculo da Perda de Calor pelas Paredes

A equação (13) permite a obtenção da perda de calor pelas paredes (P3):

$$P3 = \frac{U_{ext} \times A_{ext} \times (t_{ext} - t_{amb})}{PCI \times Q_{COMB}} \quad (13)$$

Onde:

U_{ext} : coeficiente de película externo global (kcal/(h.m².°C))

A_{ext} : área externa da carcaça da caldeira (m²)

t_{ext} : temperatura externa da carcaça da caldeira (°C)

t_{amb} : temperatura ambiente de bulbo seco (°C)

Q_{COMB} : vazão do combustível (kg/h)

PCI: poder calorífico do combustível (kcal/kg)

P3: perda de calor pelas paredes (kcal/kg)

Segundo ASME (2008), a perda P3 pode assumir os valores:

P3 = 0,005 a 0,015, para caldeiras

P3 = 0,015 a 0,03 para fornos sem sistema de pré-aquecimento

P3 = 0,02 a 0,035, para fornos com sistemas de pré-aquecimento

No presente trabalho, devido a impossibilidade de medição de t_{ext} pela instrumentação instalada na planta piloto, atribuiu-se o valor 0,01 para P3, média aritmética dos limites da faixa 0,005-0,015, de acordo com OLIVEIRA; BISPO (2008).

III.3.4. Crédito devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão

O crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (C1) foi determinado conforme a equação (14):

$$C1 = ARREAL \times HAR \quad (14)$$

Onde:

ARREAL: ar real utilizado na combustão – obtido da equação (5) (kg de ar/kg de combustível)

HAR: entalpia do ar seco à temperatura do ar de combustão em base seca (kcal/kg)

C1: crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (kcal/kg)

A entalpia do ar seco (HAR) foi determinada através das equações (15) e (16):

$$HAR = \frac{TAR \times \{A + TAR \times [B + TAR \times \{C + TAR \times D\}]\}}{28,85} - 71,0 \quad (15)$$

$$TAR = tAR + 273,15 \quad (16)$$

Onde:

A: constante de valor igual a 6,871

B: constante de valor igual a $-2,285 \times 10^{-4}$

C: constante de valor igual a $8,340 \times 10^{-7}$

D: constante de valor igual a $-2,573 \times 10^{-10}$

TAR: temperatura do ar de combustão (K)

tAR: temperatura do ar de combustão – obtida da instrumentação da caldeira (°C)

III.3.5. Crédito devido ao Calor Sensível do Combustível

O crédito devido ao calor sensível do combustível (C3) foi determinado pela equação (17):

$$C3 = CPCOMB \times (tCOMB - 25) \quad (17)$$

Onde:

tCOMB: temperatura do combustível – obtida da instrumentação da caldeira (°C)

CPCOMB: capacidade térmica específica do combustível (kcal/(kg.°C))

C3: crédito devido ao calor sensível do combustível (kcal/kg)

A variável CPCOMB foi determinada mediante a equação (18):

$$CPCOMB = \frac{1}{(DENS)^{0,5}} \times (0,40074 + 0,0008115 \times tCOMB) \quad (18)$$

Onde:

DENS: densidade do óleo combustível (d60/60)

tCOMB: temperatura do combustível – obtida da instrumentação da caldeira (°C)

III.3.6. Crédito devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão

O crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão (C4) foi obtido segundo a equação (19):

$$C4 = UMID \times ARREAL \times (HUMID - 608,2) \quad (19)$$

UMID: umidade absoluta do ar – cujo valor foi fixado em 0,01 de acordo com OLIVEIRA; BISPO (2008) (kg de água/kg de ar)

ARREAL: ar real utilizado na combustão – obtido da equação (5) (kg de ar/kg de combustível)

HUMID: entalpia da umidade do ar à temperatura do ar de combustão (kcal/kg)

C4: crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão (kcal/kg)

A variável HUMID foi determinada utilizando-se as equações (20) e (21):

$$HUMID = 0,3462 \times T + 0,0000916 \times T^2 + 14,05 \ln[T/100] + 481,4 \quad (20)$$

$$T = tAR + 273,15 \quad (21)$$

Onde:

tAR: temperatura do ar de combustão – obtida da instrumentação da caldeira (°C).

III.4. Metodologia para Análise de Resultados

A figura 9 apresenta as etapas do algoritmo que foram desenvolvidas para o método de cálculo da eficiência descrito anteriormente. Inicialmente, esse algoritmo foi aplicado utilizando dados de testes anteriores (VALDMAN *et al*, 2010) para validação *offline* do método e comparação dos resultados. Posteriormente, esse algoritmo foi adaptado e implementado no sistema SCADA, permitindo a análise *online* da eficiência durante a operação da caldeira.

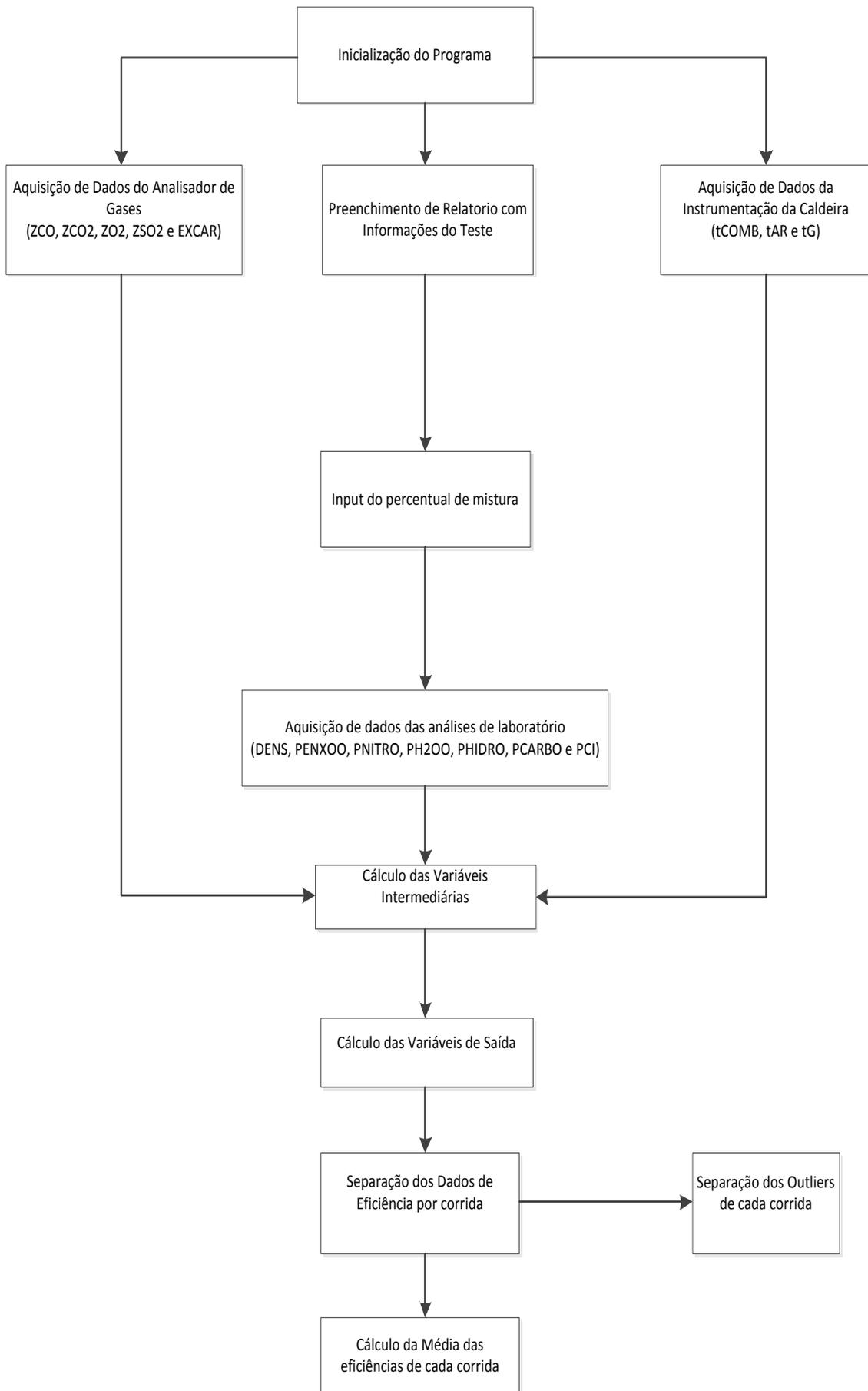


Figura 9 – Etapas do Algoritmo para Cálculo da Eficiência da Caldeira

Ao longo do teste, o operador preenche a planilha “Relatório”, que inclui todas as observações do teste realizado, além da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel. Utilizando os dados da planilha “Relatório” e os dados obtidos pelo Analisador e pela instrumentação da caldeira, o programa calcula as variáveis intermediárias e de saída para cada instante de tempo, cuja composição do gás de combustão da caldeira é determinada pelo Analisador de Gases. Para as análises dos testes anteriores (VALDMAN *et al*, 2010) foi desenvolvido um programa em VBA/Excel para cálculo e separação dos valores de eficiência obtidos para cada corrida com porcentagem de excesso de ar ajustada pelo operador (30%, 20% e 10% de excesso de ar, respectivamente). Para cada corrida, após a separação dos eventuais valores discrepantes de eficiência (*outliers*), o programa calcula as médias aritméticas das eficiências correspondentes. A figura 10 apresenta a interface desenvolvida aplicada a um teste. Na análise *online*, a eficiência é calculada continuamente, em intervalos de 10 segundos, a partir da leitura das variáveis provenientes da instrumentação da caldeira, através de interface desenvolvida em VBA/SCADA.

Corrida com 30% de excesso de ar			Pontos retirados		
Instante	Tempo(s)	EPCI (%)	Instante	Tempo(s)	EPCI (%)
08:06:30	29310	79,17			
08:09:30	29370	79,64	07:58:28	17964	81,57
08:17:32	29652	78,89	07:59:24	17964	81,57
08:18:32	29912	79,42	07:59:24	18060	80,82
08:19:32	29972	79,27	07:59:24	18156	80,07
08:27:34	30454	79,20	07:59:24	18252	80,32
08:28:34	30514	79,61	07:59:24	18348	79,48
08:29:34	30574	79,51	07:59:24	18444	79,54
08:37:36	31056	79,75	07:59:24	18540	79,88
08:38:36	31116	79,76	08:07:36	18636	80,20
08:39:36	31176	79,16	Corrida com 20% de Excesso de Ar		
Instante	Tempo(s)	EPCI (%)	Instante	Tempo(s)	EPCI (%)
08:47:38	31658	80,14	08:07:36	18732	81,52
08:48:38	31718	80,11	08:07:36	18828	80,38
08:49:38	31778	80,22	08:07:36	18924	80,38
08:57:40	32260	80,06	Corrida com 10% de Excesso de Ar		
Instante	Tempo(s)	EPCI (%)	Instante	Tempo(s)	EPCI (%)
08:58:40	32320	80,09	08:07:36	19020	80,52
08:59:40	32380	80,11	08:07:36	19116	80,52
	Média	79,70	08:07:36	19212	80,52
Corrida com 20% de excesso de ar					
Instante	Tempo(s)	EPCI (%)			
09:00:42	32922	84,38			
09:09:42	32982	85,41			
09:17:44	33464	85,99			
09:18:44	33524	85,95			
09:19:44	33584	84,17			
09:27:46	34066	85,88			
09:28:46	34126	84,65			
09:29:46	34186	84,79			
09:37:48	34668	85,20			
09:38:48	34728	86,38			
09:39:48	34788	86,56			
09:47:50	35270	85,49			
09:48:50	35330	85,79			
09:49:50	35390	86,77			
09:57:52	35872	86,74			
09:58:52	35932	87,02			

Figura 10 – Interface do programa desenvolvido em VBA/Excel

Capítulo IV. Resultados

Este capítulo apresenta a análise das propriedades físicas e químicas das misturas diesel/biodiesel utilizadas nos testes realizados na caldeira, a análise das variáveis de saída do algoritmo de cálculo da eficiência e os detalhes do desenvolvimento da interface para cálculo da eficiência em sistema SCADA.

IV.1. Análise das Propriedades Físicas e Químicas das Misturas Diesel/Biodiesel

Nesta seção são apresentadas as propriedades físicas e químicas das misturas diesel/biodiesel, obtidas mediante análises de amostras em laboratório do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), cujos valores encontram-se na tabela 18. Adicionalmente, avaliam-se os comportamentos das propriedades relevantes para o cálculo da eficiência. Para os testes 4, 6, 10 e 11 foram consideradas as médias aritméticas das propriedades relevantes para o cálculo da eficiência. Vale ressaltar que, excetuando-se a densidade, para todas as outras propriedades avaliadas, os resultados referentes à mistura com 20% de biodiesel foram desconsiderados para efeito de análise, uma vez que esses se revelaram muito destoantes dos demais e não foi possível realizar réplica do teste com tal mistura para determinar se esses resultados eram consistentes ou se houve algum problema específico de análise.

Tabela 18 – Análises das Propriedades Físicas e Químicas das Misturas Diesel/Biodiesel Realizadas em Laboratório

Propriedades Físicas e Químicas	Unidades	Diesel de Uso Rodoviário (D)		Biodiesel de Palma (Bd)
		Remessa 1 (D1)	Remessa 2 (D2)	
		Testes 1 e 5	Testes 9, 14 e 15	Teste 13
		Valores	Valores	Valores
Densidade a 20°C	kg/m ³	849,4	836,7	882,1
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	2,93	4,48	5,16
Teor de água, máx	mg/kg	268	100	153,3
Contaminação Total, máx	mg/kg	116,5	110	255,3
Ponto de fulgor, min	°C	55	57	154
Teor de éster, min	%massa	0	0	89,5
Enxofre Total, máx	mg/kg	469,1	376	6,3
Ponto de Entupimento de filtro a frio, máx	°C	3	1	11
Estabilidade à oxidação a 110°C, min	h	19,2	18,3	45,9
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C, máx	-	3a	1a	-
Teor de Enxofre	(%m/m)	0,05988	0,0529	0,000661
Teor de Carbono	(%m/m)	86,56 ± 0,25	86,22 ± 0,29	76,87 ± 0,48
Teor de Hidrogênio	(%m/m)	13,28 ± 0,02	13,77 ± 0,02	12,34 ± 0,04
Teor de Nitrogênio	(%m/m)	0,1	0,08	0,05
PCS	kJ/kg	44621 ± 94	45 213 ± 25	39461 ± 13
PCI	kJ/kg	41759 ± 94	42 245 ± 25	36800 ± 13

Tabela 18 – Análises das Propriedades Físicas e Químicas das Misturas Diesel/Biodiesel Realizadas em Laboratório (Continuação)

Misturas D1Bd								
Porcentagem de Biodiesel na Mistura Diesel/Biodiesel								
10%	20%	30%	40%	50%		60%	70%	90%
-	Teste 2	Teste 7	Testes 3 e 8	Teste 4	Teste 6	-	-	-
Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores
853,9	856,3	859,8	862,8	866	866	-	872,5	878,85
-	3,21	-	3,64	3,87	3,87	-	-	-
-	245,06	233,59	222,12	210,65	210,65	199,18	-	-
-	128,3	-	79,8	57,8	57,8	-	-	-
-	55	-	61	68	68	-	-	-
-	15,7	-	31,7	37,9	37,9	-	-	-
-	340,5	-	235,4	212,7	212,7	-	-	-
-	6	-	0	0	0	-	-	-
-	19,1	-	21,3	22,3	22,3	-	-	-
-	-	-	1a	1a	1a	-	-	-
-	0,024	0,037	0,03	0,036	0,03	0,02164	-	-
-	82,22 ± 0,13	83,71 ± 0,05	83,39 ± 0,34	81,26 ± 1,33	81,56 ± 0,36	80,46 ± 0,25	-	-
-	14,05 ± 0,28	13,82 ± 0,08	12,84 ± 0,35	13,18 ± 0,3	13,35 ± 0,03	12,78 ± 0,02	-	-
-	0,09	0,13	0,18	0,1	0,11	0,1	-	-
-	44644 ± 96	43325 ± 29	42659 ± 67	42144 ± 33	42454 ± 234	41 995 ± 29	-	-
-	41617 ± 96	40348 ± 29	39892 ± 67	39301 ± 33	39578 ± 234	38 740 ± 29	-	-

Tabela 18 – Análises das Propriedades Físicas e Químicas das Misturas Diesel/Biodiesel Realizadas em Laboratório (Continuação)

Misturas D2Bd								
Porcentagem de Biodiesel na Mistura Diesel/Biodiesel								
10%	20%	30%	40%	50%	60%		70%	90%
-	-	Testes 12 e 16	-	-	Teste 10	Teste 11	-	-
Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores
840,65	845,2	850,35	854	858,55	863,65	863,65	867,5	877,3
-	-	4,1398	3,9547	4,0895	4,4737	4,4737	4,3808	4,7153
-	-	115,99	-	-	131,98	131,98	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	0,037	-	-	0,025	0,035	-	-
-	-	83,71 ± 0,05	-	-	81,35 ± 0,1	81,36 ± 0,26	-	-
-	-	13,82 ± 0,08	-	-	13,52 ± 0,07	13,5 ± 0,12	-	-
-	-	0,13	-	-	0,08	0,27	-	-
-	-	43325 ± 29	-	-	41864 ± 25	41897 ± 13	-	-
-	-	40348 ± 29	-	-	38950 ± 25	38987 ± 13	-	-

IV.1.1. Densidade

Os valores das densidades obtidos através das análises em laboratório das misturas diesel/biodiesel permitiram a obtenção do gráfico da figura 11.

