

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
SISTEMAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS - MESTRADO**

Henrique Worm

**ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DE UMA PLANTA PILOTO PARA A PRODUÇÃO DE  
BODIESEL**

Santa Cruz do Sul

2012

Henrique Worm

**ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DE UMA PLANTA PILOTO PARA A PRODUÇÃO DE  
BODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado, Área de Concentração em Controle e Otimização de Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Ben da Costa

Co-orientador: Prof. Dr. Rolf Fredi Molz

Santa Cruz do Sul

2012

Henrique Worm

**ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DE UMA PLANTA PILOTO PARA A PRODUÇÃO DE  
BIODIESEL**

Esta Dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado, Área de Concentração em Controle e Otimização de Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.

*Dr. Adilson Ben da Costa*

Professor Orientador - UNISC

*Dr. Rolf Fredi Molz*

Professor Co-orientador - UNISC

*Dra. Rosana de Cássia de Souza Schneider*

Professora examinadora – UNISC

*Dr. Henry Reyes Pineda*

Professor examinador – Universidad Del Quindio

Santa Cruz do Sul

2012

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família pelo constante incentivo, apoio e compreensão pelos momentos de ausência, em virtude da dedicação necessária para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores orientadores Adilson Ben da Costa e Rolf Fredi Molz pela orientação segura, atenção constante, disposição e profissionalismo durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores Jonas Kaercher e Rosana Schneider, a bolsista Marluce Purper e ao mestrando Rodrigo Klamt pelo imensurável apoio que me foi dado durante a elaboração do projeto e execução dos testes de produção na Incubadora da UNISC.

Agradeço as empresas Startup Automação Industrial LTDA e Sur Engenharia e Máquinas pela parceria, compreensão e oportunidade de realização da automação da planta de biodiesel.

Agradeço aos colegas, professores, colaboradores e amigos do Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais UNISC pelas incontáveis horas de estudos, pelos memoráveis momentos de diversão e pelo imensurável apoio que me foi dado.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão de bolsa de estudo, possibilitando a realização dos estudos.

Agradeço a todos os demais que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvido um sistema para a automação de uma planta de manufatura de biocombustíveis com capacidade de processamento de até 100 de litros de óleo por batelada, utilizando rota metélica. Para tanto, foram analisadas as diferentes possibilidades de desenvolvimento de uma solução eficiente, segura e de baixo custo, definindo-se um projeto elétrico para a automação da planta. A planta foi automatizada de forma a permitir o controle de todos os acionamentos elétricos de forma manual ou automática, além da configuração das variáveis de tempo e temperatura do processo, diretamente na interface de operação do quadro de comando, de forma segura e em tempo real. Foram realizadas três bateladas de teste utilizando 100 litros de óleo, 20 litros de metanol e 1,6 litros de metilato de sódio. A eficiência de conversão do óleo vegetal em biodiesel foi monitorada por HPLC (*High-Performance Liquid Chromatography*) e por ATR-FTIR (*Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared*). Os resultados confirmaram a conclusão da reação de transesterificação do óleo vegetal, cinco minutos após seu início. A partir destes resultados, foi possível definir as condições ideais de tempo e temperatura dos processos de transesterificação, evaporação, decantação, lavagem e secagem do biodiesel, analisando comparativamente os custos de construção, automação e operação da planta. Tendo em vista que o custo da automação da planta representou menos de 12% do valor total investido, não comprometendo os parâmetros de qualidade, produtividade e segurança da mesma, o sistema foi considerado adequado para as determinações propostas, podendo ser instalado em propriedades rurais ou cooperativas para produção própria de biodiesel.

Palavras-chave: biodiesel, transesterificação, automação, CLP.

## ABSTRACT

This paper presents the development of an automation system for a manufacture plant of biofuels with a processing capacity up to 100 liters of oil per batch, using methylic route. For this, different possibilities of development of an efficient, safe and low cost solution were analyzed, defining an electric project for the plant automation. The plant was automated, allowing the control of all electric actuators manually or automatically, safely and in real time, directly on the operation interface of the command board. Three test batches were performed using 100 liters of oil, 20 liters of methanol and 1,6 liters of sodium methylate. The conversion efficiency of oil into biodiesel was monitored by HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) and ATR-FTIR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared). The results confirmed the conclusion of the transesterification reaction of the oil, five minutes after its beginning. With these results, it was possible to define the ideal time and temperature conditions of the transesterification, evaporation, decantation, washing and drying biodiesel processes, comparatively analyzing the construction, automation and operation costs. Considering that the plant automation cost represented less than 12% of the total investment, not reducing the quality, productivity and safe parameters of the plant, the system was considered appropriate for the proposed determinations, allowing its installation on rural properties or cooperatives for biodiesel production.

Keywords: biodiesel, transesterification, automation, CLP.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Reação de síntese do biodiesel. ....	18
Figura 2 – Fluxograma da produção de biodiesel. ....	20
Figura 3 – Diagrama de representação de um sistema de controle. ....	30
Figura 4 – Diagrama de representação de um sistema de controle em malha aberta. .....	31
Figura 5 – Diagrama de representação de um sistema de controle em malha fechada. ....	32
Figura 6 – Diagrama de blocos do exemplo de sistema de controle de veículo. ....	33
Figura 7 – Comparativo entre sinais analógico e digital. ....	36
Figura 8 – Exemplo de Sensor de Nível. ....	37
Figura 9 – Exemplo de estrutura de um sensor indutivo. ....	38
Figura 10 – Comportamento do oscilador em um sensor indutivo. ....	39
Figura 11 – Exemplos de Sensor Indutivo. ....	39
Figura 12 – Curvas de termorresistências de níquel, cobre e platina. ....	41
Figura 13 – Pt-100 e Conversor 4-20mA. ....	42
Figura 14 – Diagrama dos principais componentes de um CLP típico. ....	44
Figura 15 – CLP e expansões utilizadas no trabalho. ....	45
Figura 16 – Exemplo de estrutura de um CLP modular. ....	46
Figura 17 – Exemplo de código em linguagem <i>Ladder</i> . ....	48
Figura 18 – Fluxograma das etapas que compõem este trabalho. ....	52
Figura 19 – Projeto do reator. ....	54
Figura 20 – Imagem do reator e do reservatório de metóxido. ....	55
Figura 21 – Projeto do evaporador. ....	56
Figura 22 – Imagem do evaporador. ....	56
Figura 23 – Projeto do decantador. ....	57
Figura 24 – Imagem do conjunto de decantadores. ....	58
Figura 25 – Projeto do reservatório de lavagem. ....	59
Figura 26 – Imagem do reservatório de lavagem. ....	60
Figura 27 – Imagem do tanque de purificação do biodiesel por adsorção. ....	61
Figura 28 – Imagem do reservatório pulmão. ....	62
Figura 29 – Vista da planta de manufatura de biodiesel. ....	63
Figura 30 – Válvulas utilizadas na planta de biodiesel. ....	64
Figura 31 – Bomba centrífuga utilizada na planta. ....	65
Figura 32 – Motoredutor utilizado no reator de sílica. ....	66
Figura 33 – Modelo de resistência elétrica utilizada na planta. ....	67
Figura 34 – Diagrama de blocos que compõem a planta de manufatura de biodiesel. .....	68
Figura 35 – Sensor Icos LA26M-40 e suas dimensões. ....	69
Figura 36 – Instalação de um sensor indutivo para válvula manual. ....	70
Figura 37 – Diagrama do projeto elétrico. ....	74
Figura 38 – Modelo de identificação dos acionamentos. ....	75
Figura 39 – Instalação do quadro de comando em junho de 2011. ....	76
Figura 40 – Pt-100 e resistência térmica do evaporador. ....	79
Figura 41 – Vista interna do reator. ....	80
Figura 42 – Interface de operação do quadro de comando. ....	84
Figura 43 – Identificação da interface de operação do quadro de comando. ....	85

Figura 44 – IHM utilizada no trabalho.....	86
Figura 45 – Telas de alerta.....	88
Figura 46 – Gráfico de temperatura do reator e do evaporador durante o primeiro teste. ....	90
Figura 47 – Saponificação resultante do primeiro teste. ....	91
Figura 48 – Gráfico de temperatura do reator e do evaporador durante o segundo teste. ....	93
Figura 49 – Gráfico de temperatura do reator e do evaporador durante os testes....	95
Figura 50 – Gráfico de análise de cromatografia da reação de transesterificação....	96
Figura 51 – Espectros de MIR das amostras no intervalo entre 650 e 4000 $\text{cm}^{-1}$ .....	97
Figura 52 – Espectros de MIR das amostras no intervalo entre 750 e 1350 $\text{cm}^{-1}$ .....	97



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de vantagens e desvantagens do uso do etanol .....	19
Tabela 2 – Especificações para comercialização do biodiesel.....	26
Tabela 3 – Principais impurezas do biodiesel e suas consequências no motor.....	29
Tabela 4 – Relação de entradas e saídas do CLP Logo e suas expansões .....	83
Tabela 5 – Relação de telas da IHM e suas respectivas descrições.....	86
Tabela 6 – Configurações de tempo e temperatura para o primeiro teste .....	89
Tabela 7 – Configurações de tempo e temperatura para o Teste 2 .....	92
Tabela 8 – Condições ideais de operação .....	98
Tabela 9 – Discriminação de valores investidos na planta.....	100
Tabela 10 – Discriminação de valores investidos na planta após modificação .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Standard of Testing and Materials</i>
ATR-FTIR	<i>Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
Cofins	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
HPLC	<i>High-Performance Liquid Chromatography</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IHM	Interface Homem Máquina
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kWh	Quilowatt-hora
mA	miliampère
NA	Normalmente Aberto
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NF	Normalmente Fechado
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PIS	Programa de Integração Social
U.S. DOE	<i>United States Department of Energy</i>

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
2 OBJETIVOS .....	15
2.1 Objetivos específicos .....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 Biodiesel.....	16
3.1.1 Transesterificação de óleos vegetais .....	17
3.1.2 Rota metílica e rota etílica .....	18
3.1.3 Etapas de produção do biodiesel .....	20
3.1.3.1 Preparação da matéria-prima.....	22
3.1.3.2 Reação de transesterificação .....	22
3.1.3.3 Separação de fases.....	23
3.1.3.4 Recuperação e desidratação do álcool .....	23
3.1.3.5 Destilação da glicerina .....	24
3.1.3.6 Purificação dos ésteres .....	25
3.1.4 Qualidade do biodiesel.....	26
3.2 Sistemas de controle de processos.....	30
3.2.1 Sistemas de malha aberta.....	31
3.2.2 Sistemas de malha fechada .....	32
3.3 Componentes de um sistema de controle de processos.....	34
3.3.1 Sensores .....	34
3.3.1.1 Sensor de Nível.....	36
3.3.1.2 Sensor Indutivo .....	37
3.3.1.3 Sensor de Temperatura.....	40
3.3.1.3.1 Termorresistência de platina (Pt-100) .....	41
3.3.2 Controlador Lógico Programável (CLP).....	43
3.3.2.1 Linguagens de Programação (IEC 61131-3) .....	46
3.3.2.1.1 Linguagem <i>Ladder</i> .....	47
3.3.3 Atuador.....	49
4 METODOLOGIA.....	51
4.1 Desenvolvimento da planta de produção de biodiesel .....	53
4.1.1 Reator.....	53
4.1.2 Evaporador .....	55
4.1.3 Decantador .....	57
4.1.4 Reservatório de lavagem.....	58
4.1.5 Reator de sílica .....	60
4.1.6 Reservatório pulmão .....	61
4.2 Acionamentos da planta de biodiesel .....	62
4.2.1 Válvulas manuais .....	63
4.2.2 Bombas centrífugas.....	64
4.2.3 Motoredutores .....	66
4.2.4 Resistências elétricas de aquecimento .....	67
4.3 Componentes utilizados na automação da planta de produção de biodiesel .....	67
4.3.1 Sensores utilizados .....	68

4.3.1.1 Sensores de temperatura Pt-100 .....	68
4.3.1.2 Sensores de nível .....	69
4.3.1.3 Sensores indutivos .....	69
4.3.2 O CLP .....	70
4.4 Testes de produção .....	71
4.5 Metodologia analítica para o controle de qualidade do produto final .....	72
4.6 Avaliação final do processo de produção desenvolvido .....	72
5 RESULTADOS .....	73
5.1 Histórico de desenvolvimento .....	73
5.1.1 Projeto elétrico .....	73
5.1.2 Instalações elétricas .....	75
5.1.3 Testes elétricos e problemas encontrados .....	76
5.2 Automação da planta de biodiesel .....	78
5.2.1 Controle de temperatura .....	78
5.2.2 Controle de nível de produto .....	79
5.2.3 Controle de fluxo de produto .....	81
5.2.4 Programação do CLP .....	82
5.2.5 O quadro de comando .....	84
5.2.6 A Interface Homem Máquina .....	85
5.3 Testes de produção .....	89
5.3.1 Teste de produção 1 .....	89
5.3.2 Teste de produção 2 .....	92
5.3.3 Teste de produção 3 .....	94
5.4 Qualidade do biodiesel produzido .....	96
5.5 Análise das condições ideais de operação .....	98
5.6 Análise de custos da planta .....	99
6 CONCLUSÕES .....	103
REFERÊNCIAS .....	105
ANEXO A – Diagrama Final da Planta de Biodiesel .....	111
ANEXO B – Lista de Componentes da Planta de Biodiesel .....	112
ANEXO C – Lista de Materiais para Automação .....	114
ANEXO D – Manual de Operação da Planta de Biodiesel .....	115

## 1 INTRODUÇÃO

A incorreta utilização de recursos naturais por parte dos seres humanos no decorrer dos anos ocasionou uma série de conseqüências negativas, tanto ambientais (aquecimento global, poluição) como econômicas, acarretando na necessidade de se avaliar a sustentabilidade dos modelos de desenvolvimento utilizados até então. Para tanto, visando evitar conseqüências mais severas, torna-se necessário repensar e estudar novas formas de utilização dos recursos naturais, bem como implementar soluções ambientalmente corretas e eficientes.

Em virtude disso, segundo Rocha e colaboradores (2008), Kaercher (2009) e Oliveira (2010), há um grande interesse na pesquisa por fontes alternativas de geração de energia, tais como eólica, solar e hidráulica. Neste campo, destaca-se o estudo dos biocombustíveis, especialmente como fonte de energia para veículos automotores, provindos de fontes renováveis, tais como o óleo de soja, óleo de girassol, o óleo de mamona e o etanol.

Prova deste interesse são os indicadores apontados no relatório apresentado pela Secretaria do Planejamento e Gestão do Rio Grande do Sul, o qual cita que no final de 2007, o Rio Grande do Sul consagrou-se como o maior produtor de biodiesel do país, ao vender 20% de todo o biodiesel negociado em leilões realizados para abastecer o mercado no primeiro semestre de 2008.

Além disso, conforme consta no Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis nº 42, de Junho de 2011, o Brasil classifica-se como o 2º maior produtor de biodiesel do mundo, perdendo apenas para a Alemanha. O documento aponta que há 120 mil agricultores familiares produzindo matéria-prima para 67 cooperativas nacionais, tornando o Brasil o principal mercado consumidor de biodiesel do mundo.

De acordo com dados dos boletins mensais apresentados até novembro de 2011 pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis, há 64 usinas produtoras de biodiesel com autorização de comercialização instaladas no Brasil. Isso corresponde a uma capacidade total autorizada de 17.827,95 m<sup>3</sup>/dia. No acumulado do ano, acrescido da estimativa para outubro, a produção atingiu 2.151 mil m<sup>3</sup>, um aumento médio de 8% em relação ao mesmo período de 2010 (2.001 mil m<sup>3</sup>).

Para suprir a demanda de matéria-prima e visando alavancar a produção de oleaginosas, a Comissão de Agricultura, Pecuária, Abastecimento e

Desenvolvimento Rural aprovou o Projeto de Lei 3.336/08. Este projeto autoriza os produtores rurais a produzirem biodiesel para consumo próprio, dentro de suas propriedades.

Este projeto altera a Lei 11.116 de 18 de maio de 2005, a qual dispõe sobre o Registro Especial na Secretaria da Receita Federal do Ministério da Fazenda, de produtor ou importador de biodiesel e sobre a incidência da Contribuição para o PIS/Pasep e da Cofins sobre as receitas decorrentes da venda desse produto. Com a alteração, revoga-se a exigência de Registro Especial ao produtor rural que produza biodiesel destinado a seu consumo próprio e às cooperativas agropecuárias que produzem biodiesel para fins de consumo por parte de seus associados. (HEINZE, 2008).

Nota-se portanto, que o Brasil investe no desenvolvimento de biocombustíveis, fato que pode impulsionar, também, o interesse na sua produção em pequena escala por parte de produtores rurais, para consumo próprio. Porém, para que este processo seja realizado de forma eficiente, necessita-se de uma planta de manufatura de biocombustíveis, que possua capacidade de produção para suprir as necessidades do produtor rural, com baixo custo de instalação, operação e manutenção. Isto, sem comprometer os parâmetros de qualidade, produtividade e segurança.

A Universidade de Santa Cruz do Sul possui uma planta piloto em desenvolvimento, baseada no estudo de Kaercher (2009). Conforme o autor, a planta piloto tem capacidade de produzir 50 litros de biodiesel por dia, em sistema semi-contínuo, utilizando óleos vegetais extraídos de plantas oleaginosas tais como soja e girassol, adotando como catalisador o metilato de sódio diluído em metanol.

O autor conclui que é viável a fabricação de um equipamento de produção de biodiesel para pequenas propriedades. Porém, além da construção da planta, deve-se estudar uma forma de automatizá-la, fornecendo ao usuário um produto de fácil utilização, que reduza o trabalho manual, aumente a produtividade e a segurança operacional, proporcionando maior precisão e exatidão nos processos, gerando um produto final com qualidade superior.

Neste contexto, a automação de processos pode contribuir, transferindo à produção de biodiesel convencional as vantagens de um sistema automatizado, tais como: precisão e exatidão nas dosagens, aumento de produtividade e qualidade, continuidade operacional, segurança e menor consumo de energia.

Esta pesquisa está voltada ao processo de produção de biodiesel em escala piloto, investigando suas principais variáveis e possibilidades de automação. É compromisso desta pesquisa, o desenvolvimento de um sistema de automação de baixo custo do processo de produção, o qual não comprometa os parâmetros de qualidade, produtividade e segurança do mesmo.

Ao longo deste trabalho será feita uma abordagem teórica dos conceitos envolvidos no presente trabalho, explanando então o sistema desenvolvido e apresentando os resultados obtidos. O capítulo 2 apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho. No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica, visando elucidar os conceitos envolvidos na manufatura de biodiesel através da reação de transesterificação de óleos vegetais, bem como apresentar os componentes utilizados no desenvolvimento da planta de manufatura automática de biodiesel. O capítulo 4 aborda a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema proposto. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5. Por fim, no capítulo 6 expõem-se as conclusões finais e sugestões para futuros trabalhos.