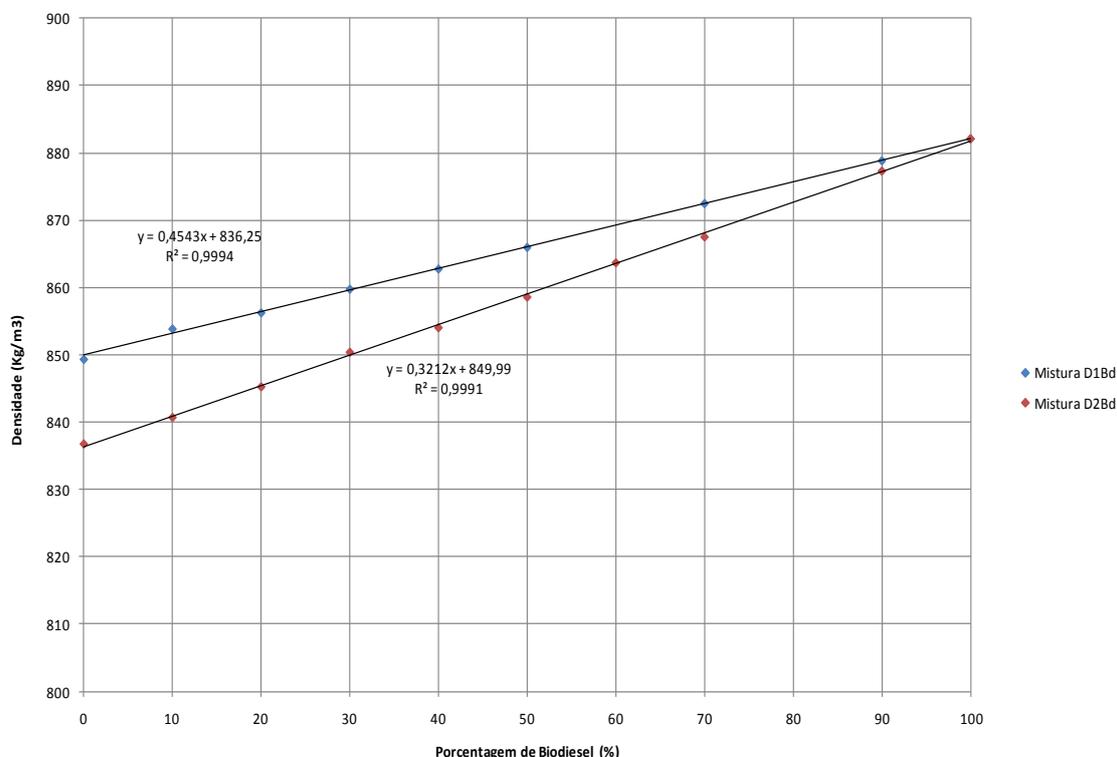


Figura 11 – Gráfico da Densidade versus Porcentagem de Biodiesel

O gráfico da figura 11 revela linhas de tendência lineares entre a densidade e a porcentagem de biodiesel para ambas as remessas de diesel ratificadas pelos coeficientes de correlação (R^2) iguais a 0,9994 e 0,9991 mostrados nas equações (22) e (23):

$$\text{densidade (D1Bd)} = 0,4543 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 836,25 \quad (22)$$

$$\text{densidade (D2Bd)} = 0,3212 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 849,99 \quad (23)$$

As equações (22) e (23) tornam possível inferir que o aumento da porcentagem de biodiesel nas misturas diesel/biodiesel implica o aumento de sua densidade.

IV.1.2. Teor de Enxofre

As análises em laboratório do teor de enxofre nas misturas diesel/biodiesel propiciaram a obtenção do gráfico da figura 12.

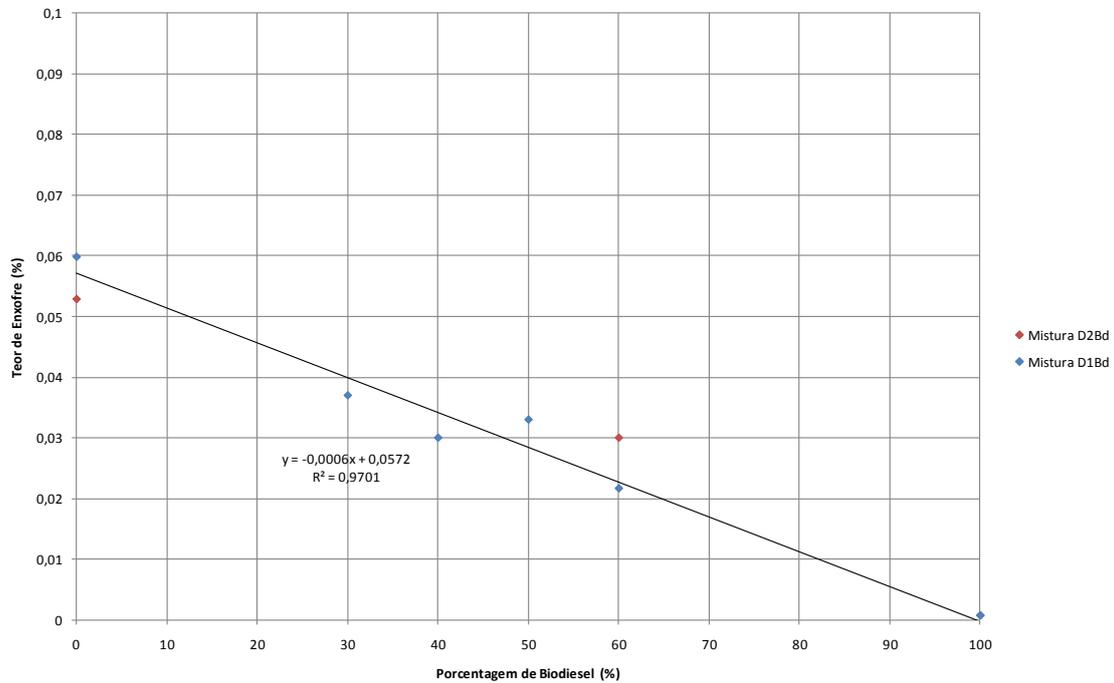


Figura 12 – Gráfico do Teor de Enxofre versus Porcentagem de Biodiesel

O gráfico da figura 12 mostra que o aumento da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel promove um decréscimo no seu teor de enxofre. Uma regressão linear dos dados com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,9701 é representada pela equação (24):

$$\text{teor de enxofre} = -0,0006 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 0,0572 \quad (24)$$

IV.1.3. Teor de Nitrogênio

As análises em laboratório do teor de nitrogênio nas misturas diesel/biodiesel possibilitaram a obtenção do gráfico da figura 13.

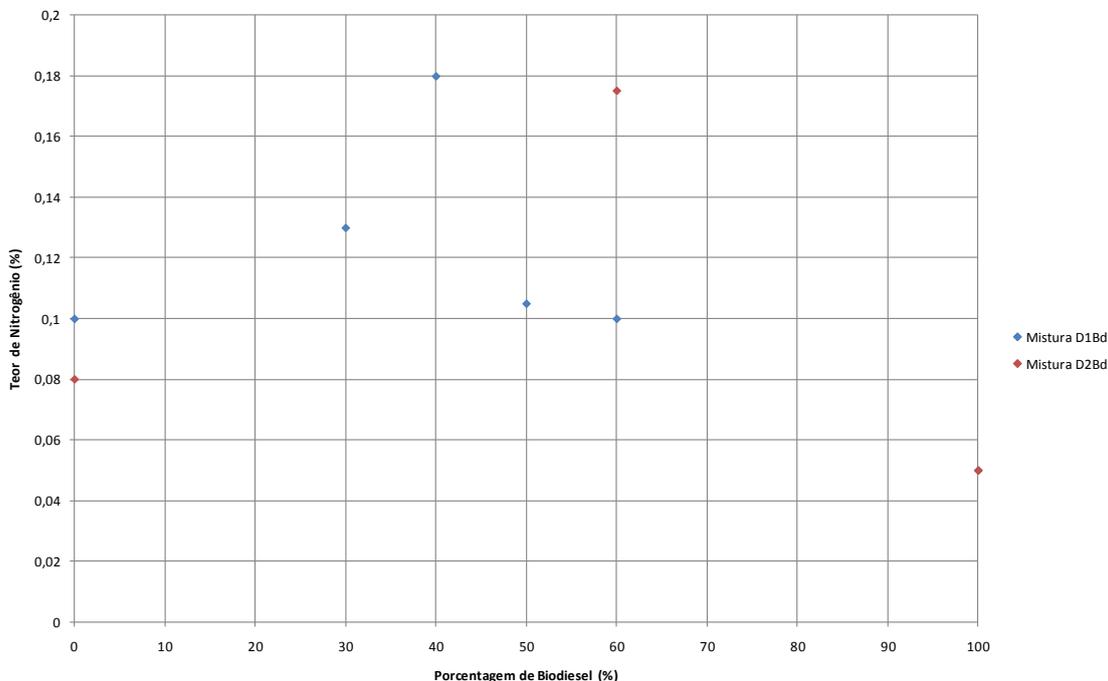


Figura 13 – Gráfico do Teor de Nitrogênio versus Porcentagem de Biodiesel

O gráfico da figura 13 evidencia um perfil em que não há uma relação direta da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel com o seu teor de nitrogênio, tornando difícil o estabelecimento de qualquer linha de tendência. Entretanto, para as misturas D1Bd, observa-se um aumento do teor de nitrogênio à medida que ocorre aumento da porcentagem de biodiesel na mistura, no intervalo de 0% a 40% de biodiesel. Por outro lado, no intervalo de 40% a 100%, observa-se uma redução do teor de nitrogênio conforme a porcentagem de biodiesel na mistura aumenta. Quanto às misturas D2Bd, observa-se um aumento do teor de nitrogênio à medida que a porcentagem de biodiesel na mistura aumenta, no intervalo de 0% a 60% de biodiesel; ao passo que, no intervalo de 60% a 100% de biodiesel, o teor de nitrogênio decresce com o aumento da porcentagem de biodiesel na mistura.

IV.1.4. Teor de Carbono

As análises em laboratório do teor de carbono nas misturas diesel/biodiesel permitiram a obtenção do gráfico da figura 14.

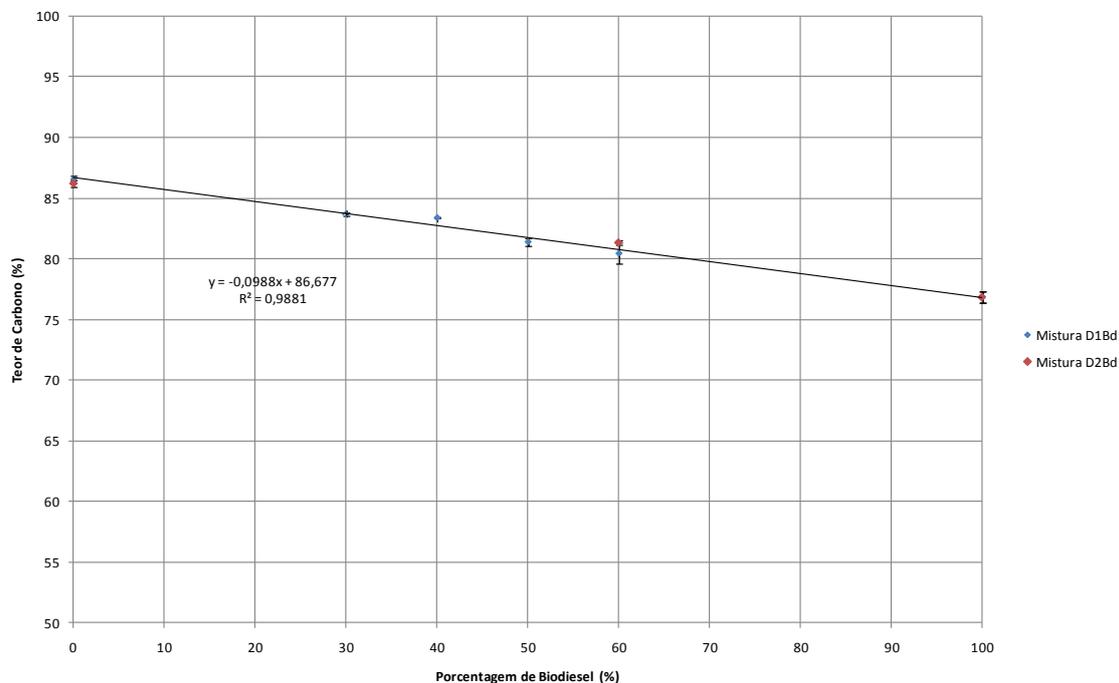


Figura 14 – Gráfico do Teor de Carbono versus Porcentagem de Biodiesel

O gráfico da figura 14 revela uma linha de tendência linear entre o teor de carbono e o porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel representada pela equação (25) e cujo coeficiente de correlação (R^2) é igual a 0,9881.

$$\text{teor de carbono} = -0,0988 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 86,677 \quad (25)$$

A equação (25) possibilita concluir que o aumento da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel promove uma redução do seu teor de carbono.

IV.1.5. Teor de Hidrogênio

As análises em laboratório do teor de hidrogênio nas misturas diesel/biodiesel possibilitaram a obtenção do gráfico da figura 15.

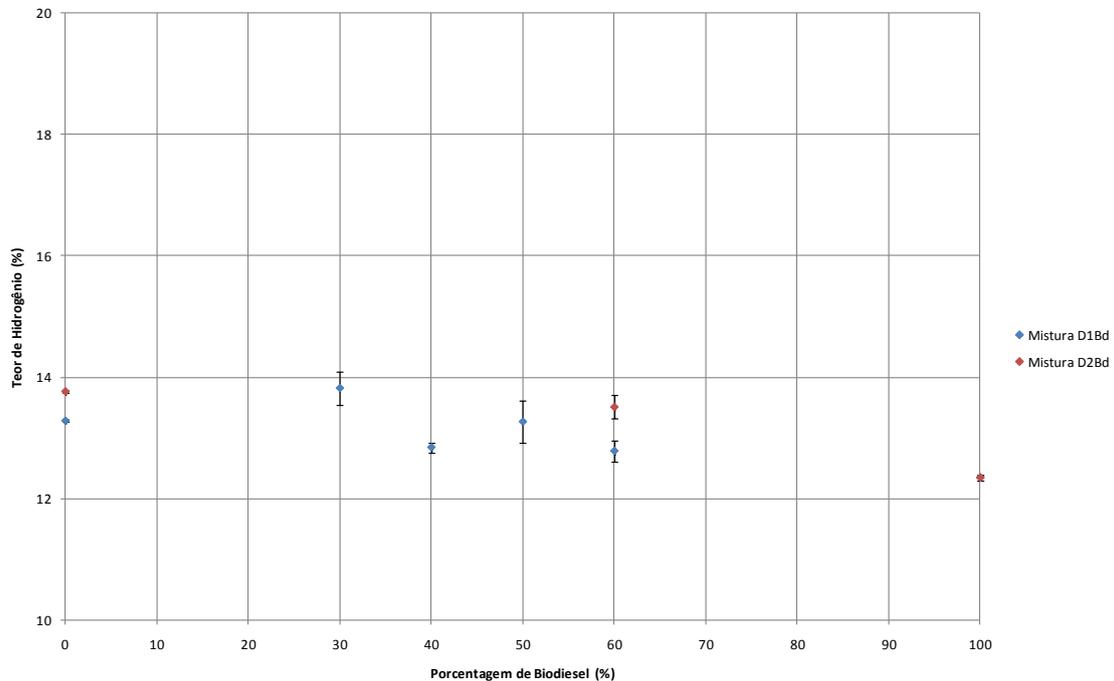


Figura 15 – Gráfico do Teor de Hidrogênio versus Porcentagem de Biodiesel

De maneira análoga ao teor de nitrogênio, o gráfico da figura 15 ilustra um perfil que não apresenta uma relação direta da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel com o seu teor de hidrogênio. Contudo, para as misturas D1Bd, o teor de hidrogênio aumenta conforme a porcentagem de biodiesel na mistura aumenta, nos intervalos de 0% a 30% de biodiesel e de 40% a 50% de biodiesel. No entanto, o teor de hidrogênio se reduz à medida que a porcentagem de biodiesel decresce nos intervalos de 30% a 40% de biodiesel e de 50% a 100% de biodiesel. Para as misturas D2Bd, observa-se uma redução significativamente menor do teor de hidrogênio com relação ao aumento da porcentagem de biodiesel na mistura, no intervalo de 0% a 60% de biodiesel, se comparado com o intervalo de 60% a 100% de biodiesel.

IV.1.6. Teor de Água

As análises em laboratório do teor de água foram realizadas apenas para os combustíveis puros. Considerou-se a hipótese de mistura ideal, obtendo-se o teor de água nas misturas diesel/biodiesel mediante a soma dos teores de água de diesel e biodiesel multiplicados pelas respectivas porcentagens de diesel e biodiesel na mistura, como mostrado abaixo:

$$\text{teor de água} = (\text{teor de água no diesel}) \times (\% \text{ diesel na mistura}) + (\text{teor de água no biodiesel}) \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) \quad (26)$$

Dessa forma obteve-se o gráfico da figura 16.