## **2 OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho constituiu o desenvolvimento de um sistema para a automação de uma planta de manufatura de biocombustíveis em baixa escala, a qual deverá ser aplicada em propriedades rurais, para consumo próprio por parte do produtor rural.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Analisar diferentes possibilidades de desenvolvimento de uma solução eficiente para a produção de biodiesel em bateladas de até 100 litros de óleo, com baixo custo;
- Implantar (montar, automatizar e operar) a planta de produção de biodiesel em escala piloto;
- Determinar a eficiência da solução proposta na síntese de biodiesel a partir de rota metílica.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico sobre o biodiesel, bem como os métodos utilizados na sua produção e conceitos sobre a automação aplicada na planta objeto deste estudo. O item 3.1 descreve a caracterização do biodiesel, incluindo a metodologia utilizada na transesterificação de óleos vegetais, abordando as etapas necessárias para a produção do biodiesel, finalizando com a metodologia de análise da qualidade do biodiesel produzido. O item 3.2 apresenta os sistemas de controle em malha aberta e malha fechada, elucidando a estratégia de controle adotada neste trabalho. No item 3.3 são descritos os componentes da malha de controle utilizada neste trabalho, composta por sensores, controladores lógicos programáveis e atuadores.

#### 3.1 Biodiesel

A Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) definiu biodiesel como um combustível composto de ésteres mono-alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou gorduras animais, designado B100, adequado conforme os requisitos da norma ASTM D 6751.

De acordo com o artigo 2º da Resolução ANP nº 7, de 19 de março de 2008, publicada no Diário Oficial da União em 20 de março de 2008, conceitua-se biodiesel como combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais. Este biodiesel é denominado B100, por não possuir mistura com óleo diesel.

Ainda segundo esta resolução, a mistura de óleo diesel ao biodiesel B100, resulta em um combustível comercial composto de (100-X)% em volume de óleo diesel, conforme especificação da ANP, e X% em volume do biodiesel, que deverá atender à regulamentação vigente. A partir de janeiro de 2010, por determinação governamental, a mistura a ser utilizada é denominada B5, ou seja, 95% de diesel e 5% de biodiesel.

O Biodiesel é derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. Conforme

Mialhe (1996) apud Juliato (2006) e Knothe et al. (2006), as máquinas agrícolas que utilizam óleo diesel como combustível, podem utilizar o biodiesel como alternativa.

Entretanto, Geris et al. (2007), Sala (2008), Juliato (2006), Ghesti (2006), Meher et al. (2006), Knothe et al. (2006) e Kaercher (2009) alertam que o uso de óleos vegetais como combustível alternativo para equipamentos a diesel é considerado insatisfatório e impraticável, por apresentar uma série de fatores limitantes, como alta viscosidade, conteúdos de ácidos graxos livres, combustão incompleta e baixa volatilidade. Estes fatores segundo os autores podem resultar na formação de depósitos nos injetores de combustível das máquinas.

Complementam ainda os autores que várias alternativas foram consideradas para reduzir esses problemas, como por exemplo: diluição; emulsificação através da formação de micro-emulsões usando solventes como metanol, etanol ou butanol; pirólise; craqueamento catalítico empregando sais metálicos e transesterificação com etanol ou metanol.

Por fim, citam os autores que, das várias metodologias descritas na literatura para obtenção do biodiesel, a transesterificação de óleos vegetais é atualmente o método de escolha, principalmente porque as características físicas dos ésteres de ácidos graxos são muito próximas daquelas do diesel.

### **3.1.1 Transesterificação de óleos vegetais**

Segundo Geris et al (2007), transesterificação é um termo geral usado para descrever uma importante classe de reações orgânicas, onde um éster é transformado em outro, através da troca do resíduo alcoxila. Na transesterificação de óleos vegetais, um triacilglicerídeo reage com um álcool na presença de uma base ou ácido forte, produzindo uma mistura de ésteres de ácidos graxos e glicerol.

O processo de transesterificação consiste na reação química de triglicerídeos com alcoóis (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (ácido, base ou enzimático), produzindo-se um composto éster-glicerina. O biodiesel derivado de ésteres de ácidos graxos pode ser produzido a partir de uma variada tecnologia de esterificação, com os processos seguindo uma mesma linha básica fundamental (SALA, 2008).

Lima Neto et al. (2006) explicam que a transesterificação, processo mais utilizado atualmente para a produção de biodiesel, consiste numa reação química de

óleos vegetais ou gorduras animais com o metanol (ou etanol), estimulada por um catalisador. Da reação, extraem-se os ésteres e a glicerina, produto com aplicações diversas na indústria química. A Figura 1 ilustra este processo.

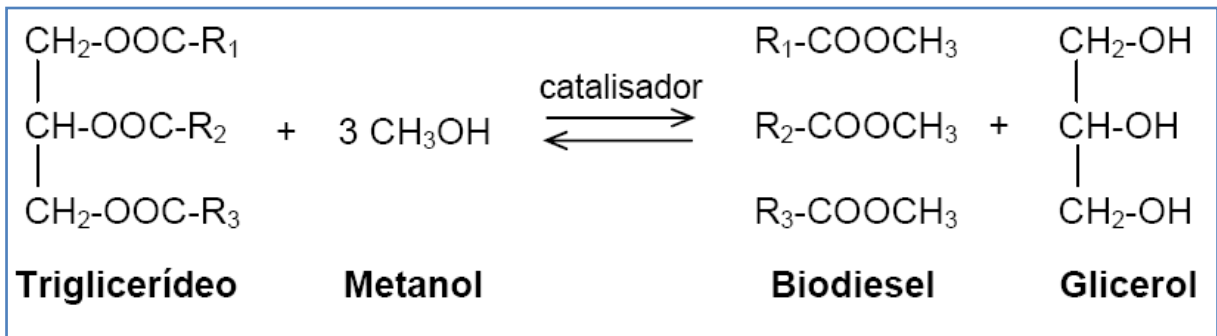


Figura 1 – Reação de síntese do biodiesel.  
Fonte: Rodrigues (2009).

Contudo, ressalta Kaercher (2009) que muitos aspectos, tais como, o tipo de catalisador, proporção molar entre a matéria graxa e o álcool, temperatura, pureza dos reagentes e o conteúdo de ácidos graxos livres, têm influência no curso da reação de transesterificação e devem ser otimizados. Assim, em geral, na transesterificação de óleos vegetais é importante que sejam controlados a quantidade de catalisador, presença de água no meio, relação molar entre os reagentes ou substratos, tempo e temperatura de reação e sistema de agitação.

### 3.1.2 Rota metílica e rota etílica

Em virtude dos fatos mencionados, percebe-se que uma importante etapa do processo de transesterificação de óleos vegetais consiste na reação química dos triglicerídeos com um álcool. Neste ponto, averigua-se que os alcoóis mais utilizados, de acordo com os autores citados, são o etanol e o metanol.

Conforme Marvulle et al. apud Sala (2008), Kaercher (2009) e Geris et al. (2007), a transesterificação segundo uma rota metílica é a mais utilizada no mundo, devido ao seu baixo custo e às suas vantagens físicas e químicas (polaridade, álcool de cadeia mais curta, reage rapidamente com o triacilglicerídeo e dissolve facilmente o catalisador básico). Além disso, permite a separação simultânea do glicerol. A mesma reação usando etanol é mais complicada, pois requer um álcool anidro, bem como um óleo com baixo teor de água para levar à separação do glicerol.

Já Lima e colaboradores (2006) afirmam que, dos alcoóis de cadeia pequena, o metanol é o mais utilizado. Entretanto, este reagente é oriundo do petróleo e também é bastante tóxico. O uso de etanol é uma boa opção, pois além de ser obtido da biomassa, o Brasil é um dos líderes mundiais de produção deste.

Além disso, Juliato (2006) relata, a partir de estudos do governo, que faz-se necessário consolidar a tecnologia de transesterificação etílica, tendo em vista a potencialidade brasileira na produção do etanol a partir da cana-de-açúcar. Entretanto, barreiras tecnológicas e comerciais podem dificultar a colocação do biodiesel nacional nos mercados externos, como Estados Unidos e União Européia, onde predomina a transesterificação metílica.

Sala (2008) e Mourad (2008) salientam que o processo de transesterificação pode utilizar como álcool o metanol, rota muito conhecida e aplicada industrialmente com sucesso em diversos países, ou o etanol, que sugere ser a opção mais vantajosa para o Brasil, pois é produzido em larga escala e a custos mais baixos. O metanol, além de ser tóxico, necessita ser importado ou produzido a partir do gás natural, de origem fóssil.

Segundo Carulo (2008), geralmente o metanol, proveniente de madeira, carvão ou gás natural, é o preferido porque é mais barato e a reação torna-se mais previsível. Por outro lado, se ingerido, pode ser fatal e deve ser manuseado com muito cuidado. A autora cita Pahl (2005), que afirma que o etanol, embora seja mais caro e não produza uma reação consistente e estável, é menos tóxico e provém de uma fonte renovável. A Tabela 1 apresenta algumas vantagens e desvantagens do uso de etanol, conforme Brandão et al. (2006) apud Carulo (2008).

Tabela 1 – Relação de vantagens e desvantagens do uso do etanol

<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
Produção alcooleira no Brasil já consolidada e produz biodiesel com maior lubricidade quando comparado com o biodiesel metílico.	Os ésteres etílicos possuem maior afinidade à glicerina, dificultando a separação.
Menor risco de incêndios e não é tóxico como o metanol.	Os custos de produção do biodiesel etílico podem ser até 10% maiores que o metílico.
Quando produzido a partir da biomassa, como é o caso do Brasil, produz um combustível 100% renovável.	

Fonte: tabela elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas na obra Bandão et al. (2006) apud Carulo (2008).

Por fim, enfatizando esta questão, cita-se Grangeiro (2008), a qual afirma que o metanol utilizado na síntese do biodiesel acaba gerando resíduos tóxicos na etapa de lavagem. Desta maneira, a água de lavagem torna-se rica em metanol e demais produtos, sendo descartada sem nenhum tipo de tratamento.

### 3.1.3 Etapas de produção do biodiesel

Conforme mencionado nas seções anteriores, o biodiesel é um combustível que pode ser produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais. Os autores citados contemplam a idéia de que o processo de transesterificação é o mais utilizado dentre as técnicas para produção de biodiesel e que, para tanto, os alcoóis mais utilizados são o metanol e o etanol. Porém, o processo de produção de biodiesel compreende demais estágios, os quais serão tratados a seguir.

O processo de produção de biodiesel por transesterificação, partindo-se de uma matéria-prima graxa qualquer, envolve as etapas operacionais ilustradas no fluxograma da Figura 2.

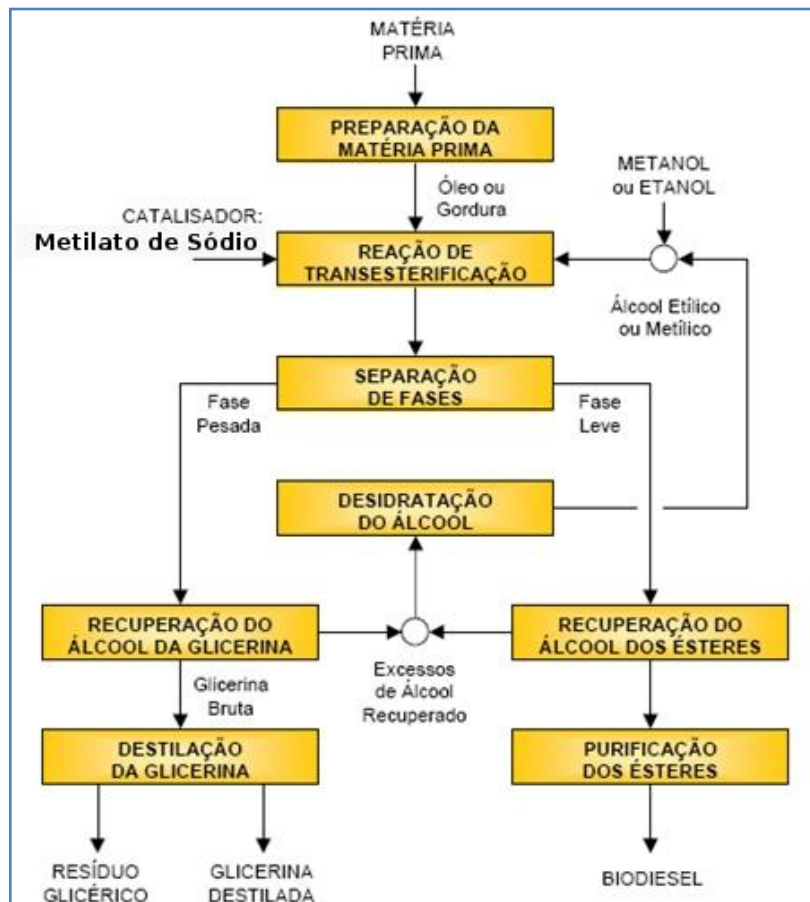


Figura 2 – Fluxograma da produção de biodiesel.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas na obra Brasil (2003).

Conforme o diagrama de produção por rota etílica apresentado na Figura 2, a primeira etapa consiste em misturar o óleo de soja com o etanol e o hidróxido de potássio por tempo pré-determinado a uma temperatura controlada.

A mistura típica do produto de uma reação de transesterificação contém ésteres, monoglicerídeos, diglicerídeos, glicerol, álcool e catalisador, em várias concentrações. Se a reação atingir um alto nível de conversão, o produto formará duas fases líquidas e uma fase sólida se for usado um catalisador sólido. A fase de fundo será o glicerol e a fase de topo será álcool e ésteres.(BIODIESELBR, 2008).

Conforme Brandão et al. (2006), após a reação, aguarda-se a separação das fases para retirar o excesso de álcool etílico por destilação. A fase de fundo (ésteres/glicerina) deve ser transferida para um recipiente, onde ocorrerá a etapa de decantação. Já a fase superior deve passar por um processo de lavagem, visando retirar as impurezas da mistura.

Segundo Geris et al. (2007), inicialmente lava-se a fase superior com solução aquosa de ácido clorídrico; em seguida, efetua-se uma lavagem com solução saturada de NaCl e, finalmente, com água destilada. A ausência do catalisador básico no biodiesel pode ser confirmada através da medida do pH da última água de lavagem, a qual deve estar neutra.

Por fim, de acordo com Vieira et al. (2007), o biodiesel apresenta-se saturado em água e deve passar por uma etapa de secagem. Salientam os autores que o biodiesel possui grande capacidade de absorção de água, especialmente o biodiesel proveniente da mamona, que consegue reter cerca de oito vezes mais água do que o biodiesel de soja.

Em estudo realizado, Brandão e colaboradores (2006) concluíram que as condições ideais para a produção de biodiesel metílico a partir do óleo de soja foram: razão molar óleo/metanol 1:5,84, teor de catalisador de 1,0%, tempo de reação de 90 minutos e a temperatura ambiente, cujo rendimento em massa do biodiesel foi de 98,35 % e teor de ésteres foi de 96,61 %.

Já para a obtenção do biodiesel etílico de soja, as condições ideais foram: relação óleo/etanol 1:11,8, e 2,0 % (p/v) de KOH por peso do óleo vegetal, à temperatura ambiente, com um tempo de reação de 60 minutos. Nessas condições o biodiesel etílico apresentou 97,75 % de teor de ésteres e um rendimento de biodiesel puro igual a 64,07 %.

Na sequência são descritas, de forma detalhada, as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 2.

### **3.1.3.1 Preparação da matéria-prima**

Cita Kaercher (2009) que, na indústria, normalmente as etapas de produção de biodiesel são bem mais complexas e de forma contínua ou semi-contínua. Inicialmente, o óleo bruto passa por um processo de neutralização para remoção da acidez livre.

Conforme Brasil (2003) apud Costa e Oliveira (2006),

Os procedimentos relativos à preparação da matéria-prima para a sua conversão em biodiesel visam criar as melhores condições para a efetivação da reação de transesterificação, com a máxima taxa de conversão. Em princípio, se faz necessário que a matéria-prima tenha o mínimo de umidade e de acidez, o que é possível submetendo-a a um processo de neutralização, através de uma lavagem com uma solução alcalina de hidróxido de sódio ou de potássio, seguida de uma operação de secagem ou desumidificação. As especificidades do tratamento dependem da natureza e condições da matéria graxa empregada como matéria-prima.

Quiriano (2008) cita Del Vecchio (2006), o qual informa que, antes de inserir o óleo vegetal no reator, o mesmo precisa passar por uma etapa de tratamento, na qual são reduzidos, para um máximo de 0,1%, seus percentuais de umidade e de ácidos graxos livres. Este processo pode ser realizado por meio de secagem e destilação a vapor ou neutralização, melhorando o processo e a qualidade do produto obtido.

Por fim, Grangeiro (2009) cita que a especificidade do tratamento depende da natureza e das condições de cada produto. Após a preparação da matéria prima, é realizada a reação de transesterificação.

### **3.1.3.2 Reação de transesterificação**

Conforme citado anteriormente, a reação de transesterificação visa converter o óleo ou a gordura em ésteres etílicos ou metílicos de ácidos graxos que constituem o biodiesel. Menciona Zot (2006) que o processo de transesterificação envolve a reação do óleo vegetal (triglicerídio) com um álcool, utilizando um catalisador, como a soda cáustica. O resultado dessa reação é um éster e, como subproduto, a glicerina.

Complementando o que foi mencionado pelos autores, cita Faccini (2008) que o principal processo de produção de biodiesel a partir de óleo de soja, inclui a transformação do óleo em ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, através da reação de transesterificação. Cita ainda a autora que o hidróxido de potássio vem sendo usado com vantagens na transesterificação, pois facilita a separação do éster e da glicerina. Esta reação pode ser visualizada na Figura 1.

Mourad (2008) relata que aspectos como o tipo de catalisador, a razão molar álcool/óleo vegetal, temperatura, pureza dos reagentes (principalmente conteúdo de água) e conteúdo de ácidos graxos livres, afetam o andamento da reação.

### **3.1.3.3 Separação de fases**

Após a reação de transesterificação, forma-se a glicerina, que é separada do biodiesel por decantação, uma vez que os dois produtos (ésteres e glicerina) têm densidades distintas. A fase mais densa, a glicerina, pode ser apartada por gravidade da fase menos densa, os ésteres (OLIVEIRA, 2010).

Complementam Costa e Oliveira (2006) que após a reação de transesterificação, a massa reacional final é constituída de duas fases, separáveis por decantação. A fase mais pesada é composta de glicerina bruta, impregnada dos excessos utilizados de álcool, de água e de impurezas inerentes à matéria-prima. A fase menos densa é constituída de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos, conforme a natureza do álcool originalmente adotado, também impregnado de excessos reacionais de álcool e de impurezas.

Já Mourad (2008) explica que mesmo que uma mistura álcool/óleo livre de água seja utilizada, em virtude da reação do hidróxido com o álcool, é produzida água no meio. A presença de água provoca uma reação de saponificação (formação de sabões), reduzindo o rendimento do éster e dificultando consideravelmente a recuperação do glicerol, devido à formação de emulsões.

### **3.1.3.4 Recuperação e desidratação do álcool**

Após a decantação, a fase de fundo contém água e álcool e deve ser submetida a um processo de evaporação. Os vapores de água e álcool são, a seguir, liquefeitos em um condensador. Da mesma forma, o álcool residual é



recuperado da fase do topo. Após essa recuperação, o álcool ainda contém água e deve ser desidratado. Essa desidratação é normalmente feita por destilação (LIMA, 2004).