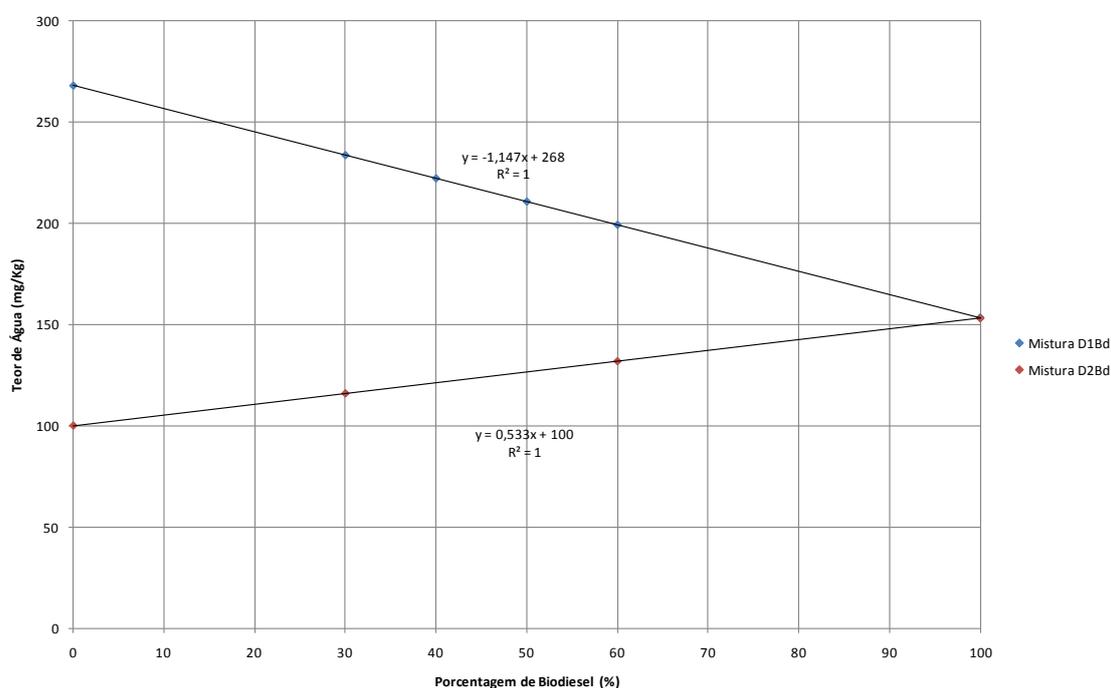


Figura 16 – Gráfico do Teor de Água versus Porcentagem de Biodiesel

O gráfico da figura 16 mostra as linhas de tendência lineares estabelecidas para relação do teor de água com a porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel, para ambas as remessas de diesel, quando da premissa de mistura ideal. As equações (27) e (28) mostram as regressões lineares obtidas para os dois casos.

$$\text{teor de água (D1Bd)} = -1,147 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 268 \quad (27)$$

$$\text{teor de água (D2Bd)} = 0,533 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 100 \quad (28)$$

As equações (27) e (28) revelam que a remessa de diesel utilizada na mistura diesel/biodiesel exerce influência no comportamento da reta do teor de água com relação à porcentagem de biodiesel na mistura. Para as misturas D1Bd, o teor de água decresce à medida que se aumenta a porcentagem de

biodiesel; e para as misturas D2Bd, o teor de água cresce à medida que se aumenta a porcentagem de biodiesel na mistura.

IV.1.7. Poder Calorífico Inferior

As análises em laboratório do poder calorífico inferior das misturas diesel/biodiesel propiciaram a obtenção do gráfico da figura 17.

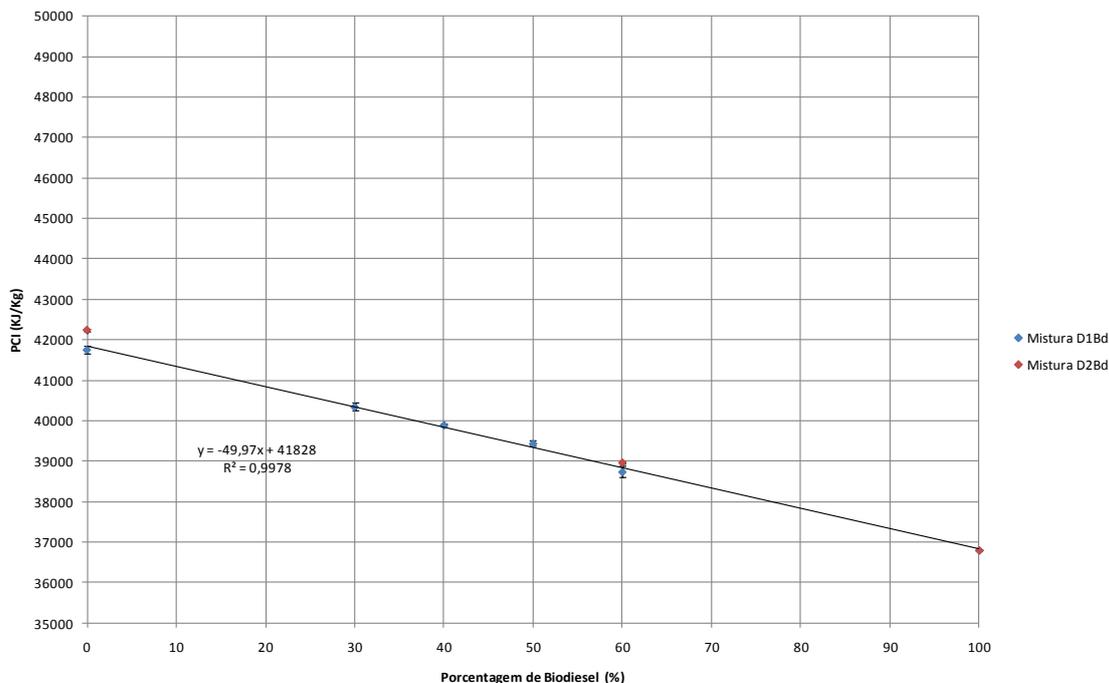


Figura 17 – Gráfico do Poder Calorífico Inferior versus Porcentagem de Biodiesel

O gráfico da figura 17 mostra uma linha de tendência linear para relação do PCI com a porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel. Essa relação é corroborada pela equação (29), cujo coeficiente de correlação (R^2) é igual a 0,9978.

$$PCI = -49,97 \times (\% \text{ biodiesel na mistura}) + 41828 \quad (29)$$

A equação (29) possibilita depreender que o aumento da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel implica uma redução do seu PCI.

IV.2. Análise das Variáveis de Saída do Algoritmo de Cálculo da Eficiência

Nesta seção, avaliam-se os comportamentos das variáveis de saída do algoritmo de cálculo da eficiência com relação à porcentagem de biodiesel na mistura e à porcentagem de excesso de ar utilizada na corrida, cujos valores encontram-se na tabela 19. Tais resultados foram obtidos mediante aplicação da média aritmética aos valores dessas variáveis para cada corrida em cada teste. Vale salientar que os pontos referentes às misturas com 20% de biodiesel foram desconsiderados, pois apresentaram comportamento muito destoante dos demais e não foi possível efetuar réplica para o teste com essa mistura para determinar se havia consistência desses resultados ou algum problema específico de análise.

Tabela 19 – Valores das Variáveis de Saída do Algoritmo de Cálculo da Eficiência

Teste			1	2	3	4	5	9	7	12	8	6	10	11	13	14	15	16
Identificação do Teste			D	DBd20	DBd40	DBd50	D_2	D_3	DBd30	DBd30_2	DBd40_2	DBd50_2	DBd60	DBd60_2	Bd	D_4	D_5	DBd30_3
Excesso Estudado (%)	Variáveis Analisadas	Unidades	0	20	40	50	0	0	30	30	40	50	60	60	100	0	0	30
30	P1	kcal/kg	1978,90	1516,26	1733,49	1701,84	2040,75	2031,90	1624,37	1815,23	1652,49	1585,63	1819,10	1663,55	2056,65	2045,36	2006,12	1833,75
30	P2	kcal/kg	157,16	149,98	146,28	147,84	160,20	161,67	152,20	155,41	144,76	144,58	152,70	148,10	146,08	159,77	160,32	154,67
30	C1	kcal/kg	43,39	36,56	45,12	14,13	6,67	73,36	67,83	60,18	63,16	72,34	66,79	72,61	72,71	0,18	-52,86	-29,36
30	C3	kcal/kg	2,18	1,69	2,07	0,48	-0,55	2,37	2,96	2,13	2,48	3,05	2,18	2,85	1,47	-0,11	-2,80	-1,96
30	C4	kcal/kg	1,04	0,88	1,09	0,31	0,12	1,79	1,66	1,46	1,54	1,77	1,63	1,77	1,77	-0,05	-1,38	-0,78
30	EPCI	%	77,68	82,30	79,37	79,40	76,95	77,43	80,70	78,69	80,27	80,78	77,97	79,70	74,15	77,15	77,41	78,30
20	P1	kcal/kg	1538,93	1138,55	1312,64	1225,54	1378,30	1563,13	1188,80	1371,29	1124,86	978,64	1217,04	1128,61	1367,79	1287,90	1270,12	1198,92
20	P2	kcal/kg	144,21	138,66	133,25	134,18	136,21	146,44	137,33	140,60	127,41	121,39	128,89	128,29	123,50	124,44	127,31	126,04
20	C1	kcal/kg	38,88	38,94	49,15	17,13	12,21	70,37	60,86	56,45	50,88	54,04	56,60	59,27	53,72	13,10	-27,48	-13,18
20	C3	kcal/kg	3,17	2,68	3,19	0,74	-0,12	2,83	3,58	2,43	3,01	3,45	2,41	3,07	1,61	0,30	-2,32	-1,43
20	C4	kcal/kg	0,93	0,95	1,20	0,40	0,27	1,72	1,49	1,38	1,24	1,33	1,38	1,45	1,31	0,29	-0,73	-0,37
20	EPCI	%	82,20	86,21	83,91	84,59	83,83	82,18	85,33	83,41	85,93	87,40	84,63	85,59	82,14	85,02	85,11	85,23
10	P1	kcal/kg	973,96	595,31	665,09	621,11	790,16	1003,71	609,01	714,88	629,94	545,66	738,68	695,76	903,03	883,86	893,74	751,32
10	P2	kcal/kg	116,14	114,87	105,81	107,03	109,10	118,40	111,69	107,29	104,76	101,08	107,00	106,50	104,76	106,79	111,11	104,84
10	C1	kcal/kg	29,25	24,45	30,92	11,83	11,55	57,13	38,23	39,68	35,10	35,41	42,93	46,06	40,32	14,39	-16,97	-5,25
10	C3	kcal/kg	4,13	2,83	3,55	1,03	0,36	3,51	4,15	2,99	3,91	3,98	2,73	3,42	1,72	0,64	-1,77	-0,58
10	C4	kcal/kg	0,70	0,59	0,75	0,28	0,26	1,40	0,94	0,97	0,86	0,87	1,05	1,13	0,98	0,33	-0,45	-0,16
10	EPCI	%	88,11	91,88	90,94	91,28	89,99	87,95	91,55	90,51	91,32	92,16	89,96	90,43	87,59	89,20	89,02	90,11

IV.2.1. Perda de Calor Sensível pelos Gases

Os resultados obtidos para a perda de calor sensível pelos gases, em base seca (P1), com relação à porcentagem de biodiesel e à porcentagem de excesso de ar originaram os gráficos das figuras 18, 19 e 20.

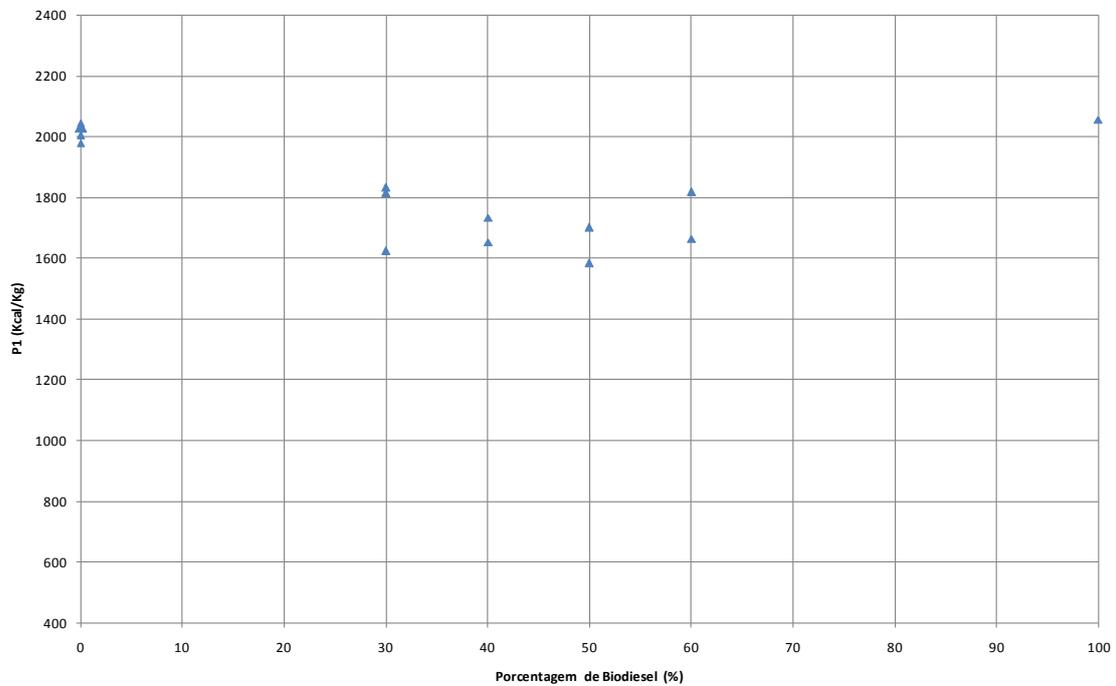


Figura 18 – Gráfico da Perda P1 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)

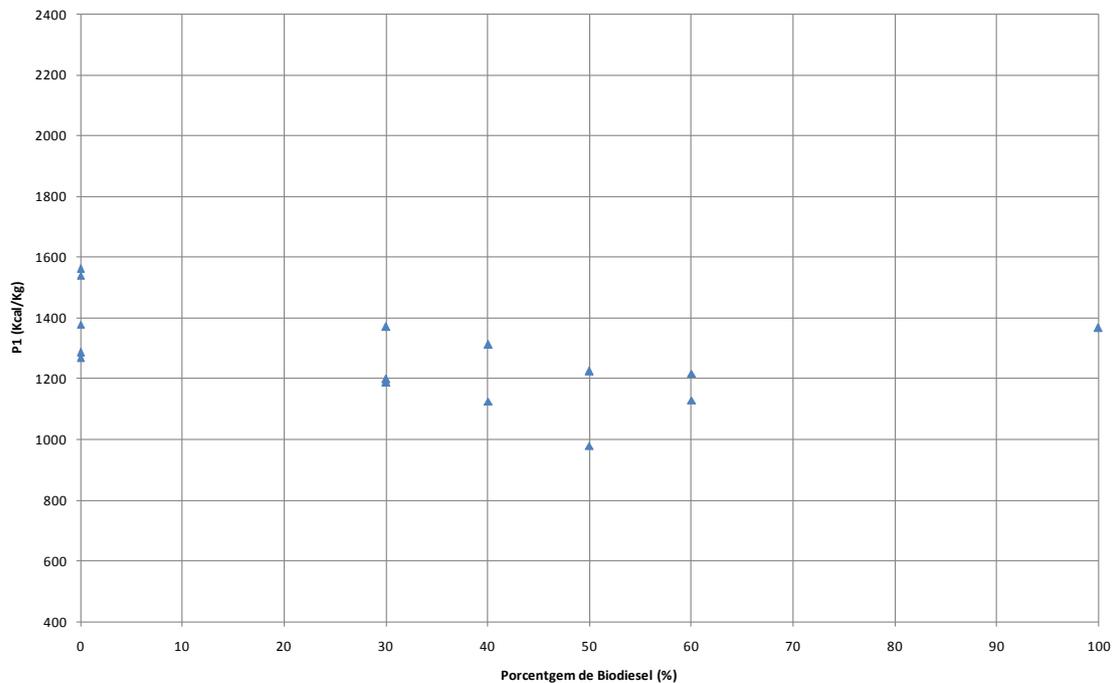


Figura 19 – Gráfico da Perda P1 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)

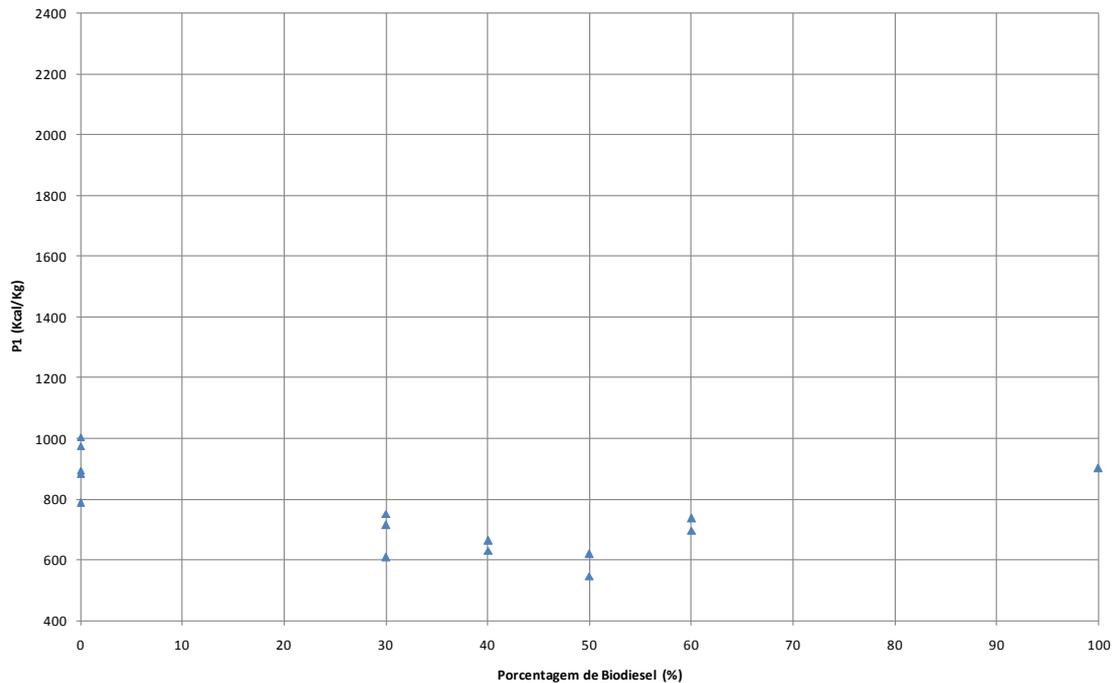


Figura 20 – Gráfico da Perda P1 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)

Os gráficos das figuras 18, 19 e 20 permitiram inferir que, em geral, a adição de biodiesel ao diesel implica a redução da perda P1, no intervalo de 0% a 50% de biodiesel na mistura, sendo o efeito mais significativo quanto maior a porcentagem de biodiesel adicionada. Ademais, no intervalo de 50% a 100% de biodiesel, o aumento da porcentagem de biodiesel provoca o aumento da perda P1. Vale ressaltar, também, que quanto menor a porcentagem de excesso de ar utilizada na combustão, menor a perda P1. Isso decorre da menor troca de calor dos gases presentes no gás de combustão com o ar de combustão conforme se diminui a porcentagem de excesso de ar utilizada na combustão.