Relata Quiriano (2008) que a fase leve (superior) deve passar por uma etapa de recuperação do álcool, visando a purificação do éster. Este processo consiste em evaporação, seguida de condensação. O álcool recuperado das duas fases contém água, sendo assim necessário passar por uma destilação, no caso do metanol; e desidratação, no caso do etanol.

Neste ponto, ocorrem diferenças em relação ao uso de etanol e metanol como álcool para a reação de transesterificação. Os autores citados alertam que a utilização do etanol dificulta a separação da água, conforme menciona Parente (2003), ao informar que a desidratação do metanol é bastante simples e fácil de ser conduzida, uma vez que a volatilidade relativa dos constituintes dessa mistura é muito grande e inexistente a azeotropia. Porém, a desidratação do etanol é mais difícil, em razão da azeotropia associada à volatilidade relativa não tão acentuada.

### **3.1.3.5 Destilação da glicerina**

A glicerina da fase de fundo deve ser purificada, apresentando maior valor de mercado, tornando assim mais competitivo o custo de venda do biodiesel. Essa purificação é realizada por evaporação para a eliminação dos constituintes voláteis, que serão condensados posteriormente em um condensador, e por destilação a vácuo, para retirada de impurezas (QUIRIANO, 2008).

Conforme Parente (2003), a glicerina bruta, emergente do processo, mesmo com suas impurezas convencionais, já constitui um subproduto que pode ser comercializado. No entanto, o mercado é muito mais favorável à comercialização da glicerina purificada. Lima (2004) complementa afirmando que a purificação da glicerina bruta pode ser feita por destilação a vácuo, gerando um produto límpido e transparente. O produto de calda da destilação, ajustável na faixa de 10% a 15% do peso da glicerina bruta, pode ser denominado de “glicerina residual” e ainda encontra possíveis aplicações.

### 3.1.3.6 Purificação dos ésteres

Os ésteres deverão ser lavados por centrifugação e desumidificados posteriormente, resultando em biodiesel, o qual deverá ter suas características enquadradas nas especificações das normas técnicas vigentes para uso em motores do ciclo diesel (PARENTE, 2003).

Complementa Faccini (2008) que o processo de produção de biodiesel deve reduzir ao máximo a presença de contaminações no produto, como glicerina livre e/ou ligada, sabões ou água, tornando necessário o emprego de etapas eficientes de limpeza do produto final para garantir a remoção total destes contaminantes.

Cita a autora que Kucek e colaboradores e Wang e colaboradores desenvolveram um estudo sobre a purificação dos ésteres via adição de 10% de água a 80 °C por três vezes. Em ambos os trabalhos foi possível obter biodiesel com qualidade, porém com a desvantagem de utilizar grande quantidade de água e, conseqüentemente, gerar grande volume de efluentes.

Já Brandão e colaboradores (2006) realizaram o processo de purificação do biodiesel a base de óleo de babaçu através de lavagem. Na primeira lavagem foi utilizada uma solução de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Na sequência, o biodiesel foi lavado com água até o pH 7,0. Após as lavagens, o biodiesel passou por uma etapa de secagem em estufa a 100 °C por 3 horas.

Além disso, Noureddini (2001) apud Grangeiro (2009), afirma que, durante a etapa de purificação do biodiesel, são retirados resíduos de glicerina, sabões e ácidos graxos. Essa purificação é feita pela lavagem do produto, seguida por filtragem e secagem do mesmo. Em virtude disso, as águas de lavagem ficam contaminadas com resíduos de sabões de sódio ou potássio, além dos ácidos graxos, glicerina, alcoóis (metanol ou etanol) e outros contaminantes.

Neste sentido, a legislação brasileira, particularmente o artigo 24 da Resolução 357/2005 do CONAMA, estabelece que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam as condições, padrões e exigências dispostos na Resolução e em outras normas aplicáveis.

Por fim, ressaltam De Boni e colaboradores (2007) que a etapa de lavagem do processo de produção do biodiesel é uma das mais importantes e também uma das mais críticas, necessitando de atenção para questões como quantidades utilizadas e

reaproveitamento deste efluente. De acordo com os autores, para cada litro de biodiesel produzido, são necessários, no mínimo, 3 litros de água.

### 3.1.4 Qualidade do biodiesel

O biodiesel é perfeitamente miscível e físico-quimicamente semelhante ao óleo diesel de petróleo. Ele tem sido utilizado em motores do ciclo diesel automotivo ou estacionários (geradores de eletricidade e de calor), conforme proporções previamente definidas da mistura de diesel e biodiesel. Atualmente, segundo a autora, existem vários estudos sobre a utilização do biodiesel em motores durante um longo período de tempo (CARULO, 2008).

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis publicou, em 19 de março de 2008, a Resolução ANP 07/2008. Este documento estabelece as especificações que norteiam a comercialização do biodiesel no país. As especificações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações para comercialização do biodiesel.

Característica	Unidade	Limite	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	850 - 900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 - EN ISO 12185
Viscosidade cinemática a 40 °C	mm <sup>2</sup> /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	15342 (4) (5)	-	EN 14103
Resíduo de carbono (6)	% massa	0,050	-	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

Característica	Unidade	Limite	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de Cetano (5)	-	Anotar	-	613 6890 (8)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19 (9)	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg /g KOH	0,50	14448 -	664 -	- EN 14104 (10)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15341 (5) - -	6584 (10) -	- EN 14105 (10) EN 14106 (10)
Glicerol total, máx.	% massa	0,25	15344 (5) -	6584 (10) -	- EN 14105 (10)
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar	15342 (5) 15344 (5)	6584 (10)	- - EN 14105 (10)
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, mín. (2)	h	6	-	-	EN 14112 (10)

Fonte: tabela elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas na obra Resolução ANP N° 07 de 19 de março de 2008.

**NOTA:**

- (1) LII – 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 método ABNT NBR 15342 poderá ser utilizado para amostra oriunda de gordura animal.
- (5) Para biodiesel oriundo de duas ou mais matérias-primas distintas das quais uma consiste de óleo de mamona:
  - a) teor de ésteres, mono-, diacilgliceróis: método ABNT NBR 15342;
  - b) glicerol livre: método ABNT NBR 15341;
  - c) glicerol total, triacilgliceróis: método ABNT NBR 15344;
  - d) metanol e/ou etanol: método ABNT NBR 15343.
- (6) O resíduo deve ser avaliado em 100% da amostra.
- (7) 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.

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

(9) 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.

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

Conforme McCormik et al. (2005), dentre as especificações técnicas encontradas na Tabela 2, algumas são particularmente importantes, conforme descrição a seguir:

- Número de cetano: Mede a qualidade de ignição de um combustível e tem influência na partida do motor e no seu funcionamento. Quanto menor o número de cetano, maior será o retardo da ignição. Em geral, o biodiesel tem número de cetano maior que o diesel.
- Ponto de fulgor: A temperatura mínima de 100 °C assegura que o metanol do processo foi completamente removido. Isto é importante tendo em vista a questão da saúde do operador e a natureza corrosiva do metanol.
- Viscosidade: A viscosidade deve situar-se na faixa especificada de 3,0 a 6,0 mm<sup>2</sup>/s, pois elevadas viscosidades causam altas pressões de injeção, forçando o uso e reduzindo o tempo de vida útil dos motores.
- Resíduo de carbono: Este parâmetro mede a tendência do combustível em formar depósitos de carbono na câmara de combustão, sendo permitido um máximo de 0,05% em massa.
- Índice de acidez: Deve ser de no máximo 0,5 mg KOH/g, pois a acidez é decorrente da presença de ácidos graxos livres e produtos de oxidação, os quais são corrosivos.

De acordo com o U.S. DOE (*United States Department of Energy*), o biodiesel tem propriedades lubrificantes superiores e pode reduzir o desgaste dos motores a diesel. Testes de bancada têm mostrado que aproximadamente 1% de biodiesel pode aumentar a lubricidade do combustível em mais de 65%. O diesel com baixíssimo teor de enxofre tende a respeitar as regulamentações vigentes, porém

tem suas propriedades lubrificantes reduzidas. Para solucionar este problema, pode-se utilizar um baixo teor de biodiesel como agente lubrificante.

Além disso, o biodiesel tem um número de cetano superior ao diesel comum, resultando em períodos de ignição mais curtos. Caso esse número esteja abaixo da exigência mínima, o combustível pode causar uma operação ineficiente, tornando a partida do motor mais difícil, além de aumentar os depósitos nos motores, resultando em maior emissão de fumaça, emissão de gases de exaustão e desgaste dos motores.

A glicerina arrasta consigo a maior parte do sabão, do catalisador e do álcool. Porém, devido a um processo de separação insuficiente ou reação incompleta, os produtos da reação pretendidos podem encontrar-se contaminados com estes compostos. A presença destes resíduos faz com que seja fundamental a etapa de purificação do biodiesel (FACCINI, 2008). A Tabela 3 apresenta as principais impurezas do biodiesel e suas conseqüências no motor.

Tabela 3 – Principais impurezas do biodiesel e suas conseqüências no motor.

<b>CONTAMINAÇÃO</b>	<b>EFEITO</b>	<b>FALHA</b>
Metanol livre	Corrosão do alumínio e do zinco. Diminuição do ponto de fulgor.	Corrosão
Catalisador (Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> )	Produção de partículas sólidas.	Entupimento dos injetores
Água dissolvida no biodiesel	Formação de ácidos graxos.	Entupimento dos filtros
Água livre em misturas	Corrosão de todas as partes metálicas. Proliferação de bactérias. Aumento da condutividade elétrica.	Corrosão e formação de depósitos
Glicerina livre, mono e diacilgliceróis	Corrosão de metais não ferrosos. Entupimento dos filtros de celulose. Sedimentação em partes móveis.	Entupimento dos filtros e coqueificação nos injetores
Ácidos graxos livres	Geração de calor excessivo nas bombas. Maior tensão entre componentes.	Falhas nas bombas e baixa atomização do combustível

<b>CONTAMINAÇÃO</b>	<b>EFEITO</b>	<b>FALHA</b>
Impurezas sólidas	Problemas de lubricidade	Reduzido tempo de serviço
Ácidos corrosivos (fórmico e acético)	Corrosão de todas as partes metálicas	Corrosão
Produtos de polimerização	Formação de depósitos	Entupimento dos filtros. Formação de depósitos.

Fonte: tabela elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas na obra Felizardo (2003) apud Faccini (2008).

### 3.2 Sistemas de controle de processos

Esta seção trata sobre os sistemas de controle, seus componentes e metodologias. Segundo Dorf e Bishop (2008), engenheiros que trabalham com sistemas de controle, vislumbram o entendimento e o controle de segmentos do seu ambiente, materiais e forças da natureza, geralmente denominados sistemas, visando providenciar produtos econômicos e úteis para a sociedade. Entender e controlar são metas complementares, pois sistemas de controle efetivos requerem que os mesmos sejam compreendidos e então modelados.

Ainda segundo os autores, um sistema de controle é uma interconexão de componentes, formando uma configuração que fornecerá uma resposta. Na modelagem de sistemas, um componente ou processo a ser controlado pode ser representado por um bloco, conforme ilustra a Figura 3.



Figura 3 – Diagrama de representação de um sistema de controle.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas nas obras Dorf e Bishop (2008), Phillips e Harbor (1996), Bega et al. (2006) e Ogata (2000).

Ogata (2000) utiliza a definição do dicionário Merriam-Webster para conceituar processo.

[...]uma operação ou desenvolvimento natural, que evolui progressiva e continuamente, caracterizado por uma série de mudanças graduais que se sucedem umas às outras, de um modo relativamente fixo e objetivando um resultado particular ou meta; ou, uma operação artificial ou voluntária que evolui progressivamente e se constitui de uma série de ações controladas ou de movimentos sistematicamente dirigidos para se alcançar um determinado resultado ou meta.[...]  
(OGATA, 2000, p.2).

Conforme Bega et al. (2006), os processos industriais são variados, englobam diversos tipos de produtos e exigem controle preciso dos produtos gerados. Na grande maioria dos processos, é indispensável controlar e manter constantes variáveis como pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade, velocidade e umidade.

Visando controlar de forma precisa estas variáveis, há dois tipos de controle que podem ser aplicados. Esses sistemas são denominados sistema de malha aberta e sistema de malha fechada, os quais são abordados nas seções seguintes.

### 3.2.1 Sistemas de malha aberta

Um sistema em malha aberta é aquele em que a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as variações que ocorrem nas variáveis do processo e que influenciam na variável controlada (BEGA et al., 2006).

De acordo com Dorf e Bishop (2008), um sistema de controle em malha aberta utiliza um controlador e um dispositivo atuador para controlar o processo diretamente, sem utilizar realimentação. Ou seja, este sistema não possui um *feedback* sobre a resposta obtida na saída. A Figura 4 apresenta um exemplo de diagrama de um sistema de controle em malha aberta.

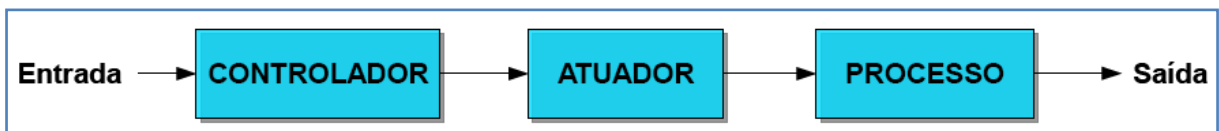


Figura 4 – Diagrama de representação de um sistema de controle em malha aberta.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas nas obras Dorf e Bishop (2008), Phillips e Harbor (1996), Bega et al. (2006) e Ogata (2000).

Complementam Bega e colaboradores (2006) que o conceito de malha aberta é frequentemente utilizado nas discussões dos sistemas de controle, para indicar que está investigando-se a dinâmica do processo em uma condição não controlada.

Ainda segundo os autores, em um sistema em malha aberta não há realimentação, ou seja, a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as variações que ocorrem nas variáveis do processo e que influenciam a variável controlada.



Nos sistemas de controle em malha aberta, o sinal de saída não é comparado com o sinal de referência de entrada. Assim, a cada sinal de referência na entrada, corresponde uma condição de operação fixa. Na prática, os sistemas de controle a malha aberta são utilizados somente quando as relações entre entrada e saída do processo a ser controlado forem conhecidas (OGATA, 2000).

Um exemplo que ilustra um sistema em malha aberta é a utilização de um forno microondas. Normalmente, a operação do forno se dá a partir de um tempo programado, ou seja, o usuário informa o tempo necessário para aquecer um alimento. O microondas então efetua esta operação até atingir o tempo programado, sem considerar a hipótese de que o alimento possa estar aquecido na metade do tempo programado.

### 3.2.2 Sistemas de malha fechada

Em contraste com um sistema de controle em malha aberta, os sistemas de controle em malha fechada utilizam uma medição adicional da saída atual, para compará-la ao valor de saída desejado. Esta medição é denominada realimentação ou sinal de *feedback*. A Figura 5 apresenta um diagrama de sistema de controle em malha fechada (DORF e BISHOP, 2008).

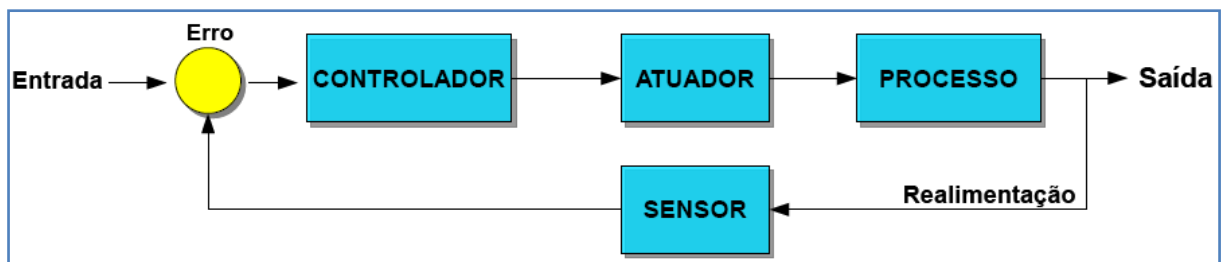


Figura 5 – Diagrama de representação de um sistema de controle em malha fechada.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas nas obras Dorf e Bishop (2008), Phillips e Harbor (1996), Bega et al. (2006) e Ogata (2000).

Citam Philips e Harbor (1996) que um sistema físico ou processo deve ser precisamente controlado através de uma operação em malha fechada ou de realimentação. Uma variável de saída, chamada resposta, é ajustada conforme determinação do sinal de erro. Este sinal corresponde à diferença entre a resposta do sistema (mensurada por um sensor) e o sinal de referência, o qual representa a resposta desejada.

Complementam Dorf e Bishop (2008) que um sistema de controle realimentado geralmente utiliza uma relação entre a saída e a referência de entrada para controlar o processo. Normalmente, a diferença entre a saída do processo controlado e a referência da entrada é amplificada, visando sua redução contínua, ou seja, o objetivo do sistema de controle em malha fechada consiste em reduzir constantemente o erro, até atingir o ponto desejado de operação.

A função fundamental do sistema de controle em malha fechada é manipular a relação entre a entrada e a saída de energia ou material, de maneira que a variável controlada do processo permaneça dentro dos limites estabelecidos, ou seja, o sistema de controle em malha fechada regula a variável controlada, realizando correções em outra variável do processo (BEGA et al., 2006).

Um exemplo que ilustra o processo de controle em malha fechada de forma manual é apresentado por Dorf e Bishop (2008). No exemplo, um motorista está dirigindo um veículo e deve manter o mesmo sobre a pista, na direção correta. Neste exemplo, o motorista é considerado o controlador do sistema. Ele possui sensores que podem ser utilizados na tarefa de posicionar corretamente o carro na pista, como a visão. De acordo com os sinais provindos desses sensores, o motorista calcula a diferença entre a direção desejada e a direção em que o veículo se desloca no momento, utilizando então o atuador, neste caso representado pelo volante, para corrigir o curso do veículo. A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos que ilustra esse sistema.

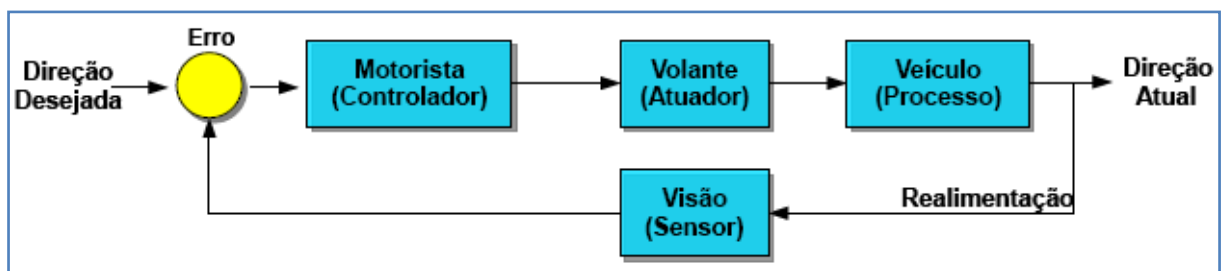


Figura 6 – Diagrama de blocos do exemplo de sistema de controle de veículo.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em Dorf e Bishop (2008).

Neste ponto, é preciso definir alguns conceitos utilizados na literatura e que serão empregados no decorrer deste trabalho. Primeiramente, segundo Bega et al. (2006), define-se *setpoint* o ponto de ajuste, ou o ponto desejado de operação, ou

simplesmente a meta do sistema de controle. Os sistemas em malha fechada realizam correções, visando atingir o *setpoint* especificado.

Já o erro, caracterizado como a diferença entre o valor que deseja-se atingir e o valor encontrado na saída do sistema, é denominado *offset*. Para tanto, tem-se que o *offset* é a diferença entre o *setpoint* e o valor encontrado na saída. Com a realimentação (*feedback*) é possível calcular esta diferença e corrigir constantemente o *offset*.

### **3.3 Componentes de um sistema de controle de processos**

Conforme visto anteriormente, os sistemas de controle de processos dividem-se em malha aberta e malha fechada e podem ser modelados em diagramas de blocos. Os diagramas apresentados pelas Figuras 5 e 6 ilustram de forma breve os componentes que compõem os sistemas exemplificados. Para tanto, são abordados a seguir, os componentes que compõem o sistema de controle em malha fechada da planta de manufatura de biodiesel a ser utilizada neste trabalho.

#### **3.3.1 Sensores**

Os sensores são os componentes da planta que realizam a realimentação do sistema de controle. Segundo Fraden (2004), Thomazini e Albuquerque (2007) e Pires (2007), um sensor é um dispositivo que recebe um sinal ou estímulo e o converte em um sinal elétrico que seja compatível com circuitos eletrônicos. O sinal de entrada pode ser uma quantidade, uma propriedade ou um estado, a qual o sensor converte em tensão ou corrente, podendo ser amplificada e modificada por circuitos eletrônicos de aquisição.

Salientam os autores que os sensores são indispensáveis em qualquer instalação automática, pois são eles que permitem obter informação sobre o funcionamento dos vários sistemas e da evolução do processo a ser controlado. O processo de medição utiliza sensores acoplados a sistemas de aquisição que convertem o sinal do sensor em um formato tratável por um sistema computacional, o qual por sua vez pode gerar um sinal para os atuadores, visando corrigir o erro do processo.

Transdutores são dispositivos que transmitem sinais de um sistema para outro sob uma forma de energia, como por exemplo elétrica (MORAES; CASTRUCCI, 2001). Segundo Dias apud Coombs (2000), a operação realizada pelo transdutor está ligada a um ou mais fenômenos elétricos, como por exemplo, os fenômenos capacitivo, indutivo, eletromagnético, resistivo, termorresistivo, piezoelétrico e termoelétrico.

Apesar dos termos transdutores e sensores serem usados frequentemente como sinônimos, alguns autores descrevem diferentes significados para estes termos. Segundo Skoog et al. (2002), um sensor consiste em um transdutor acoplado a uma face de reconhecimento quimicamente seletiva (eletrodos de pH, eletrodos de íons seletivos, oxímetros, optrodos, entre outros). Tendo em vista este impasse conceitual, neste trabalho os termos sensor e transdutor serão utilizados como sinônimos.

Citam os demais autores que os sensores são dispositivos que podem conter um ou mais transdutores e cujo sinal de saída pode ser um simples contato, uma chave ou um número binário que o computador possa interpretar. Dentre as categorias de sensores e transdutores, pode-se citar como exemplo os térmicos, óticos, magnéticos e eletromecânicos.

Além disso, conforme complementam Thomazini e Albuquerque (2007), os sensores podem ser divididos em analógicos e digitais. Os sensores digitais mensuram sinais que podem assumir somente dois valores distintos que variam de forma instantânea, os quais podem ser interpretados como zero e um, desligado e ligado. Cita Franchi (2011) que este tipo de sensor é capaz de indicar se uma grandeza física atingiu um valor predeterminado, como um sensor de nível que será apresentado na seção seguinte.

Por sua vez, os sensores analógicos mensuram grandezas físicas que apresentam uma variação de valores ao longo do tempo, como a variação de temperatura, velocidade, pressão, vazão, força, distância, torque e luminosidade. Diferente de um sinal digital, a grandeza analógica não varia instantaneamente de valor. Por mais veloz que um veículo seja, a velocidade indicada no seu velocímetro precisa percorrer uma curva de valores até atingir o valor final, ou seja, não há uma variação instantânea entre dois valores extremos. Todos esses valores percorridos podem ser utilizados na realimentação do processo.

A Figura 7 apresenta um comparativo entre sinal digital e analógico, visando elucidar a explanação.



Figura 7 – Comparativo entre sinais analógico e digital.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em Fraden (2004), Thomazini e Albuquerque (2007), Franchi (2009), Franchi (2011).

Conforme ilustra a Figura 7, o sinal analógico do gráfico representa a variação de temperatura durante o período de um dia. É possível reparar que a variação não é instantânea, ou seja, a temperatura atinge diversos valores durante o tempo de amostragem. Já o sinal digital representa uma chave ou um botão pulsante. Verifica-se, neste sinal, uma variação instantânea entre os valores “0” e “1”, representando respectivamente as condições de desligado e ligado.

A seção a seguir exemplificará a aplicação do conceito de sinal digital na utilização de um sensor de nível.

### 3.3.1.1 Sensor de Nível

As chaves são componentes eletromecânicos utilizados para ligar, desligar ou direcionar a corrente elétrica, por meio de um acionamento mecânico manual ou automático. A chave de duas posições é um componente de circuito simples e fundamental, que possui somente dois estados (ligado e desligado), caracterizando um sinal digital (BOLTON, 2007) e (FRANCHI, 2009).

A chave elétrica pode ser utilizada como sensor digital de nível, ou chave de nível. De acordo com Thomazini e Albuquerque (2007), os sensores de nível baseados nos princípios da flutuação permanecem como dispositivos de escolha para muitas aplicações. As chaves de nível apresentam pequeno tamanho, confiabilidade e alta capacidade de comutação elétrica, podendo ser aplicadas na

detecção de nível mínimo e máximo de um tanque de produto. A Figura 8 apresenta uma chave de nível da fabricante Icos.

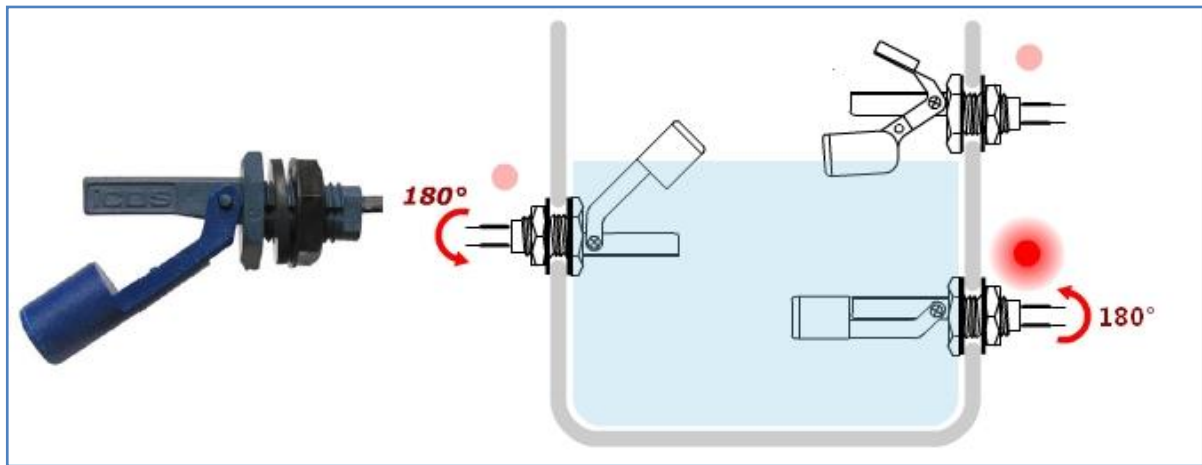


Figura 8 – Exemplo de Sensor de Nível.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em ICOS (2011).

A Figura 8 ilustra um tanque contendo três sensores de nível. O sensor inferior opera como chave normalmente aberta, ou seja, quando há presença de líquido neste ponto, a estrutura flutuante aciona um contato elétrico interno. Este contato elétrico envia um sinal ao controlador, indicando presença de líquido.

Já o sensor intermediário opera de forma invertida, ou chave normalmente fechada. Utilizando este princípio de funcionamento, o sensor inicia a operação enviando um sinal elétrico, pois não há líquido suficiente para elevar a estrutura flutuante. Entretanto, quando o líquido atingir o nível do sensor, a chave magnética será aberta, interrompendo o envio do sinal elétrico ao controlador.

Desta forma, o nível, que é uma grandeza física analógica, pode ser mensurado de forma digital, informando o operador sobre a presença de nível mínimo e máximo de um tanque de líquidos. A partir das informações desses extremos é possível projetar um sistema de controle em malha fechada que previna as situações de transbordamento e falta de líquido no tanque.

### 3.3.1.2 Sensor Indutivo

Os sensores indutivos atuam baseados no princípio da variação da indutância de uma bobina, quando um elemento metálico ou condutivo passa nas suas proximidades. Os sensores indutivos podem ser utilizados para detectar a

proximidade ou presença de um objeto metálico e são encontrados em diversos tamanhos e formatos, atendendo aos mais variados processos (FRANCHI, 2011).

Para elucidar o funcionamento de um sensor indutivo, a estrutura do mesmo é demonstrada na Figura 9.

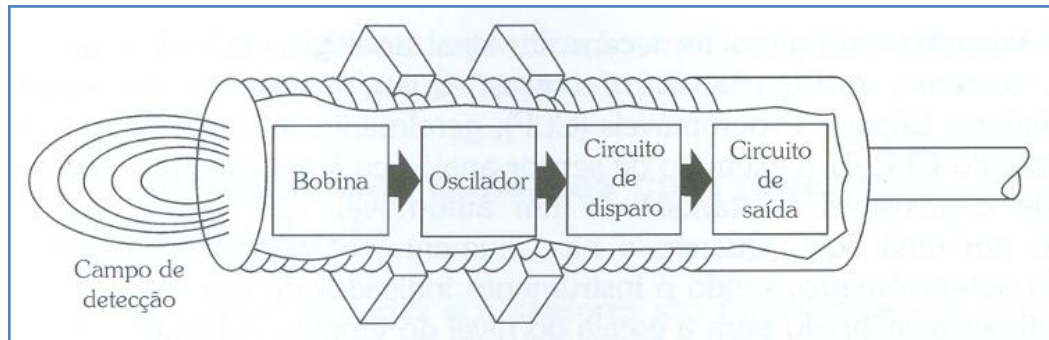


Figura 9 – Exemplo de estrutura de um sensor indutivo.  
Fonte: Franchi (2009, p. 70).

Montada dentro do sensor, em sua face esquerda, está uma bobina que faz parte de um circuito sintonizado de um oscilador. Quando o oscilador está em operação, há um campo magnético alternado, denominado campo do sensor, produzido pela bobina. Esse campo magnético irradia através da face do sensor, a qual não possui partes metálicas. O circuito do oscilador é ajustado de maneira que, quando elementos não metálicos estiverem nas proximidades do mesmo, o circuito continua a oscilar e a saída do dispositivo mantém-se desligada (nível baixo).

Entretanto, no momento em que um objeto metálico aproxima-se da face do sensor, o campo magnético induz a circulação de correntes parasitas no material. Para o oscilador, essas correntes acarretam em perdas de energia, sendo que à medida que o objeto alvo se aproxima, maiores são as correntes parasitas. Com isso, a amplitude de saída do oscilador diminui até um limite pré-determinado, onde a saída do sensor será acionada. (FRANCHI 2011) e (COOMBS, 2000).

A Figura 10 demonstra o comportamento do oscilador, conforme a aproximação de um objeto metálico.

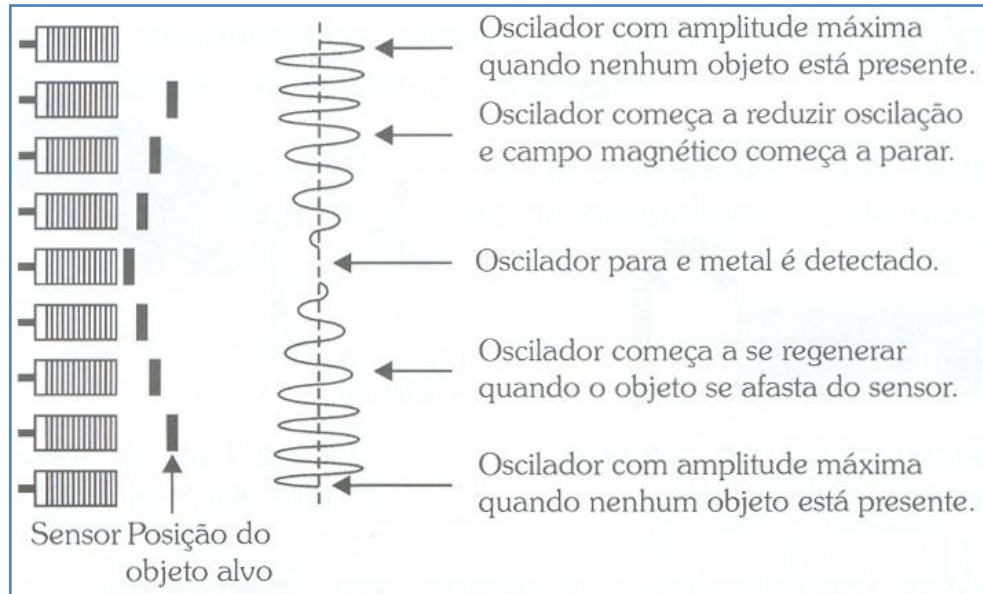


Figura 10 – Comportamento do oscilador em um sensor indutivo.  
 Fonte: Franchi (2009, p. 71).

Complementa ainda Franchi (2011), que a distância de detecção de um sensor indutivo de proximidade é proporcional ao diâmetro da bobina do sensor. Pequenos diâmetros (aproximadamente ¼”) possuem distância sensora da ordem de 1 mm, enquanto sensores com grandes diâmetros (aproximadamente 3”) possuem distância sensora típica de 50mm ou maior. A Figura 11 apresenta alguns modelos de sensor indutivo da fabricante Metaltex.



Figura 11 – Exemplos de Sensor Indutivo.  
 Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em METALTEX (2011).

As medidas de proximidade, posição e deslocamento de objetos são essenciais em muitas aplicações, tais como: posicionamento de válvula, controle de processo, controle de máquina e segurança. (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2007).



### 3.3.1.3 Sensor de Temperatura

Toda e qualquer partícula existente neste universo está em movimento perpétuo. Temperatura, de forma simplória, pode ser descrita como a medida da energia cinética de partículas vibrantes. Moléculas e átomos em um dado volume de material movimentam-se com intensidades diferentes, ou seja, microscopicamente, possuem diferentes temperaturas. A energia cinética média de um grande número de partículas que se movimentam determina a temperatura macroscópica de um objeto.

Quando átomos e moléculas em um material se movimentam, ocorre a interação com outros materiais que estejam em contato. Ademais, todo átomo vibrante age como um radiotransmissor microscópico que emana radiação eletromagnética. Esses dois tipos de atividade formam a base para a transferência de calor do objeto mais quente para os objetos mais frios.

Um dispositivo especial chamado termômetro, o qual esteja em contato direto com o objeto ou receba sua radiação eletromagnética, produz uma reação física, ou sinal. Este sinal torna-se a temperatura mensurada do objeto. (FRADEN, 2004).

Segundo Dally (1993), os instrumentos de medição de temperatura podem ser subdivididos em dois grandes grupos: transdutores por contato e transdutores sem contato com o mensurando. Quando o processo envolve temperaturas não muito altas, costuma-se utilizar instrumentos de medição por contato.

Geralmente, para temperaturas muito elevadas, utiliza-se transdutores sem contato, o que permite a medição da temperatura de uma superfície sem que o elemento transdutor entre em contato com o corpo, eliminando problemas de estabilidade, e encapsulamento que os transdutores por contato enfrentam à altas temperaturas.

Conforme Michalski (1991) e Thomazini e Albuquerque (2007), as termorresistências são sensores que baseiam-se no princípio de variação crescente da resistência em função do aumento da temperatura. Esses sensores conquistaram espaço nos processos industriais por apresentarem condições de alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, alta repetibilidade, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso.

Os materiais mais utilizados para a fabricação destes tipos de sensores são a platina, o cobre ou o níquel, que são metais que apresentam características de alta

resistividade, permitindo assim uma melhor sensibilidade do sensor, alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura e grande rigidez e ductilidade para ser transformado em fios finos. A termorresistência mais utilizada nas aplicações industriais é a de platina, conhecida como Pt-100.

### 3.3.1.3.1 Termorresistência de platina (Pt-100)

As termorresistências de platina (Pt-100) possuem grande estabilidade e precisão, tendo como característica principal a resistência de  $100\Omega$  a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Além disso, sua curva apresenta um comportamento mais linear, se comparada às termorresistências de níquel e cobre, como ilustra a Figura 12.

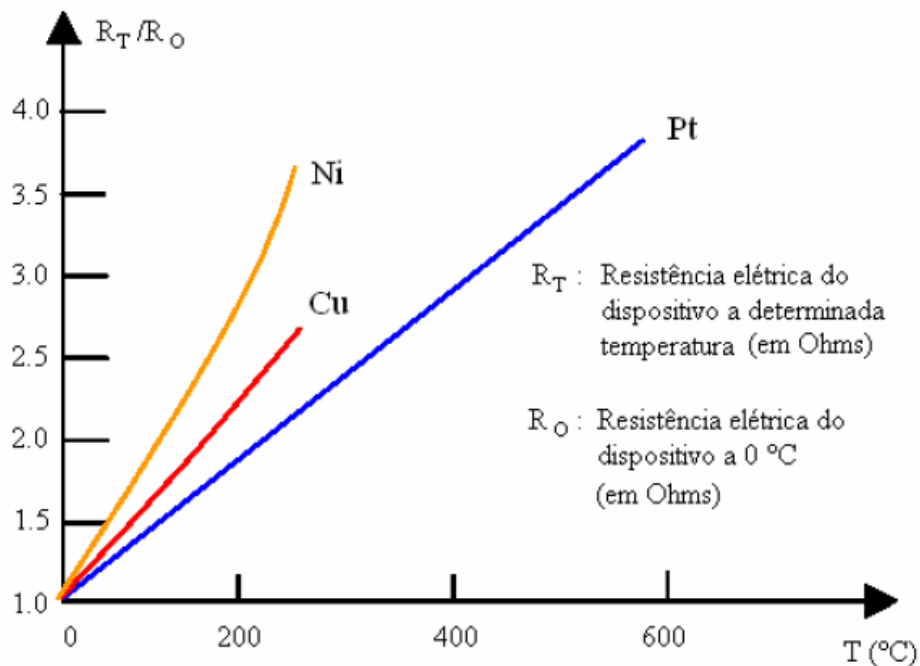


Figura 12 – Curvas de termorresistências de níquel, cobre e platina.  
 Fonte: Michalski et al. (1991) apud Dantas (2006).