IV.2.2. Perda de Calor Sensível pelos Gases devido à Água

Os resultados obtidos para a perda de calor sensível pelos gases devido à água (P2) com relação à porcentagem de biodiesel e à porcentagem de excesso de ar originaram os gráficos das figuras 21, 22 e 23.

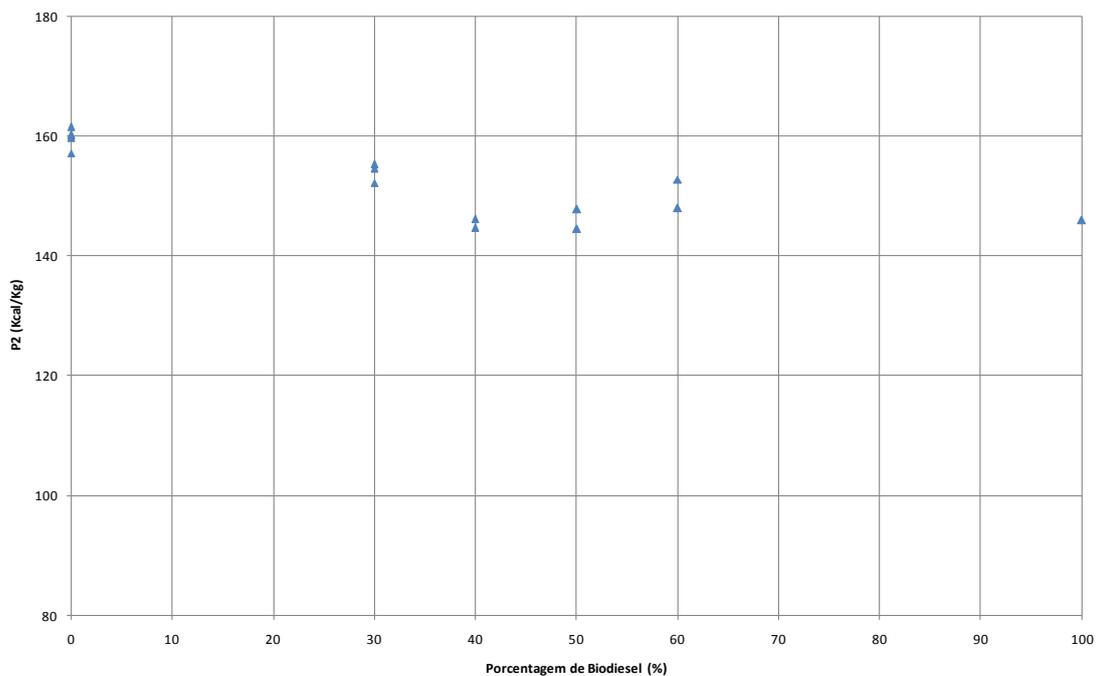


Figura 21 – Gráfico da Perda P2 versus Porcentagem de Biodiesel (30% Excesso de Ar)

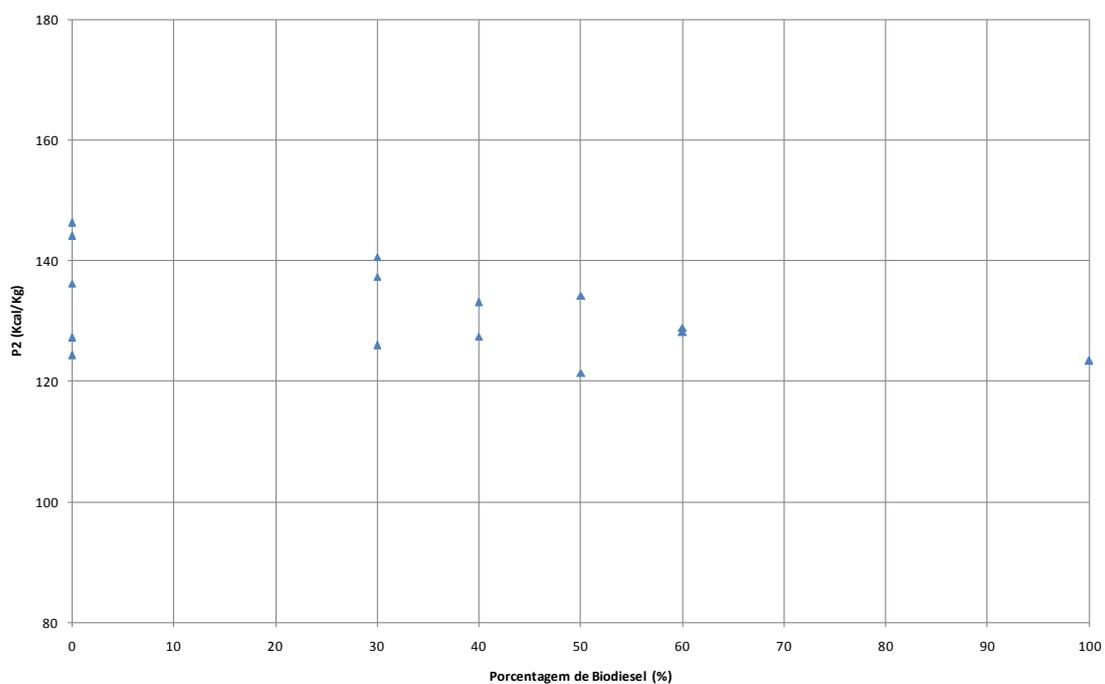


Figura 22 – Gráfico da Perda P2 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)

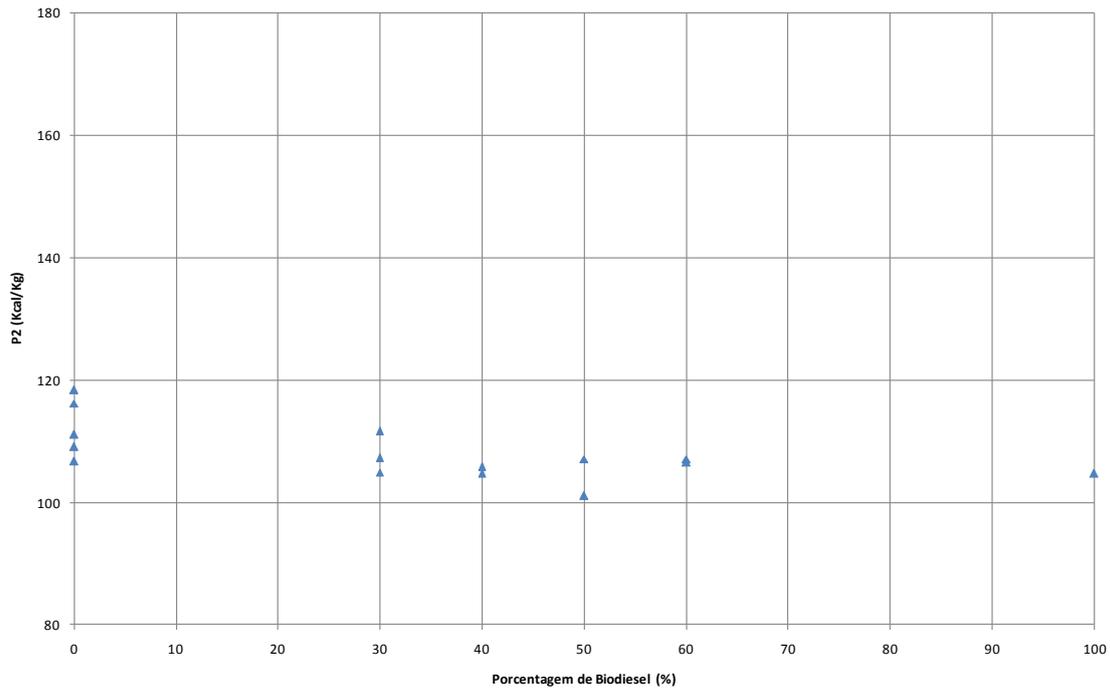


Figura 23 – Gráfico da Perda P2 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)

Os gráficos das figuras 21, 22 e 23 revelam que, de maneira semelhante ao comportamento da perda P1, a adição de biodiesel ao diesel promove uma redução da perda P2 substancialmente maior, quanto maior a porcentagem de biodiesel na mistura, no intervalo de 0% a 50% de biodiesel; ao passo que se observa um aumento de P2 à medida que porcentagem de biodiesel na mistura aumenta, no intervalo de 50% a 100% de biodiesel. Adicionalmente, quanto menor a porcentagem de excesso de ar utilizada na combustão, menor a perda P2. A contribuição de água no gás de combustão é influenciada pela quantidade de água no ar de combustão e no combustível. Quanto maior a quantidade de ar utilizada na combustão, maior a quantidade de água e maior a perda P2. Cabe ressaltar ainda que, em geral, conforme aumenta a quantidade de biodiesel na mistura diesel/biodiesel, ocorre diminuição da quantidade de água e, portanto, da perda P2.

IV.2.3. Crédito devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão

Os resultados obtidos para o crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (C1) com relação à porcentagem de biodiesel e à porcentagem de excesso de ar originaram os gráficos das figuras 24, 25 e 26.

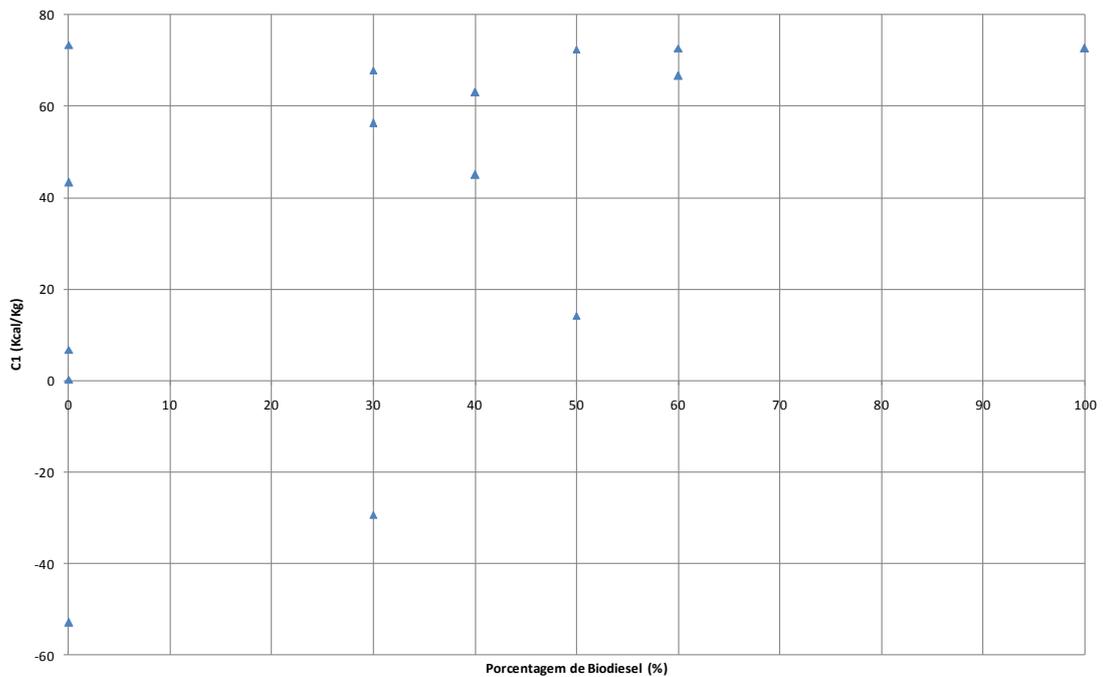


Figura 24 – Gráfico do Crédito C1 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)

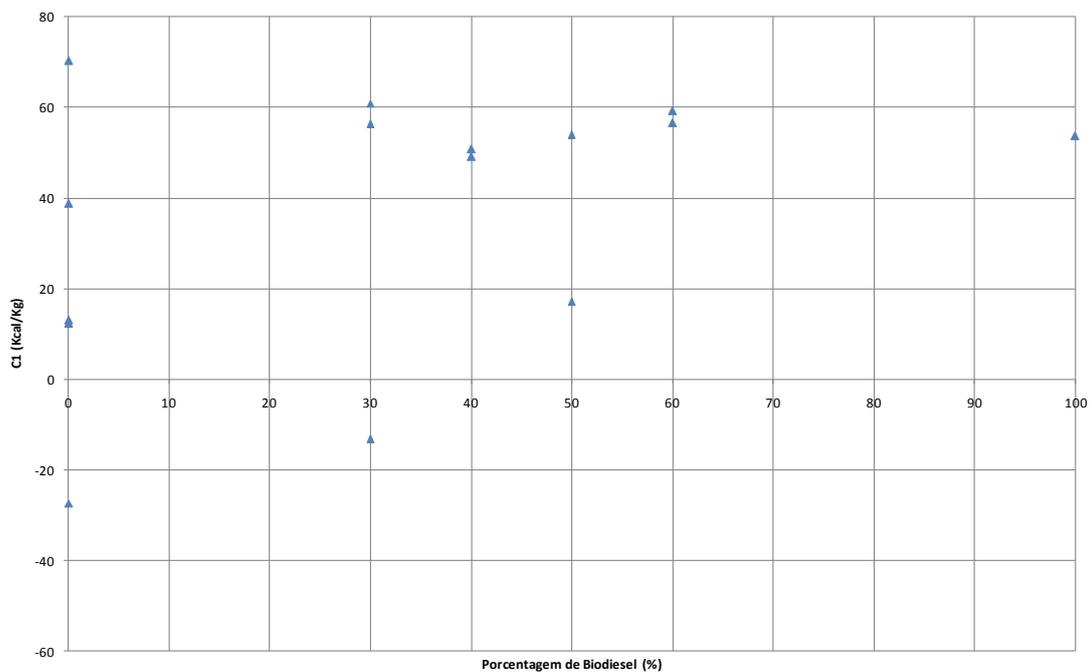


Figura 25 – Gráfico do Crédito C1 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)

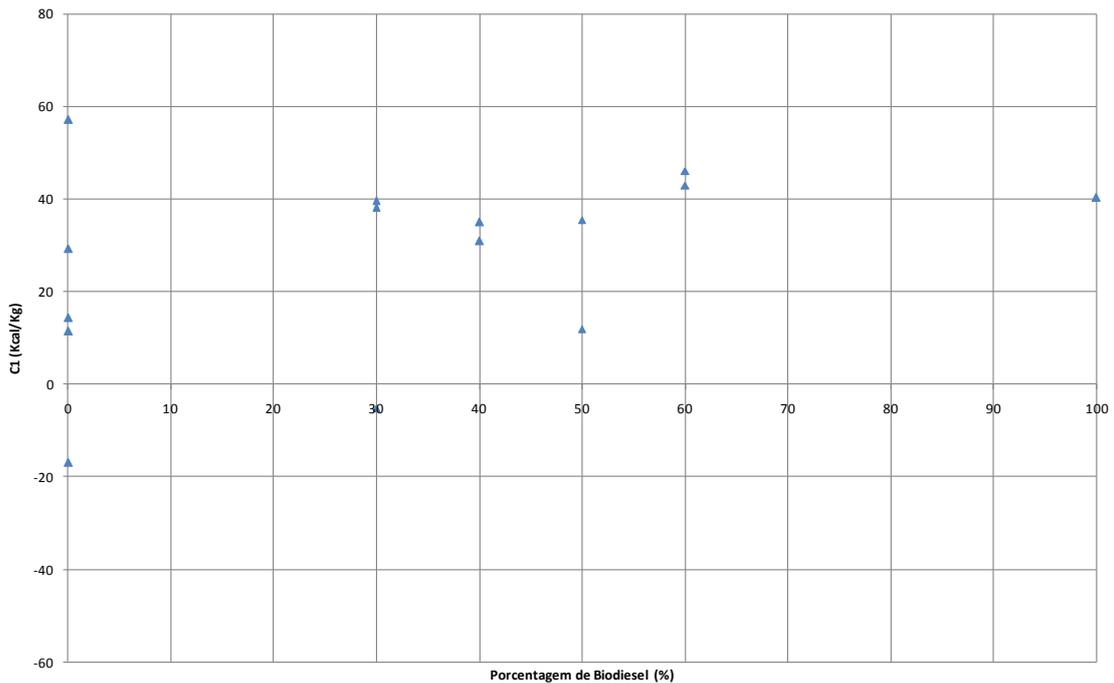


Figura 26 – Gráfico do Crédito C1 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)

Em decorrência da grande dispersão dos resultados do crédito C1 obtidos nos gráficos das figuras 24, 25 e 26, torna-se difícil depreender qualquer linha de tendência entre o crédito C1 e a porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel. Entretanto, os valores negativos podem ser justificados, percebendo-se que o Método das Perdas descrito por ASME (2008) admite o pré-aquecimento do ar de combustão, antes da operação da caldeira, e adota a temperatura de 25 °C como referência para os cálculos. Dessa forma, a dispersão dos dados de C1 é significativamente influenciada pela temperatura do ar de combustão, que, quando abaixo de 25 °C, produz valores de C1 negativos.

IV.2.4. Crédito devido ao Calor Sensível do Combustível

Os resultados obtidos para o crédito devido ao calor sensível do combustível (C3) com relação à porcentagem de biodiesel e à porcentagem de excesso de ar originaram os gráficos das figuras 27, 28 e 29.

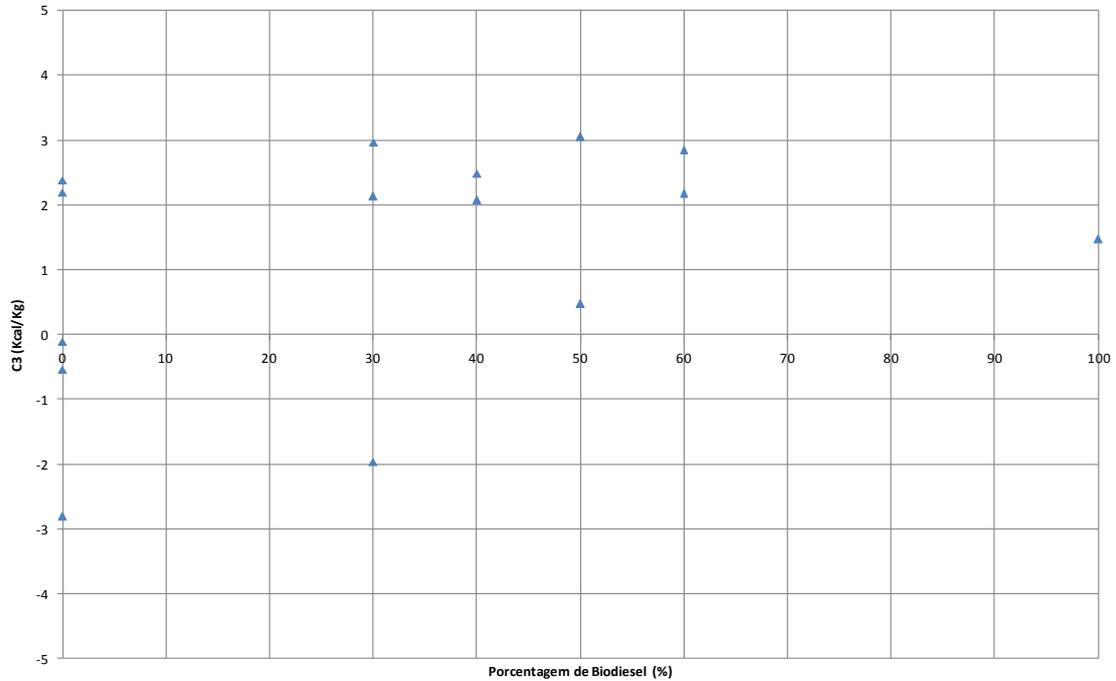


Figura 27 – Gráfico do Crédito C3 versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)

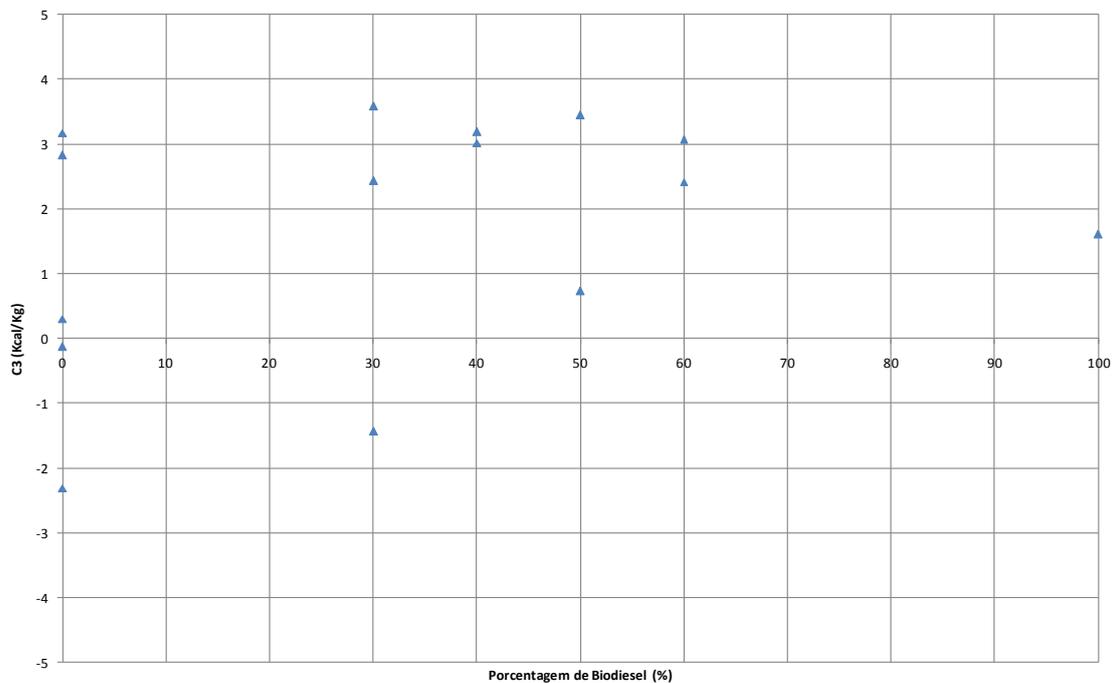


Figura 28 – Gráfico do Crédito C3 versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)

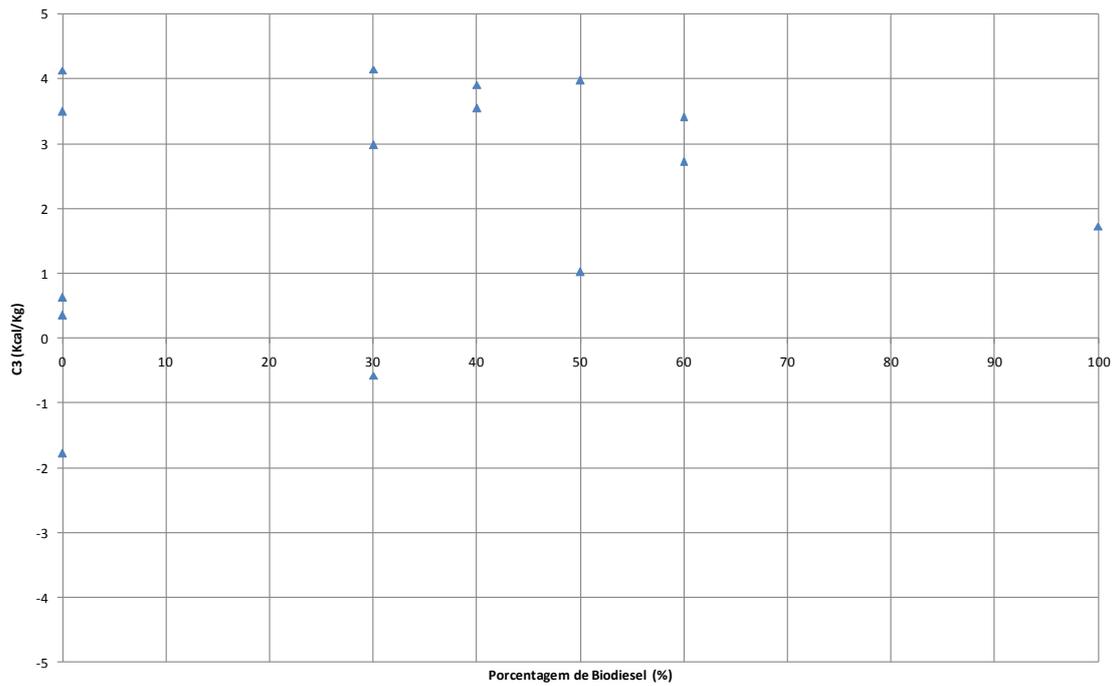


Figura 29 – Gráfico do Crédito C3 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)

Analogamente ao comportamento observado para o crédito C1, a grande dispersão dos resultados do crédito C3 obtidos nos gráficos das figuras 27, 28 e 29 torna difícil estabelecer uma relação direta entre o crédito C3 e a porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel. Ademais, os valores negativos e a dispersão dos dados de C3 podem ser explicados considerando-se os pressupostos da temperatura de referência de 25 °C e do pré-aquecimento do combustível antes da operação da caldeira, descritos por ASME (2008), bem como a grande influência da temperatura no crédito C3, de maneira semelhante ao comportamento de C1.

IV.2.5. Crédito devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão

Os resultados obtidos para o crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (C4) com relação à percentagem de biodiesel e à percentagem de excesso de ar originaram os gráficos das figuras 30, 31 e 32.

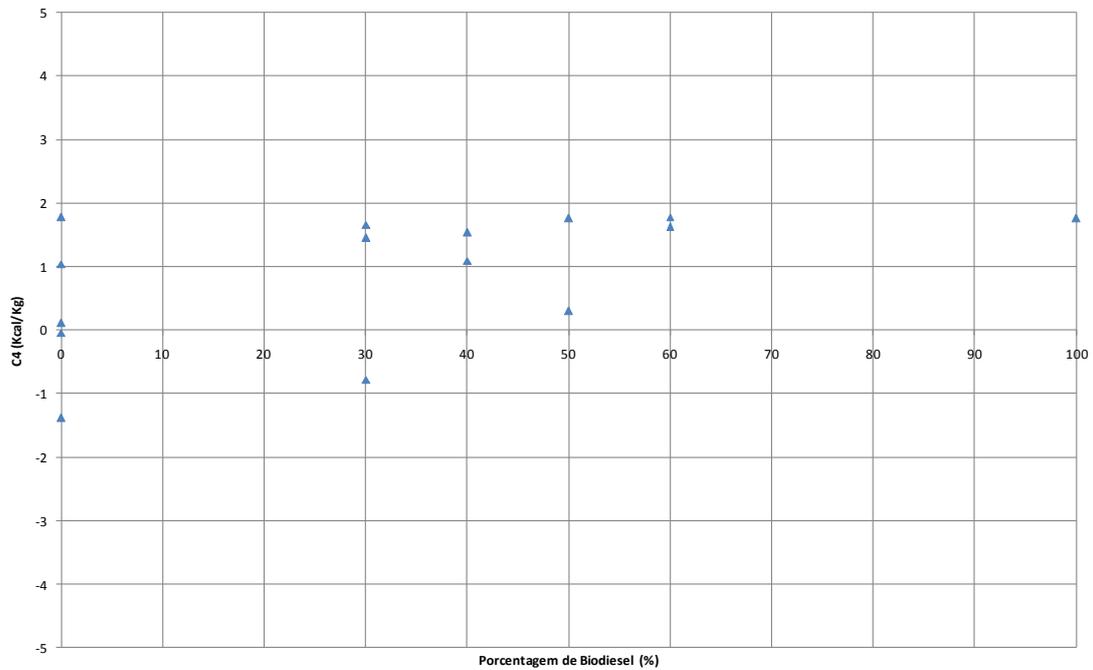


Figura 30 – Gráfico do Crédito C4 versus Percentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)

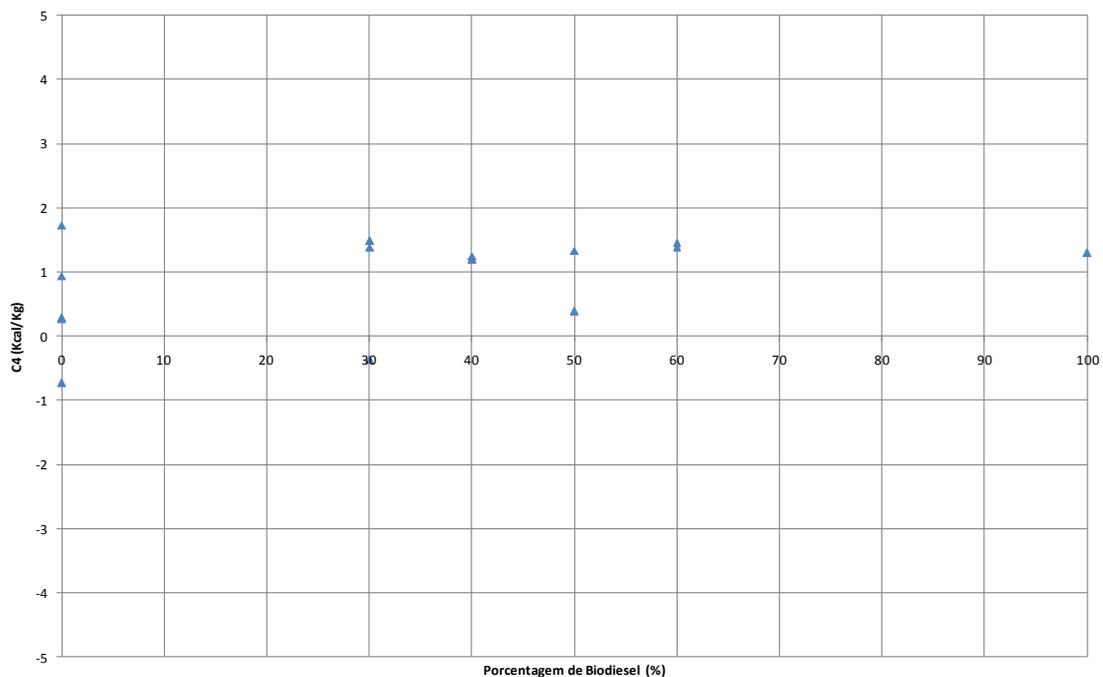


Figura 31 – Gráfico do Crédito C4 versus Percentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)

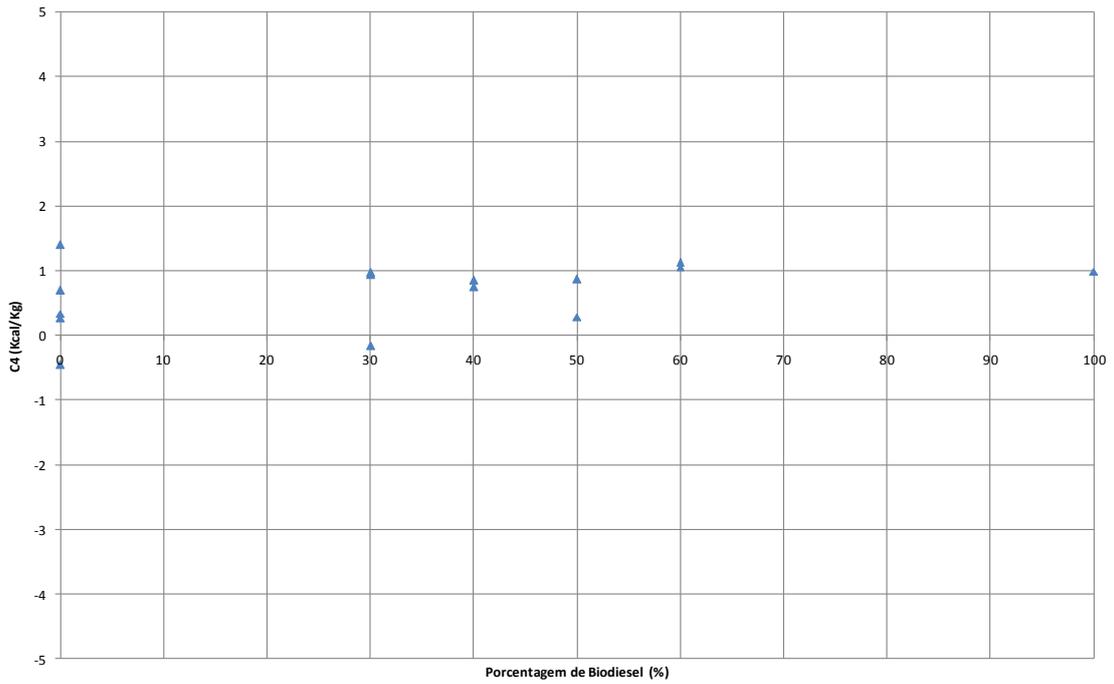


Figura 32 – Gráfico do Crédito C4 versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)

Os gráficos das figuras 30, 31 e 32 podem ser interpretados à luz das considerações feitas anteriormente para o crédito C1. Ressaltando-se a menor influência da temperatura do ar de combustão no crédito C4, evidenciada pela menor dispersão dos dados de C4 se comparados aos dados de C1 dos gráficos das figuras 24, 25 e 26.