As termorresistências de níquel (Ni) e cobre (Cu) têm sua isolação normalmente em esmalte, seda, algodão ou fibra de vidro. Não há a necessidade de proteções mais resistentes a temperatura, pois acima de  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , o níquel perde suas propriedades características de funcionamento como termorresistência e o cobre apresenta problemas de oxidação em temperaturas acima de  $310\text{ }^\circ\text{C}$ .

Já os sensores de platina permitem um funcionamento até temperaturas mais elevadas e, portanto, têm seu encapsulamento normalmente em cerâmica ou vidro, pois, apesar da platina não restringir o limite de temperatura de utilização, quando a

mesma é utilizada em temperaturas elevadas, existe o risco de contaminação dos fios. (MICHALSKI et al., 1991) e (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2007).

Segundo Franchi (2011), os sinais analógicos que representam as grandezas físicas mensuradas, como a temperatura, necessitam de um circuito eletrônico capaz de converter o sinal do processo em um sinal digitalizado que o controlador possa compreender, a fim de efetuar suas operações. Os padrões mais comuns de sinais elétricos analógicos são:

- Sinal em Tensão 0V a 10V;
- Sinal em Corrente 4mA a 20mA.

Para tanto, as termorresistências de platina possuem circuitos eletrônicos que convertem a temperatura em sinal de tensão ou corrente. Esses circuitos são anexados na estrutura do encapsulamento do sensor, como mostra a Figura 13.



Figura 13 – Pt-100 e Conversor 4-20mA.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em [http://www.ld-gmbh.com/display.aspx?page=components&component\\_code=04.02.06.003](http://www.ld-gmbh.com/display.aspx?page=components&component_code=04.02.06.003) e NOVUS (2011).

A Figura 13 apresenta um exemplo de Pt-100 encapsulado com um conversor que envia a informação de temperatura ao controlador em formato de corrente (4-20mA). Este sinal pode ser utilizado pelo controlador, o equipamento que irá controlar o sistema, recebendo informações dos sensores e enviando sinais aos atuadores da planta. A seção a seguir apresenta o Controlador Lógico Programável.

### 3.3.2 Controlador Lógico Programável (CLP)

No campo industrial, é necessário controlar os processos de forma rápida, segura e precisa, o que muitas vezes é humanamente impossível.

Segundo Dorf e Bishop (2008), o controle de um processo industrial por controladores automáticos é chamado de automação e é comum em indústrias de diversos ramos como químico, automobilístico e metal. Citam Moraes e Castrucci (2001) que a palavra *automation* é uma invenção do marketing da indústria de equipamentos da década de 1960. Hoje, entende-se por automação qualquer sistema apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano e que vise a soluções rápidas e econômicas para atingir os complexos objetivos das indústrias e dos serviços.

Salientam os autores que a automação na indústria decorre de necessidades como: maiores níveis de qualidade de conformação e de flexibilidade, menores custos de trabalho, menores perdas materiais e menores custos de capital; maior controle das informações relativas ao processo, melhor planejamento e controle da produção.

Nesse contexto, são de extraordinária importância os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), os quais tornaram a automação industrial propriamente dita, uma realidade onipresente.

Um CLP é um computador especial microprocessado que possui funções de controle dos mais variados tipos e níveis de complexidade. Seu propósito é monitorar parâmetros cruciais do processo e ajustar as operações do processo de acordo com estas informações. O CLP pode ser programado e controlado, além de permitir sua operação por pessoas sem conhecimento de computação.

(WEBB, REIS, 2003, p. 4)

Bolton (2007) e Bega e colaboradores (2006) caracterizam o CLP como um equipamento de controle industrial microprocessado, criado inicialmente para efetuar especificamente o controle lógico de variáveis discretas (sinais digitais), sendo atualmente aplicado em praticamente todos os tipos de controle. A Figura 14 apresenta um diagrama com os principais componentes de um CLP típico.

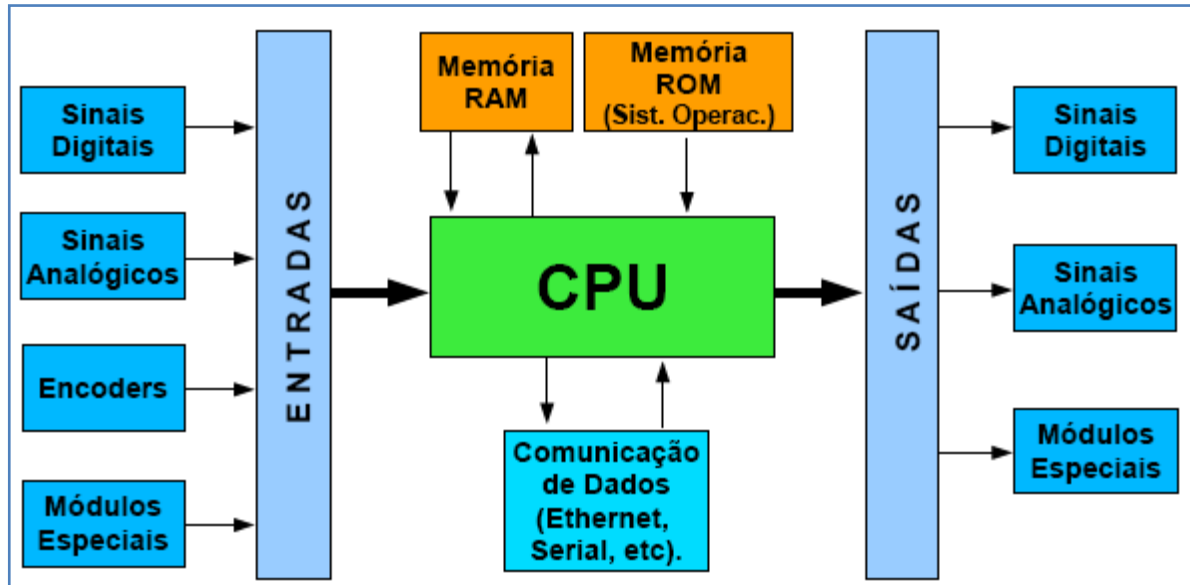


Figura 14 – Diagrama dos principais componentes de um CLP típico.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas nas obras Webb e Reis (2003), Bega et al. (2006), Bolton (2007) e Franchi (2011).

Moraes e Castrucci (2001) complementam a Figura 14 salientando que o CLP é um dispositivo digital que controla máquinas e processos. Utiliza uma memória programável para armazenar instruções e executar funções específicas como controle de energização/desenergização, temporização, contagem, sequenciamento, operações matemáticas e manipulação de dados.

Citam Franchi (2009) e Webb e Reis (2003), que uma das grandes vantagens na utilização do CLP deve-se ao fato do mesmo possuir características de programação que o tornam mais eficiente que outros equipamentos industriais. Além disso, o CLP proporciona as seguintes vantagens:

- Facilidade e flexibilidade para programar e alterar os programas;
- O programa desenvolvido pode ser armazenado em memória para replicação em outros sistemas ou para cópia de segurança (*backup*);
- Velocidade de operação da ordem de milissegundos;
- Sinalizadores visuais no CLP informam ao operador as possíveis falhas, ou defeitos no sistema;
- Dimensões físicas reduzidas proporcionam facilidade na hora da montagem e ocupam pouco espaço nos quadros de comando;
- Capacidade de expansibilidade de número de entradas e saídas digitais e analógicas, visando contemplar desde os processos mais simples aos mais complexos;

- Estrutura desenvolvida para suportar ambientes severos, que apresentem altas temperaturas, ruídos elétricos, poluição atmosférica, dentre outros.

Basicamente, os CLPs podem ser divididos em compactos e modulares. Os CLPs compactos possuem incorporados em uma única unidade a fonte de alimentação, a CPU (*Central Processing Unit*) e um determinado número de entradas e saídas digitais e analógicas. Além disso, os CLPs compactos apresentam capacidade de expansibilidade, ou seja, é possível incrementar o número de entradas e saídas digitais e analógicas, utilizando módulos de expansão.

Alguns modelos compactos disponibilizam ainda uma IHM (Interface Homem Máquina), a qual permite que o operador possa visualizar dados do processo, bem como atuar no sistema através de botões. Em determinados modelos, a IHM permite ainda a elaboração do programa do CLP, sem a necessidade de utilização de software ou cabo para conexão com um computador (FRANCHI, 2009). A Figura 15 apresenta o modelo de CLP LOGO 24C OBA6 juntamente com as expansões AM2 RTD e DM8 24.



Figura 15 – CLP e expansões utilizadas no trabalho.

Diferente dos CLPs compactos, os CLPs modulares são compostos por uma estrutura modular, em que cada módulo executa uma determinada função. Para tanto, tem-se que um CLP modular pode apresentar diferentes estruturas de montagem, como demonstra o exemplo da Figura 16.

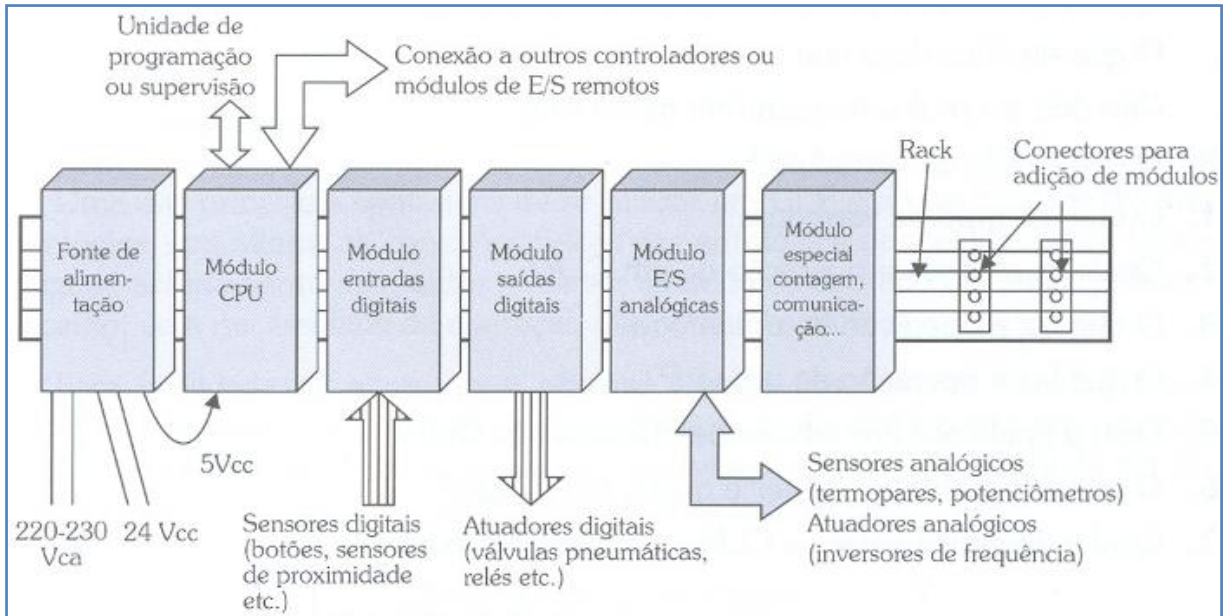


Figura 16 – Exemplo de estrutura de um CLP modular.  
Fonte: (FRANCHI, 2009 pg 43).

Os CLPs modulares podem suportar milhares de pontos de entradas e saídas digitais e analógicas, de acordo com sua capacidade de operação.

Nota-se, a partir da análise dos autores citados, que o CLP possui uma interface para comunicação com sinais digitais (discretos) e analógicos (contínuos). Isto permite ao CLP identificar os sinais provenientes dos sensores e, baseado no seu programa interno, enviar sinais de controle aos atuadores da planta. Com isso, conclui-se que o CLP é uma solução que pode ser adotada como elemento controlador para a automação do processo de manufatura de biodiesel proposta neste trabalho.

### 3.3.2.1 Linguagens de Programação (IEC 61131-3)

Conforme Franchi (2011), programar significa fornecer uma série de instruções a um sistema com capacidade computacional, de maneira que este seja capaz de comportar-se deterministicamente, executando de forma automática as decisões de controle em função do estado atual, das entradas e das saídas do sistema em um dado instante de tempo. Para tanto, a linguagem de programação compreende um conjunto padronizado de instruções que o sistema computacional é capaz de reconhecer.

Segundo John e Tiegelkamp (2001), para padronizar uma variedade de conceitos modernos e linguagens para beneficiar os programadores, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) desenvolveu um padrão para uso em controladores industriais. Embasada na experiência com as linguagens de programação existentes, a IEC definiu 5 linguagens, juntamente com um conceito de dados utilizando modernos métodos de desenvolvimento de software.

Surge assim, no início da década de 1990, a norma IEC 1131, a qual seria revisada anos seguintes, recebendo a nomenclatura de IEC 61131. Citam os autores que o padrão IEC 61131 representa uma combinação e continuação de diferentes padronizações, incluindo regras sobre o código a ser empregado, a definição da nomenclatura a ser utilizada e a estrutura das representações gráficas. A norma IEC 61131 é a primeira padronização que recebeu a aceitação internacional e industrial necessária, sendo um marco histórico na área de programação de CLPs.

A norma IEC 61131 é dividida em 8 partes, sendo que a terceira parte (IEC 61131-3) aborda as cinco linguagens de programação definidas sintática e sistematicamente:

- Diagrama de Blocos de Funções (FBD – *Function Block Diagram*);
- Linguagem *Ladder* (LD – *Ladder Diagram*);
- Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC – *Sequential Function Chart*);
- Lista de Instruções (IL – *Instruction List*);
- Texto Estruturado (ST – *Structured Text*).

É importante salientar que a norma visa atender os mais diversos segmentos da indústria e uniformizar as várias metodologias de programação dos controladores lógicos programáveis industriais. Para este trabalho, adotou-se a linguagem de programação *Ladder*, a qual é abordada na seção seguinte.

#### **3.3.2.1.1 Linguagem *Ladder***

A linguagem *Ladder* é um método frequentemente utilizado na programação de CLPs. Esta linguagem baseia-se na representação gráfica de circuitos elétricos, utilizando duas linhas verticais paralelas representando os barramentos de energização. Estes barramentos são conectados por linhas horizontais que



representam as operações a serem realizadas no controle do processo (BOLTON, 2007).

Citam Franchi (2011) e Webb e Reis (2003), que a linguagem *Ladder* é uma linguagem gráfica que baseia-se na lógica de relés e contatos elétricos para a realização de circuitos de comandos de acionamentos. Considerando que na época do seu desenvolvimento os técnicos e engenheiros eletricitistas eram, geralmente, os encarregados da manutenção no chão de fábrica, a linguagem *Ladder* deveria ser familiar para esses profissionais.

Por ser a primeira linguagem de programação utilizada pelos fabricantes, é a mais difundida, podendo ser encontrada em quase todos os CLPs da atual geração. A Figura 17 apresenta um exemplo de código escrito em linguagem *Ladder*.

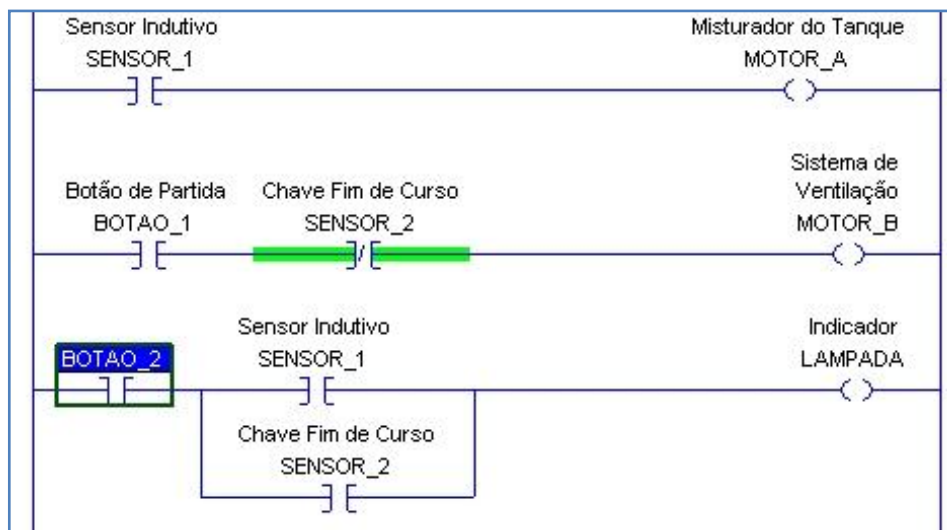


Figura 17 – Exemplo de código em linguagem *Ladder*.

A partir da Figura 17, é possível perceber que o diagrama de contatos da linguagem *Ladder* assemelha-se a uma escada, que é propriamente a tradução literária da palavra *ladder* em inglês. As linhas horizontais do código possuem contatos (botões e sensores) que representam as entradas digitais do sistema e alinham-se à esquerda. Na extremidade direita das linhas horizontais, há bobinas (motores e lâmpada) que representam as saídas digitais do sistema.

Conforme explicam Franchi (2011), Webb e Reis (2003) e John e Tiegelkamp (2001), a principal função de um programa em linguagem *Ladder* consiste em controlar o acionamento de saídas, dependendo da combinação lógica dos contatos de entrada. Isto quer dizer que, para acionar uma bobina que representa uma saída

digital do CLP, é necessário analisar a combinação das entradas que precedem esta bobina na linha de comando.

A linguagem *Ladder* apresenta, segundo os autores, uma série de vantagens, dentre as quais podem ser citadas:

- Possibilidade de uma rápida adaptação para a equipe técnica, tendo em vista que a linguagem assemelha-se aos diagramas elétricos convencionais;
- Fácil visualização dos estados das variáveis sobre o diagrama *Ladder*;
- Documentação fácil e clara;
- Símbolos padronizados e mundialmente aceitos pelos fabricantes e usuários;
- Técnica de programação mais difundida e aceita industrialmente.

Tendo em vista os fatos mencionados, verifica-se que a linguagem de programação *Ladder* atende aos requisitos do sistema a ser implementado neste trabalho.

### **3.3.3 Atuador**

O atuador, também chamado de elemento final de controle, é, segundo Moraes e Castrucci (2001), o elemento de campo utilizado para executar as instruções do CLP. Há muitos tipos de atuadores, tais como hidráulicos, pneumáticos e elétricos, cada um com suas peculiaridades e aplicações específicas. Complementa Fraden (2004), que o atuador é o componente responsável por converter um sinal elétrico em outra forma de energia, sendo o oposto de um sensor.

Citam Bega et al. (2006), como exemplo de atuador, as válvulas de controle, as quais desempenham um papel importante no controle automático de processos industriais que dependem da correta distribuição e controle de líquidos, gases e vapores. As válvulas são responsáveis por executar tarefas de transferência de fluidos para tanques de armazenamento, controle de transferência de calor, manipulação de pressão, dentre outras.

Além das válvulas, são exemplos de atuadores as bombas hidráulicas que movimentam fluidos através das tubulações de uma planta e os motores elétricos

que realizam processos como mistura de produtos. Todos esses atuadores estão presentes na planta de manufatura de biodiesel a ser estudada neste trabalho e podem ser controlados por um CLP, através do sinal de sensores que informam o estado do processo.

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho originou-se de uma pesquisa exploratória e de uma pesquisa experimental. Para atingir os objetivos específicos deste trabalho, o presente projeto foi dividido em três etapas principais.

A primeira etapa compreendeu a análise das soluções existentes no mercado, bem como do cenário atual dos biocombustíveis a nível nacional e internacional, visando definir os requisitos necessários para o pleno desenvolvimento de uma ferramenta que atenda às necessidades dos produtores rurais. Esta etapa foi desenvolvida durante a elaboração do projeto de pesquisa e constitui a revisão da literatura apresentada nesta dissertação.

Na segunda etapa, foi desenvolvida a automação da planta de biocombustíveis, com base nas especificações previamente averiguadas. Esta etapa compreende a realização de orçamento e aquisição dos componentes definidos na etapa de projeto, instalação elétrica na planta, desenvolvimento do programa de controle da planta e realização de testes de produção. Na etapa seguinte, foram analisados os biocombustíveis produzidos pela solução proposta neste trabalho, verificando a necessidade de ajustes e adequação com as normas vigentes. Com isso, foi possível validar a metodologia proposta.

A Figura 18 apresenta o fluxograma deste projeto de pesquisa, seguido da descrição das etapas que o compõem.

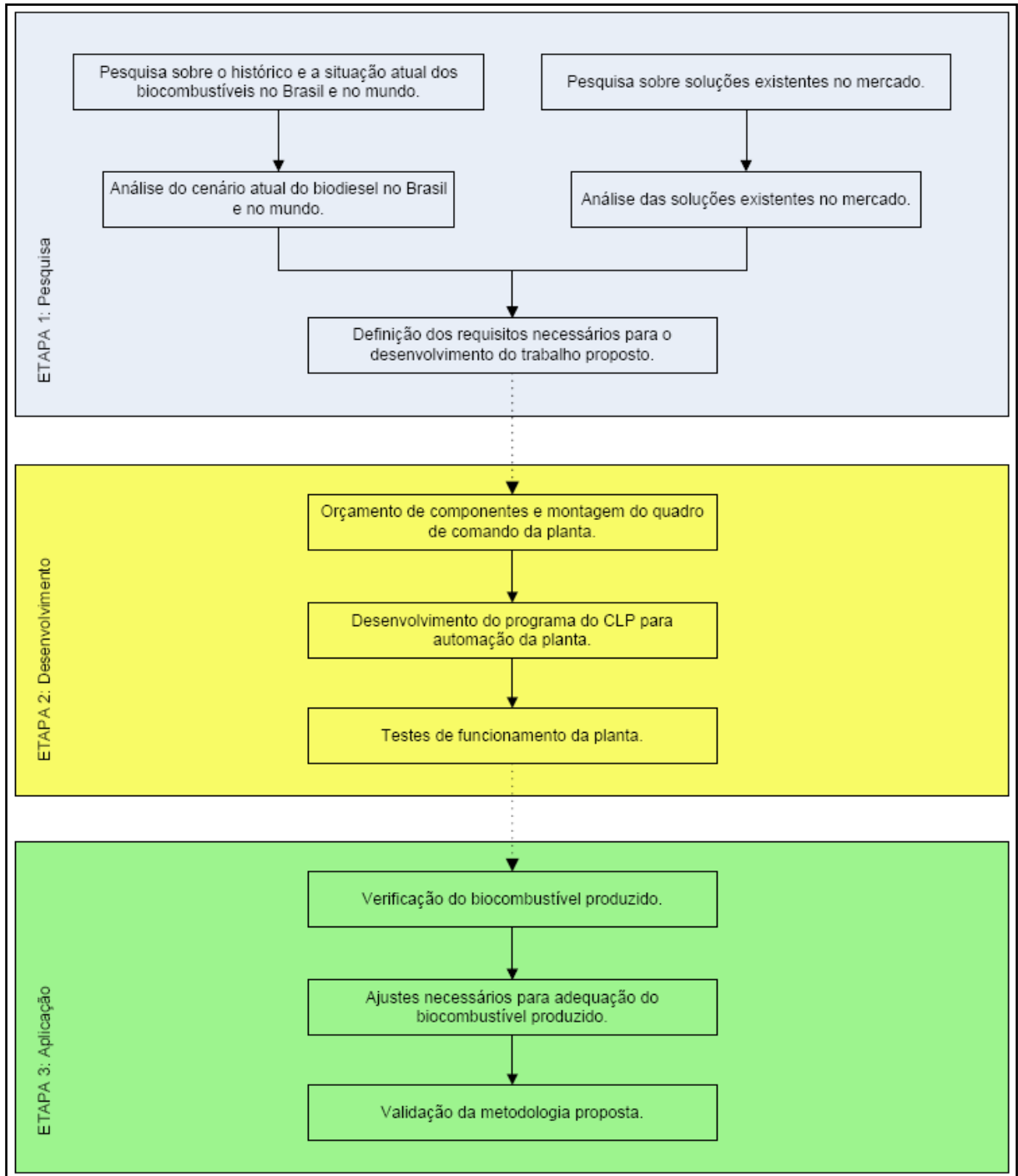


Figura 18 – Fluxograma das etapas que compõem este trabalho.

A seguir, são descritas as etapas de desenvolvimento e aplicação de forma detalhada, visando elucidar a proposta apresentada neste trabalho.

## **4.1 Desenvolvimento da planta de produção de biodiesel**

A planta de manufatura de biodiesel elaborada por Karcher (2009) e automatizada neste estudo, foi fabricada pela empresa SUR Engenharia e Máquinas de Santa Cruz do Sul/RS. O projeto de automação da planta foi desenvolvido junto ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais - Mestrado (PPGSPI) com o auxílio da empresa Startup Automação Industrial LTDA de Lajeado/RS.

Após a construção da planta de produção de biodiesel, esta foi instalada nas dependências da Incubadora Tecnológica da UNISC (ITU-UNISC), situada na cidade de Santa Cruz do Sul/RS. O Anexo A apresenta um diagrama contendo o projeto original dos equipamentos que compõem a planta. Importante salientar que a numeração adotada no croqui do Anexo A, será mantida nas demais figuras, visando identificar os componentes da mesma forma. Na sequência, são descritos os equipamentos desenvolvidos e alocados na estrutura da planta.

### **4.1.1 Reator**

O reator é o equipamento que realiza a mistura do óleo vegetal com a solução de álcool (etanol ou metanol) e catalisador. Está identificado no Anexo A como o equipamento de número 2. A Figura 19 apresenta o projeto original do reator, contendo suas dimensões.

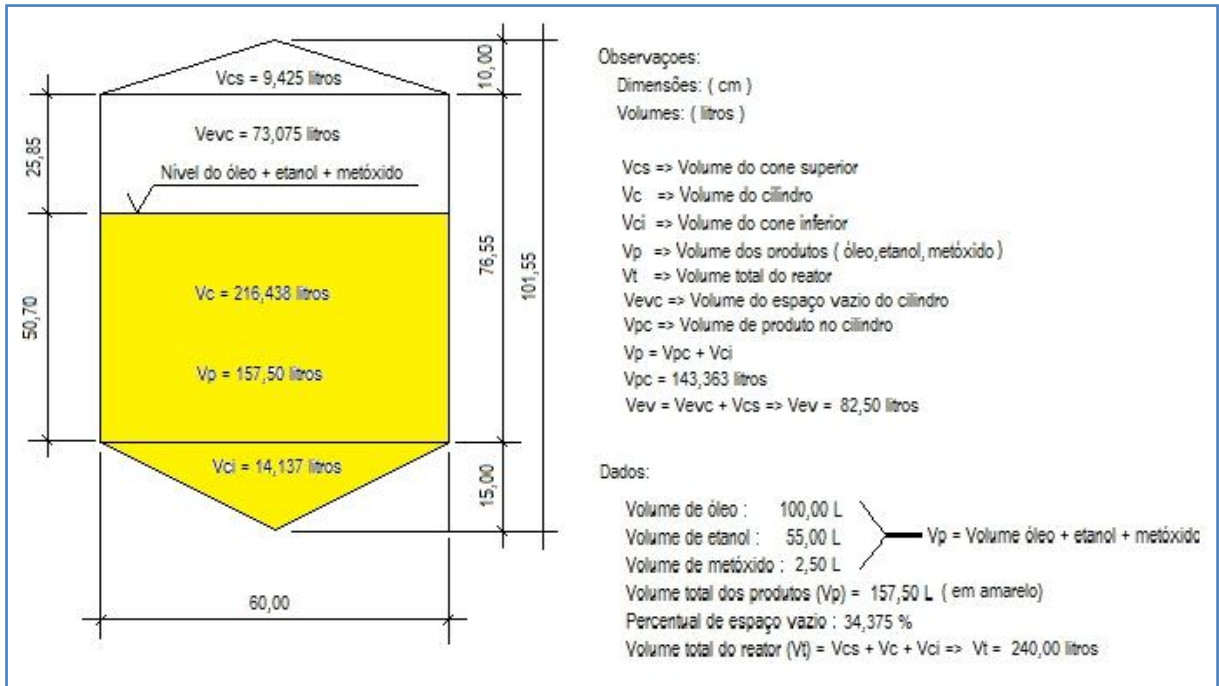


Figura 19 – Projeto do reator.  
 Fonte: Figura fornecida pela Sur Engenharia.

A Figura 20 apresenta uma imagem que ilustra o estado atual do reator. Nesta figura é possível reparar que o reator, identificado pelo número 2, está conectado ao reservatório para armazenamento de metóxido, identificado pelo número 5. Este reservatório possui uma válvula que, ao ser acionada, permite a transferência da mistura de catalisador e álcool para o reator.



Figura 20 – Imagem do reator e do reservatório de metóxido.

#### 4.1.2 Evaporador

O evaporador é o equipamento que realiza a evaporação do álcool presente na mistura proveniente do reator. Está identificado no Anexo A como o equipamento de número 3. A Figura 21 apresenta o projeto original do evaporador, contendo suas dimensões.



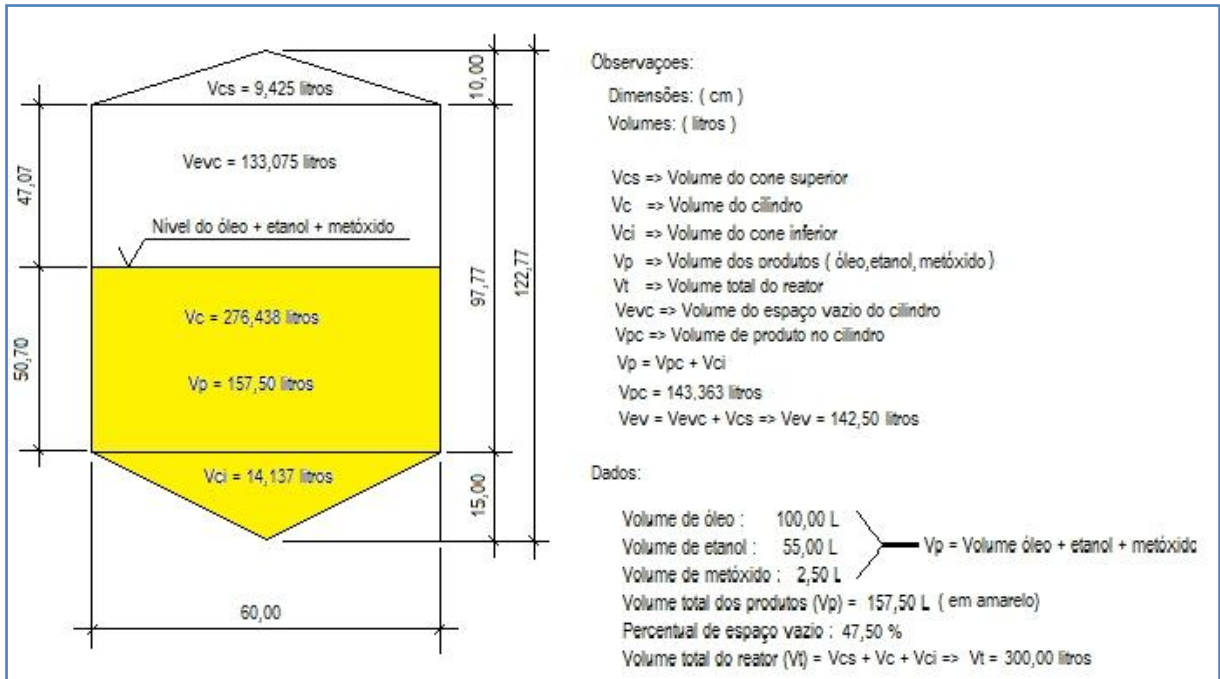


Figura 21 – Projeto do evaporador.  
 Fonte: Figura fornecida pela Sur Engenharia.

A Figura 22 apresenta uma imagem que ilustra o estado atual do evaporador. Nesta figura é possível reparar que o evaporador possui um condensador conectado na sua superfície superior. Este condensador é o responsável por capturar o vapor de álcool, visando sua recuperação.



Figura 22 – Imagem do evaporador.

### 4.1.3 Decantador

O decantador é o equipamento que realiza a separação de fases do produto proveniente do evaporador. Está identificado no Anexo A como o equipamento de número 4. A Figura 23 apresenta o projeto original do condensador, contendo suas dimensões.

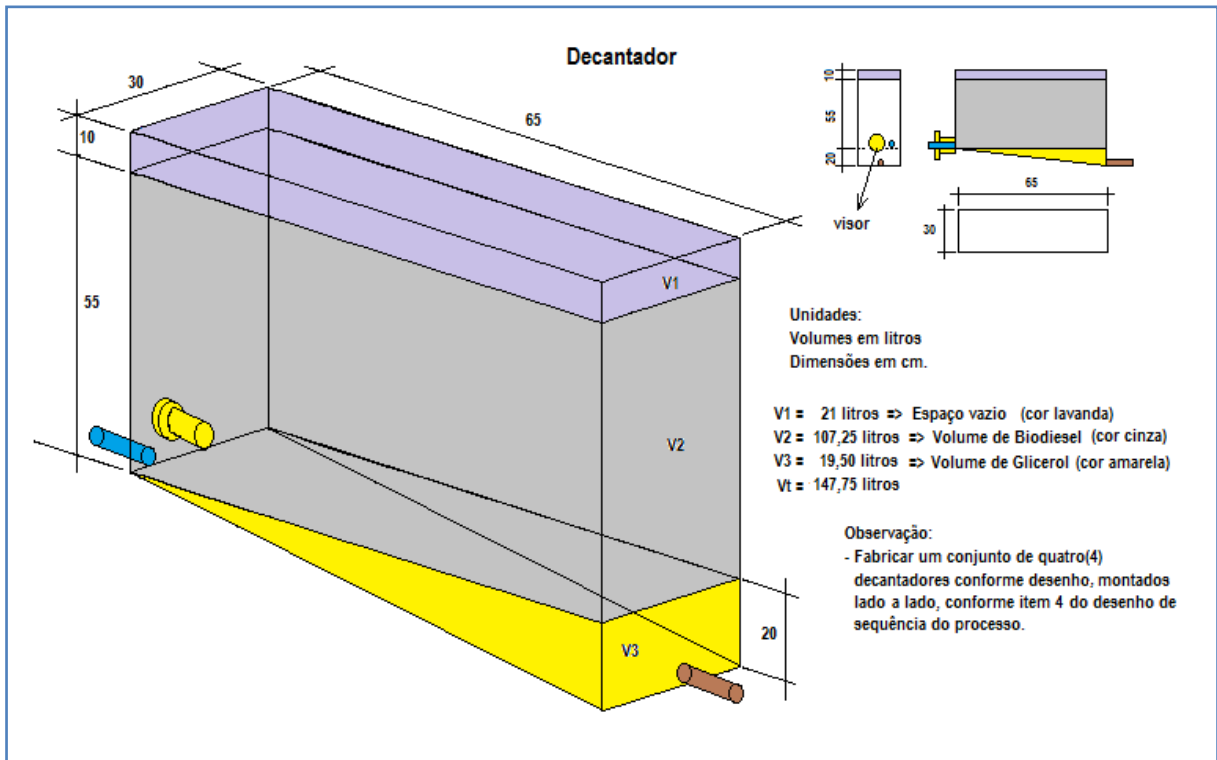


Figura 23 – Projeto do decantador.  
 Fonte: Figura fornecida pela Sur Engenharia.

Observa-se, na Figura 23, que o projeto contempla somente um decantador, porém a planta possui um conjunto de quatro decantadores, os quais são utilizados conforme o andamento da produção. A Figura 24 apresenta o conjunto de decantadores em seu estado atual.

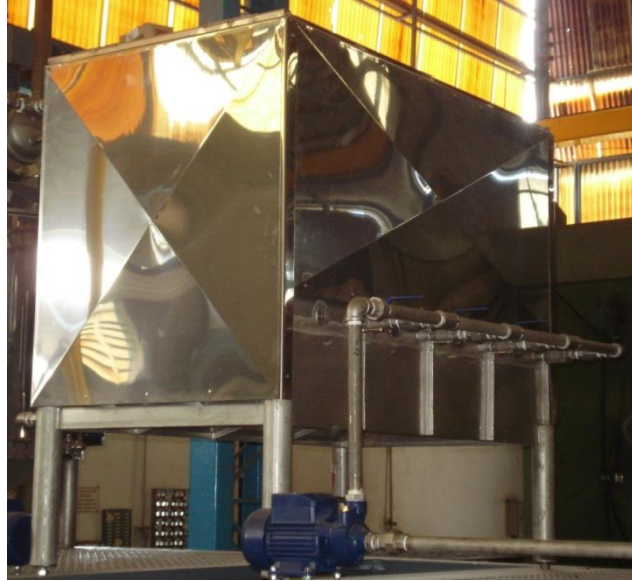


Figura 24 – Imagem do conjunto de decantadores.

#### **4.1.4 Reservatório de lavagem**

O reservatório de lavagem é o equipamento que realiza a lavagem da mistura proveniente do decantador. Está identificado no Anexo A como o equipamento de número 7. A Figura 25 apresenta o projeto original do reservatório de lavagem, contendo suas dimensões.