IV.2.6. Eficiência

Os resultados obtidos para a eficiência (EPCI) com relação à porcentagem de biodiesel e à porcentagem de excesso de ar originaram os gráficos das figuras 33, 34 e 35.

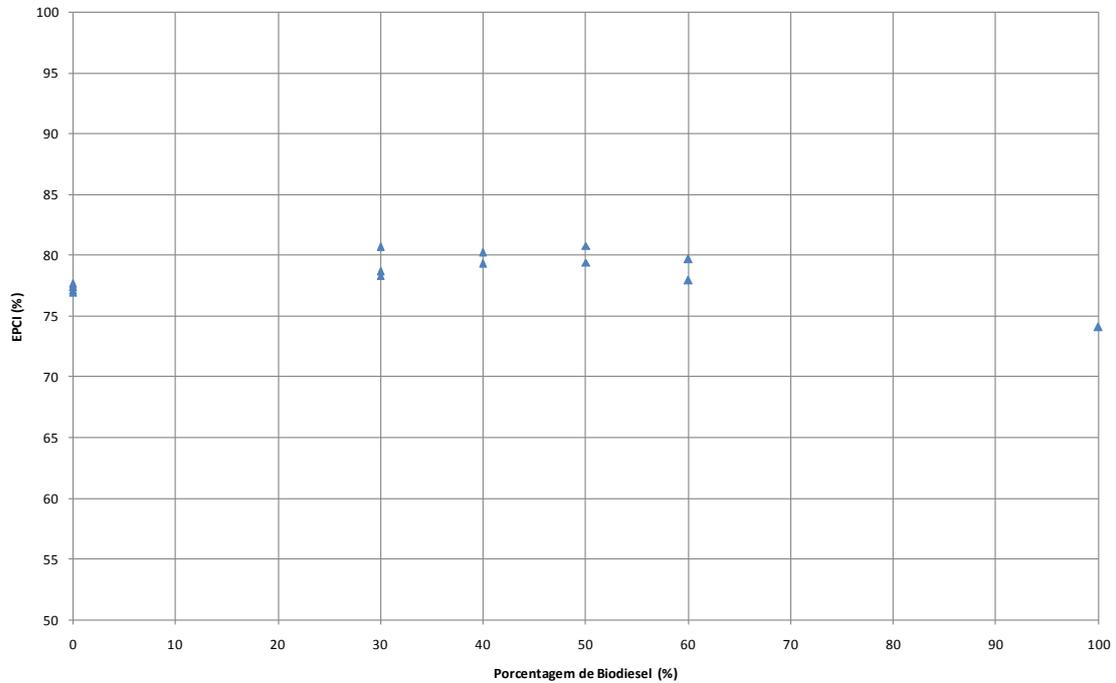


Figura 33 – Gráfico de EPCI versus Porcentagem de Biodiesel (30% de Excesso de Ar)

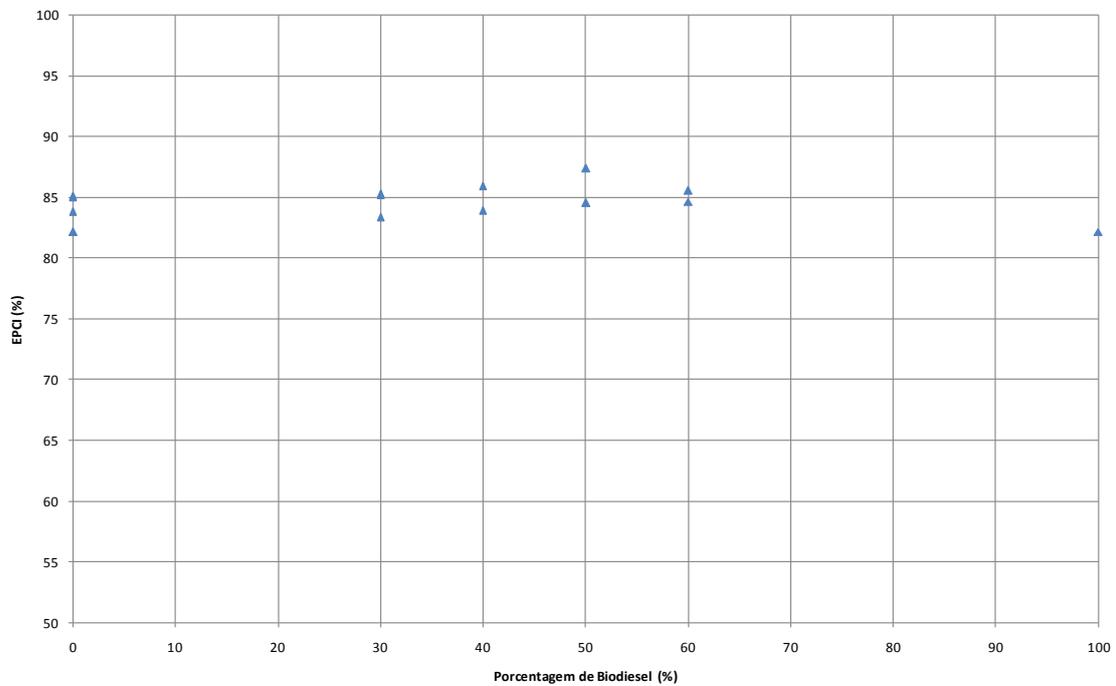


Figura 34 – Gráfico de EPCI versus Porcentagem de Biodiesel (20% de Excesso de Ar)

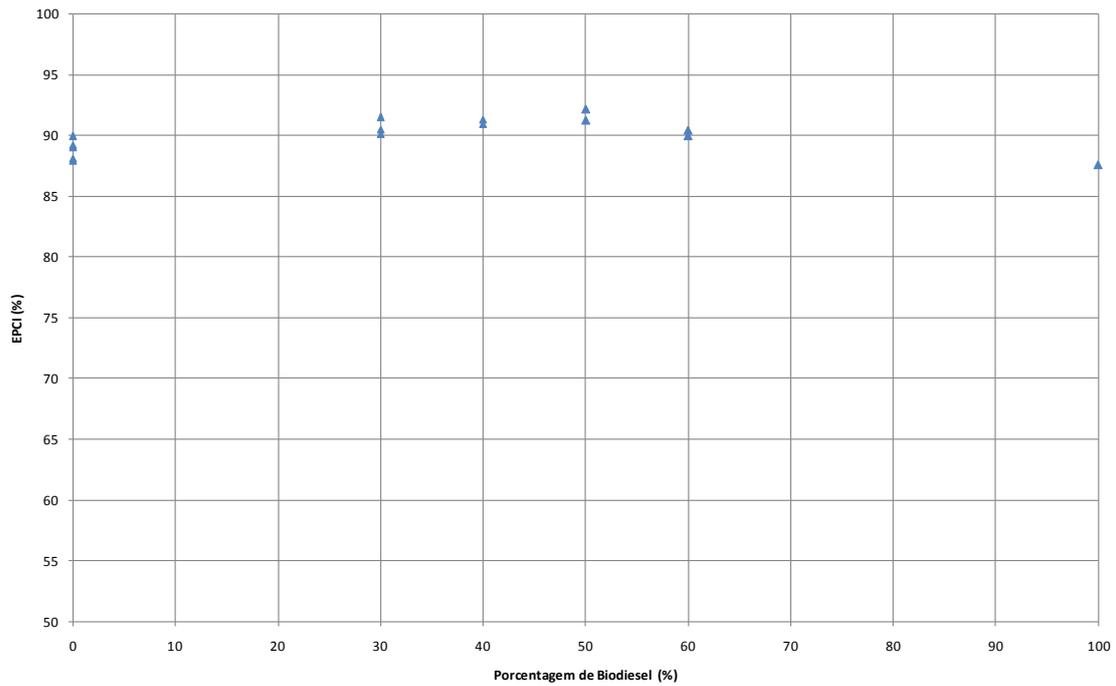


Figura 35 – Gráfico de EPCI versus Porcentagem de Biodiesel (10% de Excesso de Ar)

Os gráficos das figuras 33, 34 e 35 mostram que, em geral, a adição de biodiesel ao diesel contribui para o aumento de EPCI, no intervalo de 0% a 50% de biodiesel na mistura; e para diminuição de EPCI, no intervalo de 50% a 100% de biodiesel na mistura. Vale salientar que as misturas desses combustíveis apresentaram valores de EPCI maiores quando comparados com seus equivalentes para os combustíveis puros. Adicionalmente, a diminuição da porcentagem de excesso de ar aplicada à combustão promove o aumento de EPCI. Isso ocorre em virtude da redução das perdas P1 e P2 à medida que diminui a porcentagem de excesso de ar utilizado na combustão.

IV.3. Cálculo de Eficiência em Sistema SCADA

A metodologia de cálculo desenvolvida para dados de histórico foi adaptada para monitoração *online* da eficiência em sistema SCADA.

IV.3.1. Desenvolvimento da Interface Aplicada

Esta etapa inclui o desenvolvimento de um algoritmo de cálculo contínuo em VBA/SCADA, em intervalos de 10 segundos, cujas variáveis de entrada são compostas por: dados de instrumentação da caldeira, dados do analisador, dados das análises de laboratório e porcentagem de biodiesel. As variáveis de saída correspondem à eficiência e às perdas e créditos de calor sensível do Método das Perdas descrito por ASME (2008).

A figura 36 apresenta a tela da interface do sistema SCADA iFix Proficy®, contendo as variáveis de entrada e de saída anteriormente citadas, além de um gráfico que permite a monitoração da eficiência.

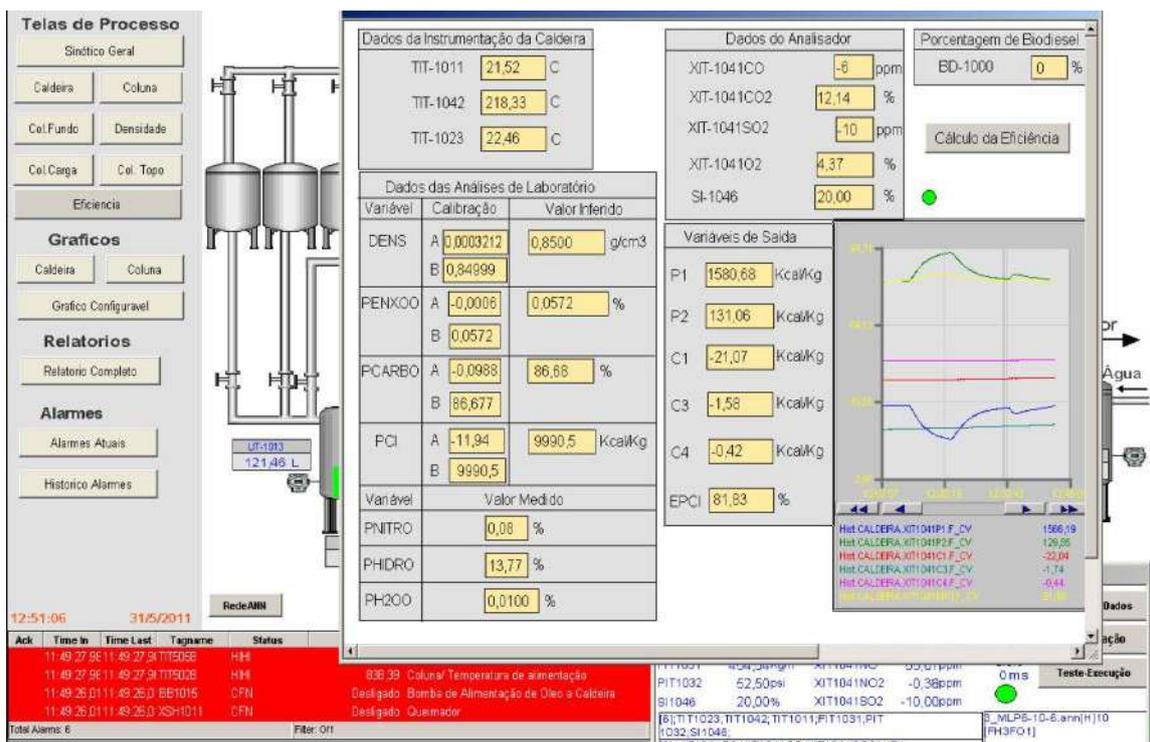


Figura 36 – Interface do Sistema SCADA iFix Proficy® para Monitoração *online* da Eficiência da Caldeira

Os dados da instrumentação da caldeira correspondem às temperaturas anteriormente citadas na tabela 14. Os dados do analisador, excetuando-se o excesso de ar utilizado na corrida, provêm de um sensor virtual (VALDMAN, 2010) e são apresentados na tabela 20. O excesso de ar é ajustado manualmente na planta piloto como mencionado anteriormente. A porcentagem de biodiesel na mistura corresponde ao TAG BD-1000.

Tabela 20 – Dados do Analisador (iFix Proficy®)

Variável	TAG
ZCO ₂	XIT-1041CO
ZO ₂	XIT-1041O2
ZCO	XIT-1041CO
ZSO ₂	XIT-1041SO2
EXCAR	SI-1046

Os dados das análises em laboratório admitem valores inferidos e valores medidos. Os valores inferidos se referem às variáveis para as quais foram obtidas equações de regressão linear, a saber: densidade (DENS), porcentagem em massa de enxofre na mistura (PENXOO), porcentagem em massa de carbono na mistura (PCARBO) e poder calorífico inferior (PCI). Os parâmetros A e B das retas obtidas são mostrados na coluna “Calibração”. Os valores medidos se referem às variáveis para as quais nenhuma linha de tendência foi estabelecida e, portanto, necessitam de *inputs* do usuário, a saber: porcentagem em massa de nitrogênio na mistura (PNITRO), porcentagem em massa de hidrogênio na mistura (PHIDRO) e porcentagem em massa de água na mistura (PH2OO).

As variáveis de saída foram disponibilizadas na base de dados do sistema SCADA de acordo com a tabela 21.

Tabela 21 – Variáveis de Saída (iFix Proficy®)

Variável	TAG
P1	XIT-1041P1
P2	XIT-1041P2
C1	XIT-1041C1
C3	XIT-1041C3
C4	XIT-1041C4
EPCI	XIT-1041EPCI

A figura 36 mostra a tela do sistema SCADA durante a execução de um teste com diesel puro da remessa 2 (teste 17) realizado posteriormente àqueles descritos na tabela 13. Vale ressaltar que a caldeira operou nas mesmas condições de porcentagem de excesso de ar dos testes descritos na tabela 13 – isto é, com corridas de 30%, 20% e 10% de excesso de ar, em intervalos sucessivos de uma hora, respectivamente. A realização do teste 17 permitiu a comparação dos resultados gerados pelo algoritmo implementado em VBA/Excel com os resultados provenientes do algoritmo implementado em VBA/SCADA.

IV.3.2. Resultados Comparativos entre o Algoritmo Online e Offline

Para a perda de calor sensível pelos gases, em base seca (P1), os resultados comparativos provenientes do algoritmo implementado em VBA/Excel, representados por P1 (VBA/Excel) no gráfico, e do algoritmo implementado em VBA/SCADA, representados por XIT1041P1 no gráfico, permitiram a obtenção do gráfico da figura 37.

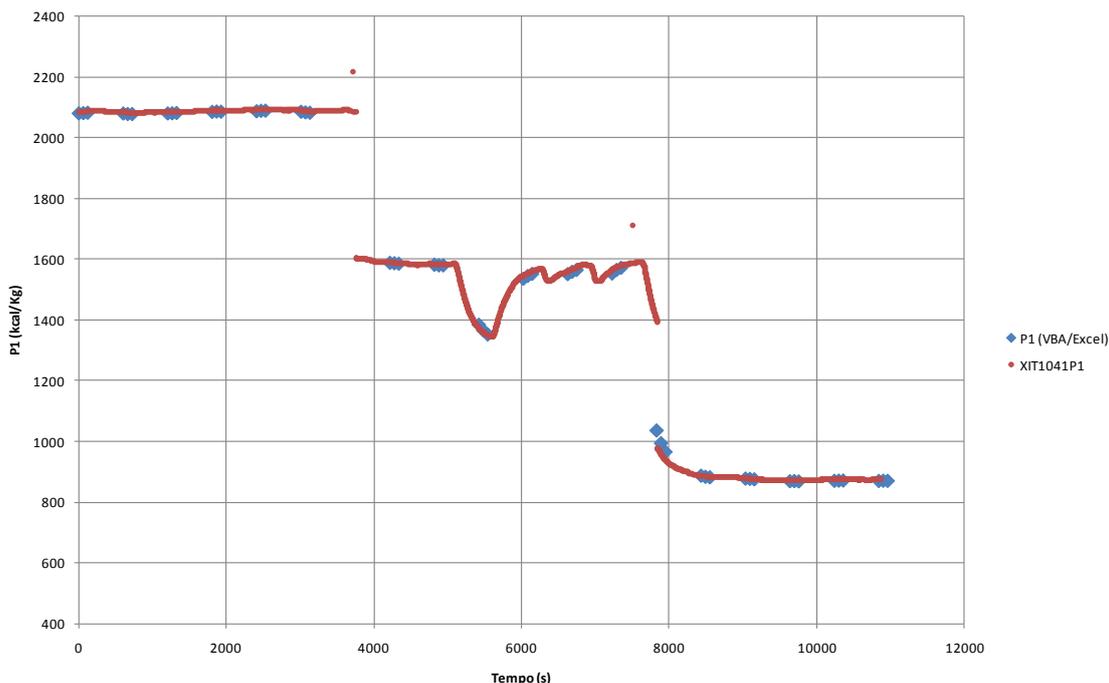


Figura 37 – Gráfico da Perda P1 versus Tempo

O gráfico da figura 37 revela a grande semelhança dos resultados de P1 (VBA/Excel) e XIT1041P1. Ademais, distinguem-se três patamares: 30% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os maiores valores de P1), 20% de excesso de ar (correspondentes ao patamar com os valores intermediários de P1) e 10% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os menores valores de P1). Estes patamares refletem o comportamento observado na análise de dados de histórico.