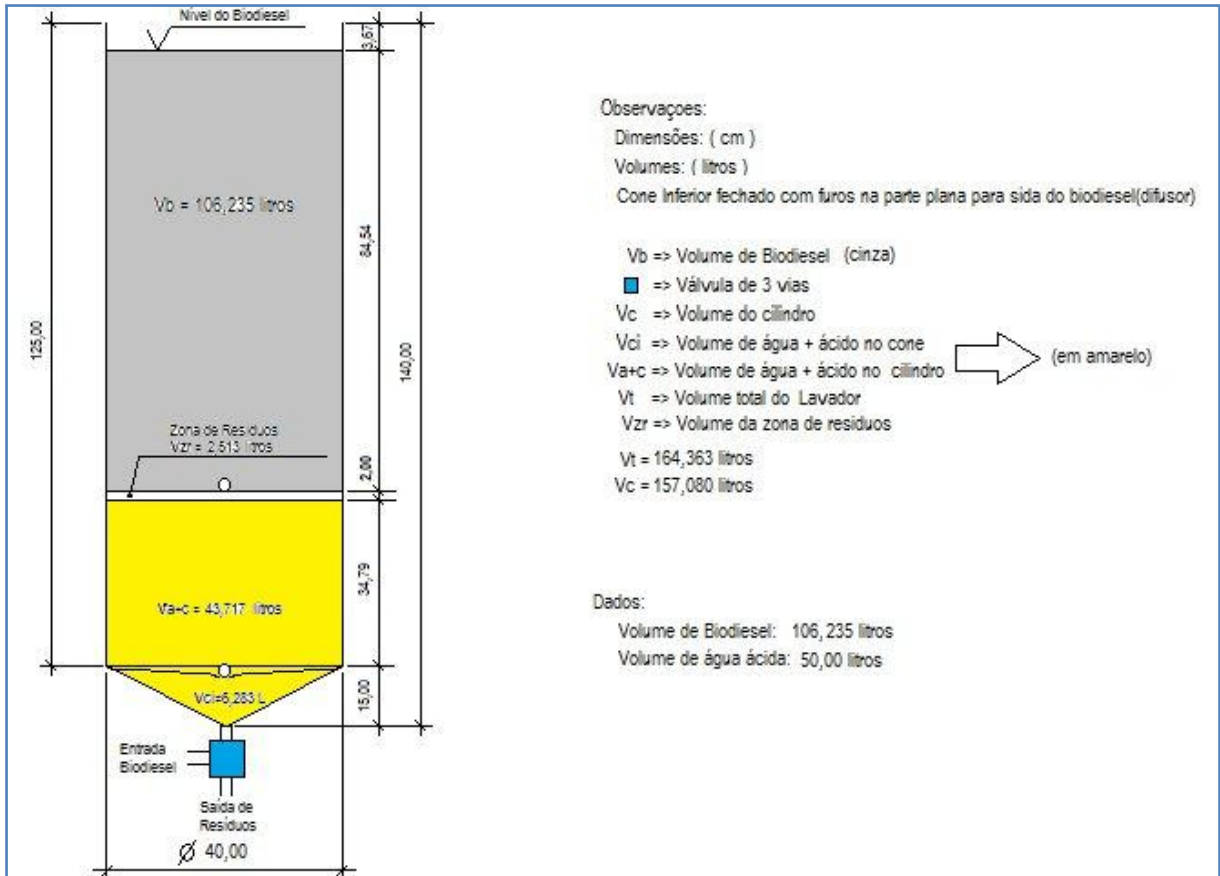


Figura 25 – Projeto do reservatório de lavagem.  
 Fonte: Figura fornecida pela Sur Engenharia.

A partir da Figura 25, verifica-se que o biodiesel proveniente do conjunto de decantadores é inserido na parte inferior do reservatório de lavagem. Após o processo de lavagem, o biodiesel irá constituir a fase superior do reservatório de lavagem.

A Figura 26 apresenta uma imagem que ilustra o estado atual do reservatório de lavagem. Nesta figura é possível reparar que o mesmo possui um reservatório de água acidificada (mistura de água e ácido clorídrico) conectado em sua superfície, o qual está identificado no Anexo A como o equipamento de número 17.



Figura 26 – Imagem do reservatório de lavagem.

#### 4.1.5 Reator de sílica

O reator de sílica é o equipamento que realiza a secagem da mistura proveniente do reservatório de lavagem, visando reduzir a umidade do biodiesel. Está identificado no Anexo A como o equipamento de número 9. A Figura 27 apresenta uma imagem do reator de sílica em seu estado atual.



Figura 27 – Imagem do tanque de purificação do biodiesel por adsorção.

#### 4.1.6 Reservatório pulmão

O reservatório pulmão é o equipamento que armazena o biodiesel proveniente do reator de sílica, sendo o último componente desenvolvido até o presente momento. Está identificado no Anexo A como o equipamento de número 13. A Figura 28 apresenta uma imagem do reservatório pulmão em seu estado atual.



Figura 28 – Imagem do reservatório pulmão.

## 4.2 Acionamentos da planta de biodiesel

A Figura 29 a seguir apresenta uma vista da planta de produção de biodiesel, com identificação de seus componentes. Nesta imagem é possível identificar o reservatório de metóxido (5) onde é armazenado o catalisador e o álcool para a reação de transesterificação; o reator (2) onde é realizada a reação de transesterificação; o evaporador (3) utilizado para remoção do álcool da mistura; o conjunto de quatro decantadores (4) que realizam a separação de fases da mistura; o reservatório de lavagem (7) conectado ao reservatório de água acidificada (17); o reservatório de sílica (9) que remove a umidade do biodiesel. Devido ao ângulo da foto, o tanque pulmão não está nítido.



Figura 29 – Vista da planta de manufatura de biodiesel.

O Anexo B apresenta uma tabela que relaciona os componentes que constituem a planta, bem como seus respectivos acionamentos elétricos e manuais, os quais são abordados nas seções seguintes.

#### 4.2.1 Válvulas manuais

Conforme consta no Anexo B, a planta utiliza um total de 27 válvulas de esfera tripartida de aço inox para tubulação de  $\frac{3}{4}$ " , de acionamento manual. A Figura 30 apresenta o conjunto de decantadores, onde é possível identificar o modelo das válvulas utilizadas neste trabalho.



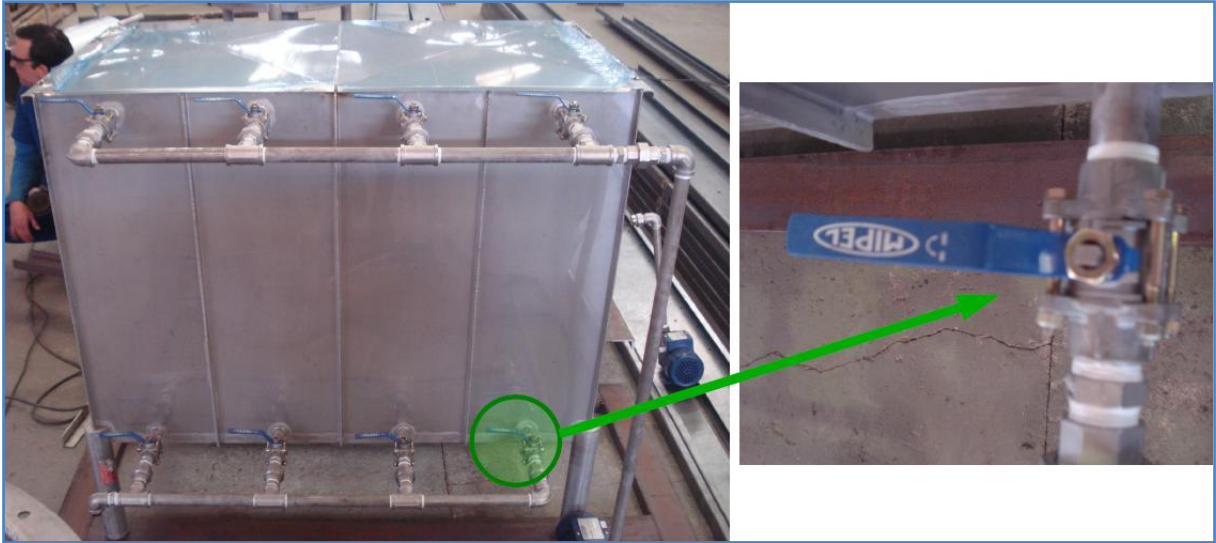


Figura 30 – Válvulas utilizadas na planta de biodiesel.

As válvulas são identificadas no diagrama da planta (Anexo A) e nas etiquetas anexadas às mesmas pela letra Y seguida de um numeral, como por exemplo, Y3. Tendo em vista a inviabilidade de supervisionar todas as válvulas em virtude das limitações de memória do CLP utilizado e do espaço físico do quadro de comando, definiu-se um conjunto de seis válvulas cruciais ao controle do fluxo de produto, sendo elas: Y3, Y4, Y18, Y19, Y21 e Y23.

Estas válvulas possuem um sensor indutivo capaz de informar ao CLP o estado atual (aberta/fechada) das mesmas, possibilitando assim indicar ao operador o momento exato de abertura e fechamento de cada válvula, de acordo com a etapa do processo que está sendo executada, garantindo assim o pleno funcionamento da planta.

#### 4.2.2 Bombas centrífugas

Ainda conforme a relação de componentes apresentada no Anexo B, a planta utiliza um total de cinco bombas centrífugas ELETROPLAS modelo ICS-50B, com potência de 0,45 HP, alimentadas em sistema monofásico, com frequência de 60 Hz e vazão de 2,1 m<sup>3</sup>/h. Estas bombas estão interligadas a saídas digitais do CLP, permitindo seu controle de forma manual e automática. A Figura 31 apresenta uma das bombas utilizadas na planta.



Figura 31 – Bomba centrífuga utilizada na planta.

As bombas centrífugas são identificadas no diagrama da planta (Anexo A) e nas etiquetas anexadas às mesmas pela letra M seguida de um numeral, como por exemplo, M4. Seguindo a sequência do processo apresentada no fluxograma de produção do Manual de Operação da Planta (Anexo D), a bomba centrífuga M0 é responsável por transferir o óleo vegetal proveniente de um reservatório para o reator. Este processo de transferência pode ser realizado de forma manual e automática.

A seguir, a bomba centrífuga M2 é utilizada para transferir a mistura resultante da reação de transesterificação do reator para o evaporador, para que seja realizada a evaporação e recuperação do álcool da reação. Na sequência, a bomba centrífuga M4 transfere a mistura resultante do processo de evaporação para um dos quatro decantadores, de acordo com a combinação de válvulas de entrada do conjunto de decantadores.

Na saída do conjunto de decantadores está instalada a bomba centrífuga M5, a qual transfere a fase superior (biodiesel) resultante do processo de decantação para o tanque de lavagem e, conseqüentemente, para o reator de sílica. Por fim, a bomba centrífuga M7 realiza a recirculação do biodiesel dentro do reator de sílica para que seja efetuada a etapa de secagem. Após esta etapa, o operador abre a válvula Y23 para permitir que a mesma bomba transfira o biodiesel para o reservatório pulmão, finalizando a batelada.

### 4.2.3 Motoredutores

O Anexo B lista três motoredutores da marca SEW-EURODRIVE, com potência de 0,75 kW, frequência de 60 Hz e alimentação de 220 V. Sua velocidade de entrada é de 3340 rpm, reduzindo para uma velocidade de giro de 474 rpm ou 469 rpm. Estes motores são utilizados nos processos que envolvem agitação de misturas, sendo previamente dimensionados com velocidades calculadas por Kaercher (2009) em seu trabalho.

Os motoredutores, identificados na planta e no Anexo A da mesma forma que as bombas centrífugas, estão interligados às saídas digitais do CLP, podendo ser acionados de forma manual ou automática sem a necessidade de inversor de frequência, pois suas velocidades são constantes. A Figura 32 apresenta um dos motoredutores e sua placa de identificação.

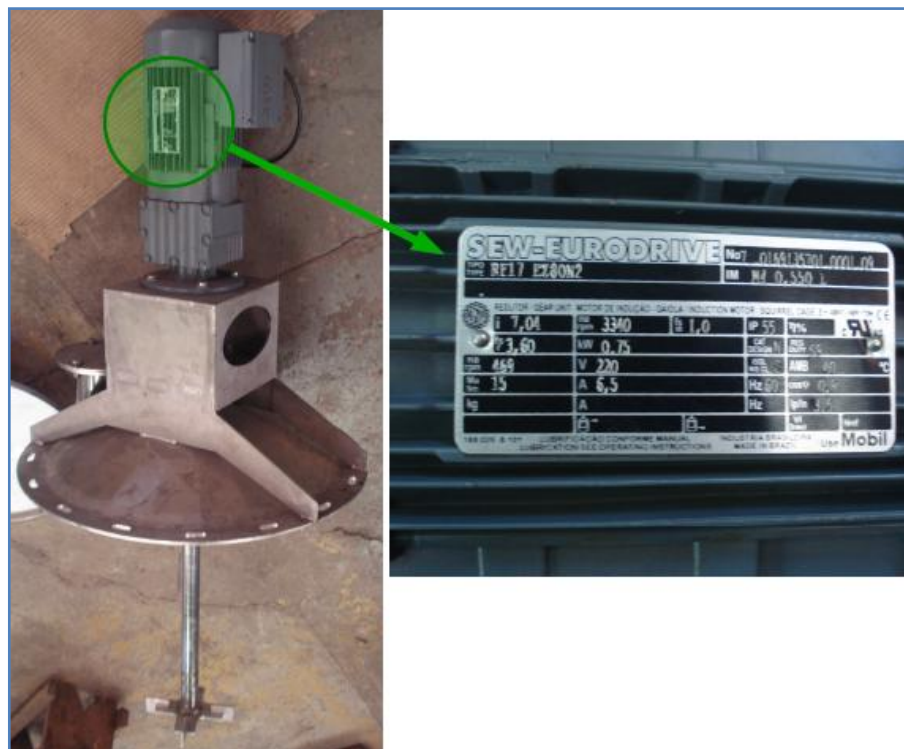


Figura 32 – Motoredutor utilizado no reator de sílica.

#### 4.2.4 Resistências elétricas de aquecimento

Por fim, o Anexo B lista duas resistências elétricas tubulares da marca RESISTEC utilizadas para aquecer a mistura durante os processos de transesterificação e evaporação do álcool. A primeira resistência elétrica, identificada por R1, possui 4000W de potência, 6 feixes de 2/8” e opera em 220V ou 380V. Esta resistência está instalada no interior do reator e é responsável por aquecer a mistura de óleo vegetal, álcool e catalisador, para realizar a reação de transesterificação. Este modelo de resistência elétrica é apresentado na Figura 33.

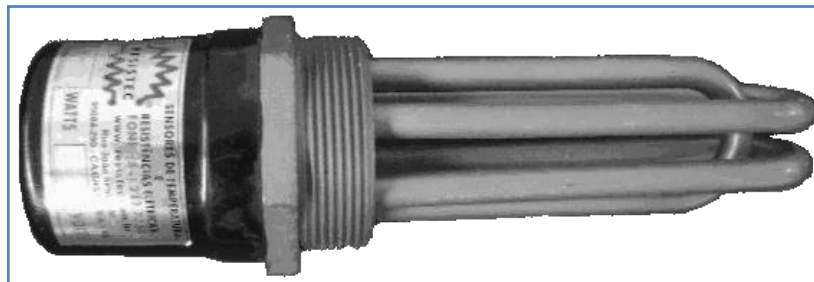


Figura 33 – Modelo de resistência elétrica utilizada na planta.

Fonte: [http://www.resistec.com.br/i8/admin/produtos/arquivos/dda199337ef1dd54b5269\\_da2dc2d5b\\_b743766\\_mini.JPG](http://www.resistec.com.br/i8/admin/produtos/arquivos/dda199337ef1dd54b5269_da2dc2d5b_b743766_mini.JPG).

Já a resistência elétrica R2, instalada no interior evaporador, possui as mesmas características físicas da resistência elétrica R1, porém trabalha com uma potência de 7000W. Este aumento na potência em relação a R1 se deve ao fato de que a reação de evaporação do álcool exige uma temperatura maior do que temperatura da reação de transesterificação.

Após apresentar a estrutura da planta, serão abordados na seção seguinte os componentes utilizados para a automação da mesma.

#### 4.3 Componentes utilizados na automação da planta de produção de biodiesel

A planta, objeto de estudo deste trabalho, também pode ser modelada em um diagrama de blocos. Em alusão ao estudo realizado e apresentado nas seções anteriores, pode-se ilustrar o sistema de controle utilizado na planta, conforme o diagrama da Figura 34.

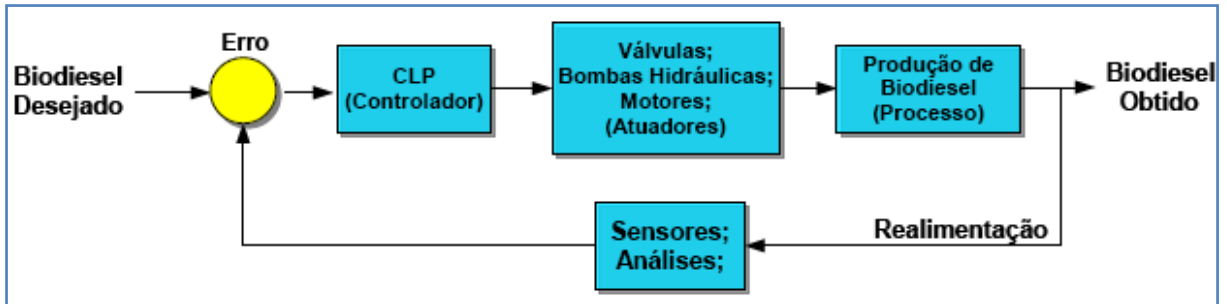


Figura 34 – Diagrama de blocos que compõem a planta de manufatura de biodiesel.

De acordo com o diagrama da Figura 34, percebe-se que a planta produz o biodiesel a partir do controle automático do CLP. Finalizado o processo, o combustível resultante é analisado em laboratório e comparado com as especificações das normas vigentes. Em caso de inconformidade, ajustes são realizados para que seja possível criar uma receita ótima do processo.

As seções a seguir apresentam os componentes utilizados na automação da planta de biodiesel objeto deste estudo. A identificação dos sensores e atuadores mencionados nas seções seguintes corresponde a nomenclatura adotada no diagrama da planta de biodiesel (Anexo A).

### 4.3.1 Sensores utilizados

Conforme mencionado pelos autores ao longo deste trabalho, para averiguar a qualidade do produto final obtido e as condições de operação de um sistema automatizado, deve-se utilizar sensores capazes de mensurar grandezas físicas e enviar informações digitais ou analógicas ao controlador do processo.

#### 4.3.1.1 Sensores de temperatura Pt-100

A planta possui dois sensores de temperatura do tipo Pt-100, identificados no Anexo A por TT1 e TT2 respectivamente, os quais realimentam o sistema, enviando ao CLP as informações das temperaturas no interior do reator e do evaporador. Essas temperaturas são mensuradas e exibidas em tempo real na IHM do painel de comando, para que o operador possa acompanhar os processos de transesterificação e evaporação do álcool.

#### 4.3.1.2 Sensores de nível

Conforme mencionado anteriormente, o controle do nível de produto em um processo industrial é de extrema importância para impedir que ocorram transbordamentos e informar ao operador sobre a existência de produto na linha de produção. A planta possui oito sensores de nível da marca Icos, modelo LA26M-40, o qual é apresentado na Figura 35.