Para perda de calor sensível pelos gases devido à água (P2), os resultados comparativos oriundos do algoritmo implementado em VBA/Excel, representados por P2 (VBA/Excel) no gráfico, e do sistema SCADA, representados por XIT1041P2 no gráfico, possibilitaram a obtenção do gráfico da figura 38.

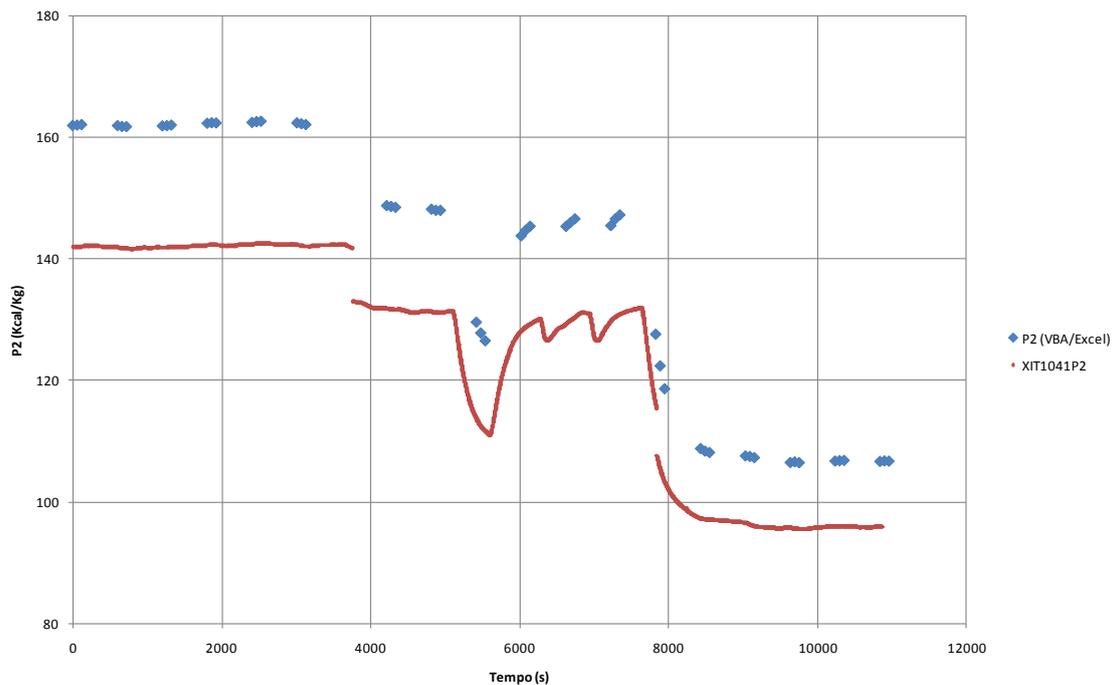


Figura 38 – Gráfico da Perda P2 versus Tempo

O gráfico da figura 38 mostra que os resultados de P2 (VBA/Excel) são maiores que os resultados de XIT1041P2. Isso ocorre em decorrência da utilização de valores obtidos de sensor virtual para os dados do analisador, no algoritmo *online* desenvolvido em VBA/SCADA. No teste 17, como a temperatura ambiente estava fora da faixa de utilização do sensor virtual as porcentagens em massa dos gases inferidas não condiziam com os valores medidos pelo Analisador de Gases (VALDMAN, 2010). No algoritmo *offline* implementado em VBA/Excel, esses dados correspondem a valores medidos através de células eletroquímicas do Analisador de Gases.

Percebe-se, ainda, na figura 38, a presença de três patamares para a variável P2 (VBA/Excel) e para a variável XIT1041P2: 30% de excesso de ar (correspondente aos patamares com os maiores valores de P2 e de XIT1041P2), 20% de excesso de ar (correspondente aos patamares com os valores intermediários de P2 e de XIT1041P2) e 10% de excesso de ar (correspondente aos patamares com os menores valores de P2 e de XIT1041P2). Assim como observado para P1, a presença desses patamares reflete o comportamento observado em análises de dados de histórico.

Para o crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (C1), os resultados comparativos obtidos do algoritmo desenvolvido em VBA/Excel, representados por C1 (VBA/Excel) no gráfico, e do sistema SCADA, representados por XIT1041C1 no gráfico, permitiram a obtenção do gráfico da figura 39.

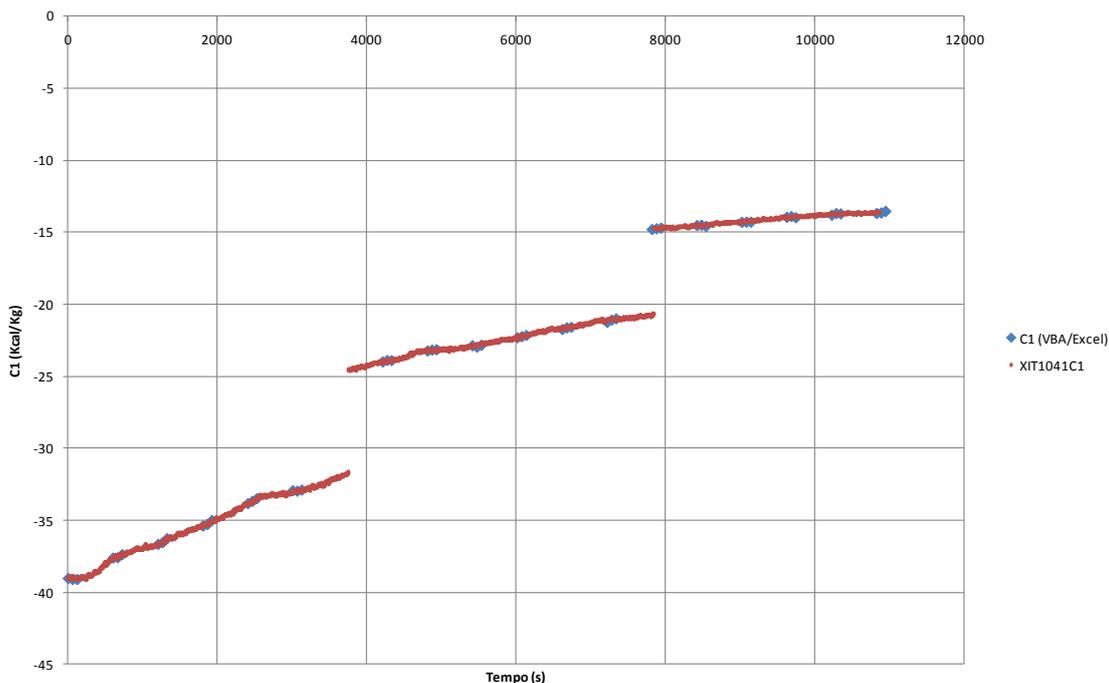


Figura 39 – Gráfico do Crédito C1 versus Tempo

O gráfico da figura 39 revela a grande semelhança dos resultados de C1 (VBA/Excel) e XIT1041C1. Analogamente ao comportamento observado para P1, três patamares podem ser discriminados: 30% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os menores valores de C1), 20% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os valores intermediários de C1) e 10% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os maiores valores de C1). Contudo, os valores negativos obtidos para o crédito C1 podem ser justificados pelos valores da temperatura do ar de combustão abaixo da temperatura de referência de 25 °C descrita por ASME (2008), durante a execução do teste 17, sem pré-aquecimento. As inclinações dos patamares podem ser explicadas pelo aumento da temperatura ao longo da execução do teste 17 (aproximadamente de 19 °C para 23 °C).

Para o crédito devido ao calor sensível do combustível (C3), os resultados comparativos provenientes do algoritmo implementado em VBA/Excel, representados por C3 (VBA/Excel) no gráfico, e do sistema SCADA, representados por XIT1041C3 no gráfico, possibilitaram a obtenção do gráfico da figura 40.

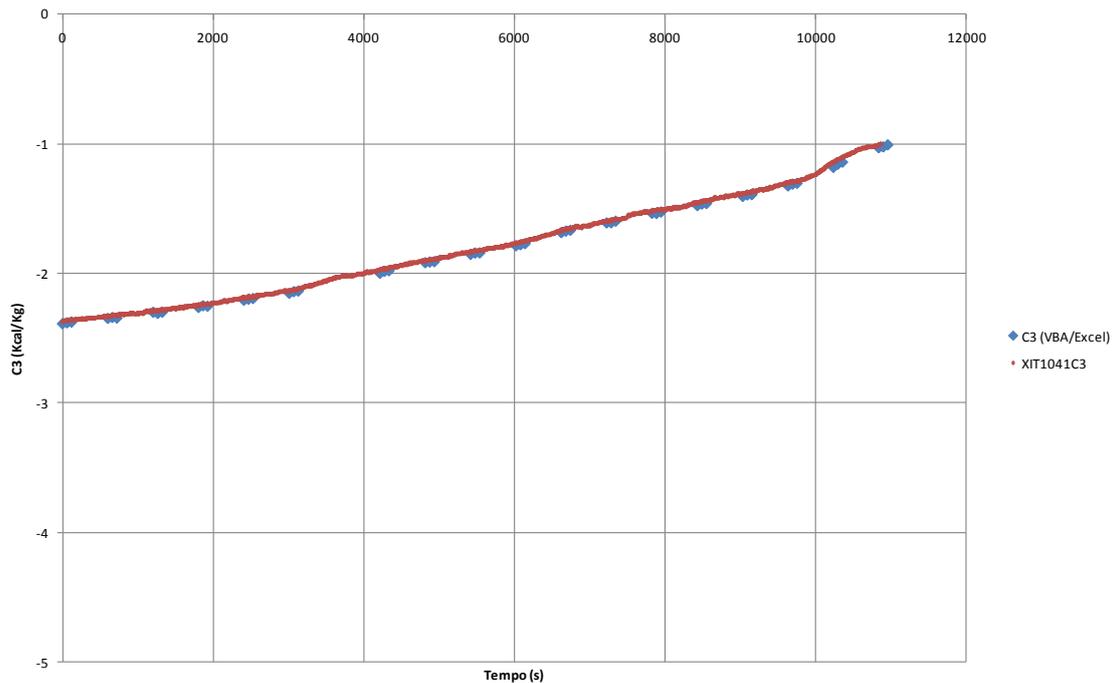


Figura 40 – Gráfico do Crédito C3 versus Tempo

O gráfico da figura 40 mostra a grande semelhança dos resultados de C3 (VBA/Excel) e XIT1041C3. De maneira diferente ao comportamento observado para o crédito C1, não se observam os três patamares de 30%, 20% e 10% de excesso de ar. Os valores negativos obtidos para o crédito C3 podem ser explicados pelos valores da temperatura de combustível abaixo da temperatura de referência de 25 °C adotados por ASME (2008), durante a realização do teste 17, sem pré-aquecimento. De maneira análoga ao crédito C1, as inclinações dos patamares se devem ao aumento da temperatura ao longo do teste 17.

Para o crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão (C4), os resultados comparativos obtidos do algoritmo desenvolvido em VBA/Excel, representados por C4 (VBA/Excel) no gráfico, e do sistema SCADA, representados por XIT1041C4 no gráfico, permitiram a obtenção do gráfico da figura 41.

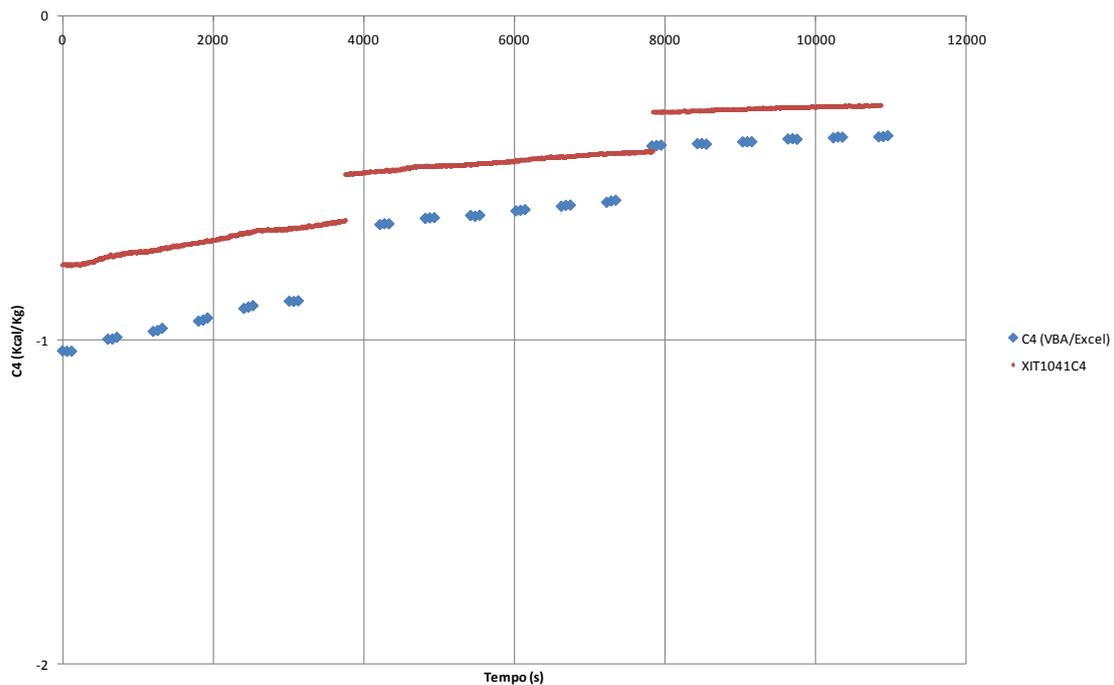


Figura 41 – Gráfico do Crédito C4 versus Tempo

O gráfico da figura 41 revela que os resultados de C4 (VBA/Excel) são menores que os resultados de XIT1041C4. Tal fato pode ser explicado de maneira semelhante ao exposto para P2, acerca da discrepância dos valores dos dados do analisador utilizados no algoritmo *online*, desenvolvido em VBA/SCADA, e no algoritmo *offline*, implementado em VBA/Excel.

Percebe-se também a presença de três patamares para a variável C4 (VBA/Excel) e para a variável XIT1041C4: 30% de excesso de ar (correspondente aos patamares com os menores valores de C4 e XIT1041C4), 20% de excesso de ar (correspondentes aos patamares com os valores intermediários de C4 e XIT1041C4) e 10% de excesso de ar (correspondente aos patamares com os maiores valores de C4 e XIT1041C4). As inclinações e os valores negativos obtidos para C4 podem ser justificados da mesma forma descrita para o crédito C1.

Para a eficiência (EPCI), os resultados comparativos provenientes do algoritmo implementado em VBA/Excel, representados por EPCI (VBA/Excel) no gráfico, e do sistema SCADA, representados por XIT1041EPCI no gráfico, possibilitaram a obtenção do gráfico da figura 42.

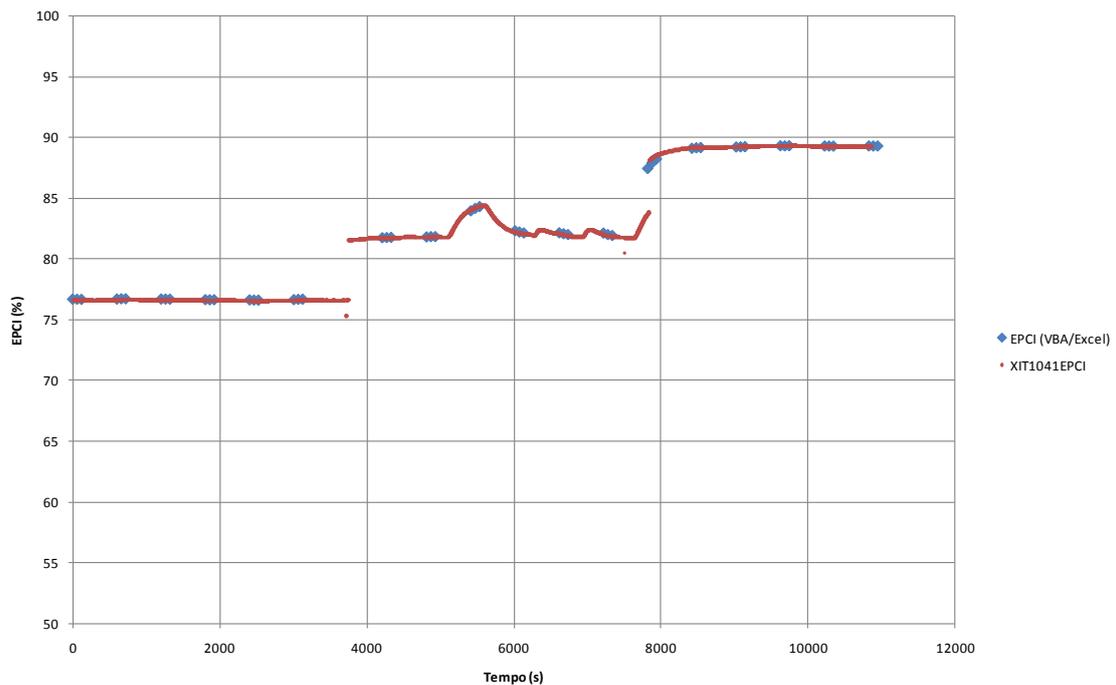


Figura 42 – Gráfico de EPCI versus Tempo

O gráfico da figura 42 revelou a grande semelhança dos resultados de EPCI (VBA/Excel) e XIT1041EPCI. Ademais, três patamares podem ser discriminados: 30% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os menores valores de EPCI), 20% de excesso de ar (correspondentes ao patamar com os valores intermediários de EPCI) e 10% de excesso de ar (correspondente ao patamar com os maiores valores de EPCI). Tais patamares se mostram compatíveis com a análise de dados de histórico.

Capítulo V. Conclusão

A adição de biodiesel ao óleo diesel se mostrou viável, para porcentagens de biodiesel na mistura no intervalo de 0% a 50%, uma vez que possibilitou a redução das perdas P1 e P2 e o aumento da eficiência da caldeira. Outro aspecto notável é a obtenção de valores progressivamente maiores para a eficiência da caldeira à medida que se diminui a porcentagem de excesso de ar utilizada na combustão. Portanto, a utilização de misturas diesel/biodiesel como combustível em caldeiras flamotubulares de pequeno porte (modelo CV-VDM-500) promove a redução de emissões de gases estufa sem comprometer a eficiência do equipamento.

Em suma, as principais conclusões do estudo realizado foram:

- Foi possível observar perfis lineares para a densidade, para o teor de enxofre, para o teor de carbono, para o teor de água e para o poder calorífico inferior das misturas diesel/biodiesel;
- A utilização de um sistema de pré-aquecimento ajuda a aumentar a eficiência da caldeira;
- As temperaturas do ar de combustão e do combustível influenciam substancialmente a eficiência da caldeira, uma vez que afetam os créditos de calor sensível;
- A utilização de biodiesel não prejudicou a operação da caldeira considerando que ela foi projetada para operar com diesel;
- A utilização de misturas melhora a eficiência da caldeira, no intervalo de 0% a 50% de biodiesel na mistura, em comparação com a operação com diesel puro;
- De acordo com o estudo realizado, as condições ótimas de operação de uma caldeira flamotubular de pequeno porte, modelo CV-VDM-500, correspondem à porcentagem de 50% de biodiesel na mistura diesel/biodiesel e à porcentagem de 10% de excesso de ar de combustão;
- A metodologia desenvolvida para estudo de dados de histórico permitiu a comparação operacional da planta piloto utilizando misturas diesel/biodiesel; e
- A interface *online* desenvolvida no sistema SCADA auxilia o operador no diagnóstico efetivo, em tempo real, do processo.

Finalmente, propõem-se como sugestões para trabalhos futuros:

- A instalação de instrumentação para medição da temperatura externa da carcaça da caldeira, para cálculo de P3;
- A realização de análises do teor de água das misturas diesel/biodiesel em laboratório;
- A utilização de um sistema de pré-aquecimento do ar de combustão e do combustível acoplado à caldeira;
- O aumento do número de réplicas das análises em laboratório e dos testes experimentais; e
- A realização de testes e análises da operação da caldeira utilizando biodiesel de outras oleaginosas.

Referências

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *ANUÁRIO ESTATÍSTICO 2010*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=31286>>. Acesso em 06/01/2011.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *GLOSSÁRIO 2011*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=582#p>>. Acesso em 15/02/2011.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *Resolução ANP N°7/2008*. Tabela I: Especificação do Biodiesel.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *Resolução ANP N°42/2009*. Tabela I: Especificação de Óleo Diesel de Uso Rodoviário.
- ALISKE, M.A.. *Medida de Espectroscopia no Infravermelho Médio para a Determinação do Teor de Biodiesel em Óleo Diesel*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2010. p. 3-6.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME POWER TEST CODE PTC 4.1.*, 2008.
- ARNDT, F. *Dimensionamento de uma Rede de Hidrantes para uma Usina Hidrelétrica no Estado do Rio de Janeiro*. Monografia. Universidade do Vale do Itajaí, 2008. p.10-11.
- BEGA, E.A. *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras*. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2003. p. 35-119.
- BEZERRA, C.M.; OTTONI, D.C.; EMERENCIANO, M.; SOARES, M.J.B.; MEDEIROS, T.C.. *Fogo e Incêndio*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003. p. 4
- BIZZO, W.A. *Geração, Distribuição e Utilização de Vapor*. Apostila de curso. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2003. p. 18-73.
- BRANCO, D.A.C. *Análise Técnica e Econômica da Aplicação da Tecnologia GTL de Pequena Escala para a Monetização do Gás Natural Associado Remoto Offshore no Brasil*. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2008. p. 25-40.

BRASIL, *Lei Nº9478/97*. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 11/03/2011.

BRASIL, *Lei Nº11.097/2005*. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 11/03/2011.

BRASIL, *Decreto Nº5.448/2005*. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 11/03/2011.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). *Despoluir – Programa Ambiental do Transporte 2008*. Disponível em: <http://www.cntdespoluir.org.br/Downloads/A%20qualidade%20do%20Diesel%20no%20Brasil_TAC_Res4_03CONAMA.pdf>. Acesso em: 09/02/2011.

DEM – *Secção de Termofluidos e Energia. Área da Combustão*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior de Tecnologia, 2007. Informações sobre combustão industrial. Disponível em: <http://www.dem.ist.utl.pt/ste/Comb_STE.html>. Acesso em 07/02/2011.

GARCIA, R. *Combustíveis e Combustão Industrial*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002. p. 153-163

GUARIEIRO, L.L.N. *Metodologia Analítica para Quantificar o Teor de Biodiesel na Mistura Biodiesel:Diesel Utilizando Espectroscopia na Região do Infravermelho*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. p. 1771.

KNOTHE, G., GERPEN, J.V., KRAHL, J., RAMOS, L.P.. *Manual de Biodiesel*. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2006. p.29-43.

LIMA, M.C; NETO, J.A.A. *Avaliação Comparativa da emissão de gases estufa entre o diesel e o biodiesel de óleo de soja e ogr*. Anais do 10º seminário de Iniciação Científica da UESC. Santa Catarina, 2004. p. 2.

LIMA, P.C.R. *O Biodiesel e a Inclusão Social*. Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados, 2004.

MENDES, A.P.A., DA COSTA, R.C. *Mercado Brasileiro de Biodiesel e Perspectivas Futuras*. BNDES Setorial 31, 2010. p.253-280.

Ministério de Minas e Energia (MME). *Balanço Energético Nacional 2010*. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em 09/02/2011.

Ministério de Minas e Energia (MME). *Objetivos e Diretrizes do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel*. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em:< http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/programa/objetivos_diretrizes.html>. Acesso em: 07/01/2011.

- OLIVEIRA, A.P; BISPO, L.H.O. *Sistema de Monitoração e Controle para o Estudo de Eficiência de uma Caldeira de Pequeno Porte com Misturas de Combustíveis, Análises: Econômica, Ambiental e Social da adição de Biodiesel no Óleo Diesel*. Projeto Final de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. p. 11-19.
- SANTOS, M.A. *Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Brasileira: Aspectos Técnicos e Ambientais Relacionados ao seu Uso em Motores de Combustão*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2007. p. 32-45.
- SMITH, J.M., VAN ESS, H.C., ABBOTT, M.M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*, Editora LTC. 7 ed. Rio de Janeiro, 2007. p. 546-547.
- SOUSA-AGUIAR, Eduardo Falabella. *Notas de Aula da Disciplina Tecnologia de Refino de Petróleo e Gás Natural*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- VALDMAN, A. *Sistema de Automação para Monitoramento Online de Gases Residuais e Diagnóstico de uma Caldeira Operada com Misturas Diesel/Biodiesel*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. p. 44-58.
- VALDMAN, B., FOLLY, R.O.M, SALGADO, A. *Dinâmica, Controle e Instrumentação de Processos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. p.271-273.
- VALDMAN, B., SERFATY, R., FOLLY, R.O.M., ARANDA, D.A.G., VALDMAN, A., QUINTELLA, J., BOJORGE, N. *CALCOM – Combustíveis Alternativos em Caldeiras de Pequeno Porte Instrumentada*, Relatório Técnico, FINEP/CTPETRO/CENPES-PB/EQ-UFRJ, 2010 (em andamento).
- VALLE, M.L.M. *Produtos do Setor de Combustíveis e de Lubrificantes*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. p. 151-188.
- VIVAS, B.M.M. *Determinação Experimental de Limites de Inflamabilidade e Temperatura de Auto-Ignicão de Petro e Biocombustíveis em Tubo de combustão*, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2010. p. 18-28.

Anexo I: Especificações do Óleo Diesel de Uso Rodoviário

Característica (1)	Unidade	Limite			Método	
		Tipos A e B			ABNT NBR	ASTM
		S50	S500	S1800 (2)		
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas			Visual (3)	
Cor	-	(4)		vermelho	Visual (3)	
Cor ASTM, Max (5)	-	3,0			14483	D1500 D6045
Teor de Biodiesel (7)	% volume	(6)			15568	-
Enxofre Total, máx	mg/Kg	50	-	-	-	D2622
			-	-	-	D5453
			-	-	-	D7039
			-	-	-	D7212
			-	-	-	(8)
			-	-	-	D7220
			-	-	-	(8)
			-	-	-	D2622
			500	1800	14533	D4294
			-	-	-	D5453
Destilação						
10% vol. recuperados	°C	Anotar			9619	D86
50% vol. recuperados		245,0 a 310,0				
85% vol. Recuperados, máx		-	360,0	370,0		
90% vol. recuperados		360,0 (máx)	Anotar	Anotar		
Massa específica a 20°C	Kg/m ³	820 a 850 (9)	820 a 865	820 a 880	7148 14065	D1298 D4052
Ponto de Fulgor, min	°C	38,0			7974 14598 -	D56 D93 D3828
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	2,0 a 5,0			10441	D445
Ponto de Entupimento de Filtro a Frio, máx	°C	(10)			14747	D6371
Número de Cetano ou Número de Cetano derivado (NCD), min	-	46	42 (11)	42 (11)	-	D613 D6890 D7170
Resíduo de Carbono Ramsbottom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx	% massa	0,25			14318	D524
Cinzas, máx	% massa	0,010			9842	D482
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C, máx	-	1			14359	D130

Água (12) (13)	mg/Kg	Anotar	-	-	-	D6304
Contaminação Total (12) (14)	mg/Kg	Anotar	-	-	-	-
Água e Sedimentos, máx (15)	% volume	0,05			-	D2709
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (16)	% massa	Anotar	-	-	-	D5186 D6591 (17)
Estabilidade à oxidação (16)	mg/100mL	Anotar	-	-	-	D2274 (18) D5304
Índice de Neutralização	mg KOH/g	Anotar	-	-	14248	D974
Lubricidade, máx.	µm	(19)			-	-
Condutividade elétrica, mín (20)	pS/m	25	-	-	-	D2624 D4308

Fonte: Resolução ANP Nº42/2009

(1) Poderão ser incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para óleo diesel obtido de processo diverso de refino e processamento de gás natural ou a partir de matéria prima distinta do petróleo.

(2) A partir de 1º de janeiro de 2014, o óleo diesel S1800 deixará de ser comercializado como óleo diesel de uso rodoviário e será substituído integralmente pelo óleo diesel S500.

(3) A visualização deverá ser realizada em proveta de vidro de 1L.

(4) Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.

(5) Limite requerido antes da adição do corante. O corante vermelho, segundo especificação constante da Tabela III deste Regulamento Técnico, deverá ser adicionado ao óleo diesel A S1800 no teor de 20 mg/L pelas Refinarias, Centrais de Matérias-Primas Petroquímicas e Importadores.

(6) Na porcentagem estabelecida pela legislação vigente. Será admitida variação de $\pm 0,5\%$ volume. A determinação do teor de biodiesel no óleo diesel B deverá ser realizada segundo a norma EN 14078.

(7) Aplicável apenas para o óleo diesel B.

(8) Aplicável apenas para óleo diesel A.

(9) Será admitida a faixa de 820 a 853 kg/m³ para o óleo diesel B.

(10) Limites conforme Tabela II.

(11) Alternativamente, fica permitida a determinação do índice de cetano calculado pelo método NBR 14759 (ASTM D4737), para óleos diesel A S500 e A S1800, quando o produto não contiver aditivo melhorador de cetano, com limite mínimo de 45. No caso de não-conformidade, o ensaio de número de cetano deverá ser realizado. O produtor e o importador deverão informar no Certificado da Qualidade nos casos em que for utilizado aditivo melhorador de cetano. Ressalta-se que o índice de cetano não traduz a qualidade de ignição do óleo diesel contendo biodiesel e/ou aditivo melhorador de cetano.

(12) Aplicável na produção e na importação.

(13) Poderá ser utilizado alternativamente o método EN ISO 12937.

(14) Deverá ser determinada segundo o método EN 12662.

(15) Aplicável na importação, antes da liberação do produto para comercialização.

(16) Os resultados da estabilidade à oxidação e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos poderão ser encaminhados ao distribuidor até 48 h após a comercialização do produto de modo a garantir o fluxo adequado do abastecimento.

(17) Poderá ser determinado, alternativamente, pelo método EN 12916, aplicável ao óleo diesel B contendo até 5% de biodiesel. Os métodos ASTM D6591 e D5186 não se aplicam ao óleo diesel B.

(18) O método ASTM D2274 se aplica apenas ao óleo diesel A.

(19) Poderá ser determinada pelos métodos ISO 12156 ou ASTM D6079, sendo aplicáveis os limites de 460µm e 520µm, respectivamente. A medição da lubricidade poderá ser realizada após a adição do biodiesel, no teor estabelecido na legislação vigente.

(20) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo produtor e distribuidor. Para o distribuidor, o controle e o atendimento ao limite especificado serão compulsórios a partir de 01/01/2010.

Ponto de Entupimento de Filtro a Frio

Unidades da Federação	Limite Máximo, °C											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SP-MG-MS	12	12	12	7	3	3	3	3	7	9	9	12
GO/DF-MT-ES-RJ	12	12	12	10	5	5	5	8	8	10	12	12
PR-SC-RS	10	10	7	7	0	0	0	0	0	7	7	10

Fonte: Resolução ANP Nº42/2009

Anexo II: Especificações do Biodiesel

Característica	Unidade	Limite	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	EN ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20°C	Kg/m ³	850-900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	3,0-6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de Água, máx (2)	mg/Kg	500	-	6304	EN ISO 12937
Contaminação Total, máx	Mg/Kg	24	-	-	EN ISO 12662
Ponto de Fulgor, mín. (3)	°C	100,0	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103
Resíduo de Carbono (4)	% massa	0,050	15586	4530	-
Cinzas sulfatadas, máx	% massa	0,020	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre Total, máx	mg/Kg	50	-	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx	mg/Kg	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 EN 14109 EN 14538
Cálcio + Magnésio, máx	mg/Kg	5	15553 15556		EN 14538
Fósforo, máx	mg/Kg	10	15553	4951	EN 14107
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C, máx	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de Cetano (5)	-	Anotar	-	613 6890 (6)	EN ISO 5165
Ponto de Entupimento de Filtro a Frio, máx	°C	19 (7)	14747	6371	EN 116
Índice de Acidez, máx	mg KOH/g	0,50	14448	664	EN 14104 (8)
Glicerol livre, máx	% massa	0,02	15341 15771	6584 (8)	EN 14105 (8) EN 14106(8)
Glicerol Total, máx	% massa	0,25	15334	6584 (8)	EN 14105 (10)
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar	15342 15344	6584 (8)	EN 14105 (8)
Metanol ou Etanol, máx	% massa	0,20	15343	-	EN 14110
Índice de Iodo (5)	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111
Estabilidade à Oxidação a 110°C, min (2)	h	6	-	-	EN 14112 (8)

Fonte: Resolução ANP N^o7/2008

(1) Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.

(2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador.

(3) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.

(4) O resíduo deve ser avaliado em 100% da amostra.

(5) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.

(6) Poderá ser utilizado como método alternativo o método ASTM D6890 para número de cetano.

(7) O limite máximo de 19°C é válido para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Bahia, devendo ser anotado para as demais regiões. O biodiesel poderá ser entregue com temperaturas superiores ao limite supramencionado, caso haja acordo entre as partes envolvidas. Os métodos de análise indicados não podem ser empregados para biodiesel oriundo apenas de mamona.

(8) Os métodos referenciados demandam validação para as matérias-primas não previstas no método e rota de produção etílica.