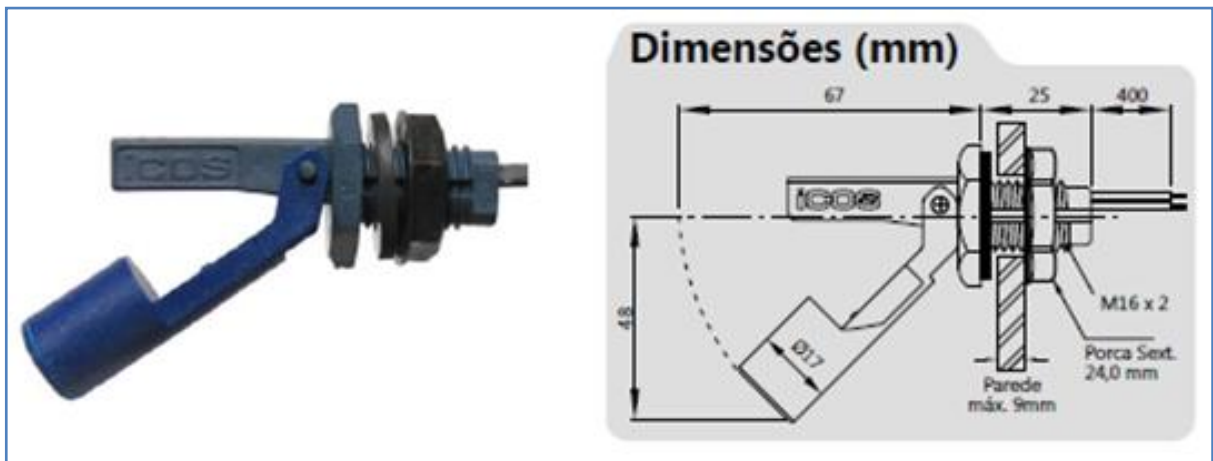


Figura 35 – Sensor Icos LA26M-40 e suas dimensões.

Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em ICOS (2011).

De acordo com os dados apresentados no manual do fabricante, os sensores LA26M-40 são utilizados para medição de nível de produtos líquidos, como água, óleo e hidrocarbonetos, com montagem lateral interna em furo passante de 16mm de diâmetro com arruela de vedação.

Estes sensores são construídos em polipropileno, suportam temperaturas na faixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $90^{\circ}\text{C}$  e operam com o princípio do movimento do flutuador magnético que abre e fecha um contato elétrico. Este contato permite a comutação de tensões elétricas contínuas e alternadas de até 220V, adequando-se às características elétricas do controlador utilizado na planta.

#### 4.3.1.3 Sensores indutivos

Em virtude do fato da planta utilizar válvulas manuais para direcionar o fluxo de produto na linha de produção, não há como comandar o acionamento das mesmas através do controlador de forma automática. Para tanto, foram instalados seis

sensores indutivos da marca BHS, modelo LM12-3002Pc, nas principais válvulas manuais, conforme ilustra a Figura 36.

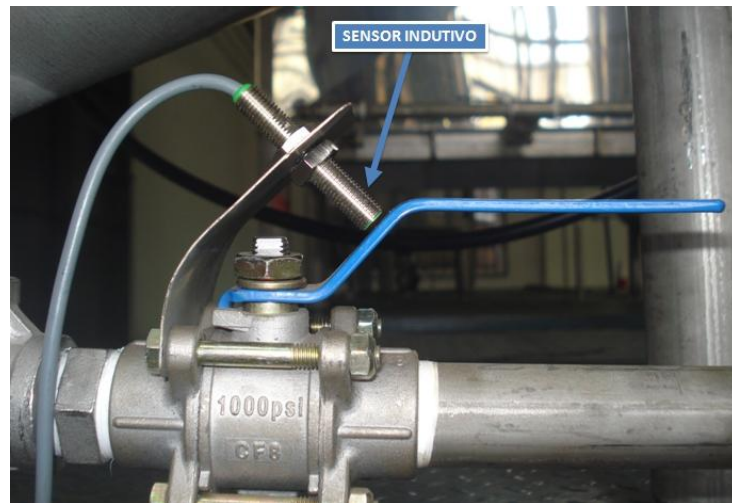


Figura 36 – Instalação de um sensor indutivo para válvula manual.

O sensor indutivo informa ao controlador se a sua respectiva válvula está aberta ou fechada, através de um sinal digital. Com isso, o controlador executa as etapas do processo caso o posicionamento das válvulas corresponda às condições impostas pelo programa desenvolvido.

#### 4.3.2 O CLP

Analisando o processo a ser realizado, bem como a estrutura oferecida pela planta de manufatura de biodiesel e as questões orçamentárias do projeto, optou-se por utilizar um CLP da marca SIEMENS, modelo LOGO! 24C OBA6. Este modelo de CLP possui 8 entradas digitais, das quais 4 podem ser utilizadas como entradas analógicas, além de 4 saídas digitais a transistor. O mesmo opera com tensão de alimentação contínua de 24 V, o que significa maior proteção para o produtor, tendo em vista que alguns CLPs utilizam tensão de alimentação alternada de 220 V, aumentando a periculosidade.

Além disso, o CLP possui uma IHM (Interface Homem-Máquina) a qual permite visualização de informações inerentes ao processo, bem como atuação de forma intuitiva por parte do produtor. Importante salientar também que o software para programação do CLP é gratuito e a programação pode ser realizada diretamente na IHM, sem a necessidade de aquisição do software e do cabo de programação.

No entanto, para suprir a demanda de entradas e saídas da planta, foram utilizadas duas expansões modelo LOGO! DM8 24 OBA0, as quais possuem 4 entradas digitais e 4 saídas digitais a transistor cada. Além destas expansões, foi utilizada uma expansão LOGO! AM2 RTD, a qual possui duas entradas analógicas compatíveis com sensores de temperatura do tipo PT-100, com faixa de medição entre -50 °C e +200 °C. Conforme mencionado anteriormente, a Figura 15 apresenta o CLP e as expansões utilizadas.

De acordo com o manual do fabricante, o CLP Logo! 24C OBA6 possui capacidade de controlar até 24 entradas digitais, 16 saídas digitais, 8 entradas analógicas e 2 saídas analógicas. Tendo em vista que a solução adquirida possui, em sua totalidade, 16 entradas digitais, 12 saídas digitais e 2 entradas analógicas, verifica-se que foram respeitadas as limitações especificadas em manual, possibilitando ainda futuras expansões.

#### **4.4 Testes de produção**

Os ensaios de produção foram realizados em escala de até 100 litros de óleo, 20 litros de metanol e 1,6 litros de metilato de sódio, sendo que as características físicas e químicas do biodiesel produzido foram determinadas em laboratório.

Considerando os resultados encontrados em experimentos anteriores e apresentados por Brandão et al. (2006), tem-se que o melhor teor de ésteres e percentagem em massa do biodiesel puro pode ser obtido com as condições reacionais do processo de produção de biodiesel etílico de soja, sendo que as condições reacionais são: a relação Óleo:EtOH de 1:11,8, teor de catalisador KOH de 2,0 % e tempo de reação de 60 minutos. Os resultados mostram ainda que acréscimos na temperatura reacional não modificam os teores dos ésteres e os rendimentos em massa.



#### **4.5 Metodologia analítica para o controle de qualidade do produto final**

A eficiência da planta piloto para a produção de biodiesel foi monitorada por HPLC (*High-Performance Liquid Chromatography*), utilizando um cromatográfico modular Shimadzu LC-20A Prominence.

Para as condições de estudo incluíram-se uma temperatura de 40 °C, fluxo de corrente de 1 mL min<sup>-1</sup>, comprimento de onda do detector foi fixado em 210 nm e gradiente linear de fase móvel conforme a seguinte forma: 100% Fase móvel A – acetonitrila: metanol (4:1) de (0 a 2,5 min), passando para 34% de Fase móvel A e 66% de Fase móvel B –n-Hexano : isopropanol (8:5) de (25,5 a 35 min) e retornando até 40 min com 100% da Fase móvel A.

As amostras foram solubilizadas na fase móvel B na proporção 1:30(v/v) e foram injetadas com volumes de 10 mL.

Da mesma forma, espectros de infravermelho do biodiesel foram utilizados para análise comparativa do produto final. Estes foram obtidos pelo método por Reflexão Total Atenuada no Infravermelho com Transformada de Fourier (ATR-FTIR). Estes resultados serão adquiridos, em triplicata, em espectrofotômetro PERKI ELMER<sup>®</sup> empregando-se um acessório interno de reflectância total atenuada universal, no intervalo entre 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e 32 varreduras.

Desta forma, conforme os resultados obtidos, as condições de operação de cada unidade da planta de produção foram otimizadas com o propósito de identificar as condições ideais para obtenção de um biocombustível de qualidade com menor consumo de tempo e energia.

#### **4.6 Avaliação final do processo de produção desenvolvido**

A partir dos resultados obtidos, determinou-se as condições de operação da planta de produção com o compromisso de obter o melhor produto possível, sem, no entanto, comprometer o preço final deste produto, o qual, segundo o Ministério de Minas e Energia, fechou em R\$ 2,33/litro no 24º Leilão de Biodiesel realizado no mês de novembro de 2011. Nesta etapa serão descritas todas as variáveis de controle do processo, produtividade, e curso de instalação, operação e o custo de produção unitário.

## **5 RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização do presente trabalho. A seção 5.1 relata o histórico de desenvolvimento da automação da planta, a partir do momento de sua instalação na Incubadora. A seção 5.2 descreve a montagem e automação da planta de biodiesel. A seção 5.3 aborda os testes de produção realizados na planta após a conclusão da etapa de automação. O item 5.4 apresenta os resultados obtidos a partir da análise do biodiesel produzido. O item 5.5 disserta sobre as condições ideais de produção do biodiesel, contemplando as principais variáveis do processo e discutindo sua influência na qualidade do produto final. Por fim, a seção 5.6 discute o valor investido na construção e na automação da planta, contemplando sugestões de melhoria para o processo automático de fabricação.

### **5.1 Histórico de desenvolvimento**

Esta seção apresenta o histórico de desenvolvimento deste trabalho, dividindo-o nas etapas de projeto elétrico e instalações elétricas, contemplando os problemas encontrados na planta durante estas etapas.

#### **5.1.1 Projeto elétrico**

Em dezembro de 2010, após definida e apresentada a proposta deste trabalho, a planta de produção de biodiesel encontrava-se em fase de montagem, nas dependências da Sur Engenharia e Máquinas, em Santa Cruz do Sul. Foram realizadas diversas vistorias para que fosse possível definir os requisitos necessários para a instalação elétrica dos acionamentos da planta.

A partir da análise realizada, tendo em vista o número de acionamentos e sensores utilizados na malha de controle, foi definido o CLP a ser utilizado para controlar a planta. Com base nesta definição, o autor do presente trabalho, juntamente com a equipe de projetistas da empresa Startup Automação Industrial LTDA de Lajeado, elaborou o projeto elétrico, o qual contém os diagramas elétricos, lista de componentes elétricos, além da identificação dos acionamentos e sensores. A Figura 37 apresenta um dos diagramas elétricos utilizados no projeto.

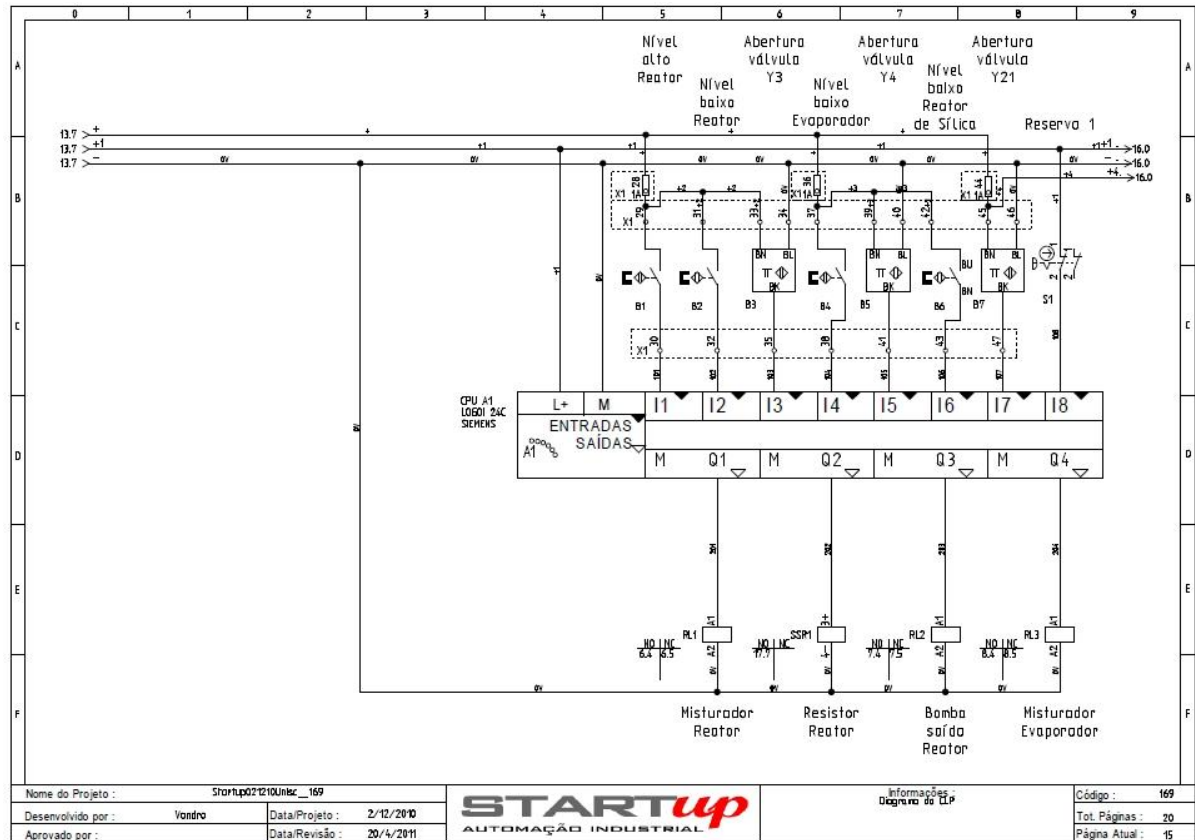


Figura 37 – Diagrama do projeto elétrico.  
Fonte: Startup Automação Industrial LTDA.

De posse do projeto elétrico, partiu-se para a etapa de orçamento dos componentes elétricos, dos serviços de montagem e instalação da estrutura elétrica da planta.

Após a aprovação dos orçamentos por parte da UNISC, foi realizada a etapa de aquisição dos componentes orçados, sendo que, em março de 2011, os componentes foram entregues à Startup Automação Industrial LTDA, iniciando-se então a montagem do quadro de comando, por parte da equipe de montagem e do autor do presente trabalho, conforme especificações do projeto elétrico.

Concluída a montagem do quadro de comando em abril de 2011, foram desenvolvidos programas de teste para o CLP, com o intuito de averiguar as ligações elétricas do painel. Constatou-se o pleno funcionamento do painel de comando, iniciando-se assim a etapa de instalação elétrica da planta.

### 5.1.2 Instalações elétricas

Em abril de 2011, foi realizada uma inspeção da estrutura da planta por parte da equipe de engenharia da Startup Automação Industrial na Incubadora da UNISC. Nesta inspeção, foram definidas as rotas para passagem do cabeamento elétrico e o local de fixação do painel de comando. Após as definições, a Startup Automação Industrial agendou a segunda semana do mês de junho de 2011 para efetuar a instalação elétrica da planta.

Durante a etapa de instalação elétrica foram fixadas canaletas metálicas para a passagem dos cabos elétricos. Montada esta estrutura, foram realizadas todas as ligações elétricas dos sensores e atuadores da planta, direcionando o cabeamento até o quadro de comando fixado na planta.

Todos os cabos elétricos utilizados na planta foram devidamente identificados com etiquetas individuais, seguindo o projeto elétrico desenvolvido, em concordância com o diagrama da planta, apresentado no Anexo A. Isto possibilita uma fácil identificação dos componentes e auxilia nos casos em que é necessário efetuar uma manutenção ou modificação elétrica. A Figura 38 apresenta o modelo de identificação adotado, utilizando como exemplo a bomba centrífuga M2.



Figura 38 – Modelo de identificação dos acionamentos.

A etapa de instalação elétrica da planta estendeu-se até a terceira semana do mês de junho de 2011, em virtude de problemas na rede elétrica da Incubadora que não foram previstos no projeto inicial. A Figura 39 apresenta a instalação do quadro de comando na planta de biodiesel ao final desta etapa.



Figura 39 – Instalação do quadro de comando em junho de 2011.

Efetuada a instalação elétrica, foi possível iniciar os testes dos acionamentos e sensores alocados na planta, conforme relatado na seção a seguir.

### **5.1.3 Testes elétricos e problemas encontrados**

No dia 21 de junho de 2011, foi desenvolvido um programa de testes para a planta de biodiesel. Este programa contemplava todos os acionamentos elétricos instalados, visando a realização de testes manuais de operação da planta. Durante a realização dos testes, utilizou-se água para simular os processos envolvidos na produção de biodiesel. Foram encontrados, em virtude dos resultados obtidos nos testes realizados, diversos problemas mecânicos e elétricos que serão relatados nesta seção.

A planta possui 3 motoredutores de mesma marca e modelo, acoplados a estruturas semelhantes, utilizados para efetuar a mistura dos produtos. Quando a planta foi alocada na Incubadora, somente o motor do reator de sílica possuía a ligação elétrica interna completa, permitindo seu acionamento durante os testes. Tendo em vista seu funcionamento, foi utilizada a mesma ligação para os motores do reator e do evaporador. Entretanto, ambos apresentaram problemas de partida,

impossibilitando sua utilização, em virtude da alta corrente consumida por estes nos testes realizados.

Além deste problema, a planta possuía uma série de tubulações hidráulicas desconectadas ou desniveladas, impossibilitando sua ligação sem as ferramentas necessárias. Além das desconexões, averiguou-se a ausência da tubulação que deveria conectar o reservatório de lavagem ao reator de sílica (prevista no diagrama original da planta). Sem esta conexão, não havia possibilidade de finalizar o processo de produção de biodiesel.

No dia 12 de julho de 2011, a Sur Engenharia e Máquinas corrigiu os problemas de desconexão do evaporador e da saída do reator de sílica, restando ainda a conexão inexistente, em virtude da necessidade de testes de nível de produto no reservatório de lavagem para definir a altura da conexão.

Entretanto, somente no dia 18 de agosto de 2011, após entrar em contato com o fabricante dos motores utilizados na planta, foi possível resolver o problema do motor do evaporador. Contudo, aplicando a mesma solução ao motor do reator, não foi possível fazê-lo operar corretamente. Sendo assim, este motor foi enviado para o fabricante.

Ainda neste dia, foram realizados testes de fluxo de produto na planta, tendo em vista que as conexões foram providenciadas. Durante os testes, ocorreram diversos vazamentos de água sobre a bomba centrífuga que transfere o produto do reator para o evaporador, na conexão de entrada da bomba centrífuga que transfere o produto do evaporador para os decantadores, nas conexões de saída dos decantadores e na conexão de entrada do reservatório pulmão.

Além disso, a bomba de saída dos decantadores estava instalada de forma invertida, ou seja, ao invés de transferir a fase superior do processo de decantação para o reservatório de lavagem, a bomba realizava o processo inverso. Tendo em vista que não há como inverter o sentido de fluxo da bomba eletricamente, foi necessário aguardar pela manutenção mecânica da instalação por parte da Sur Engenharia e Máquinas.

No mês de outubro de 2011, a Sur recebeu o motoredutor do reator consertado e o instalou na planta. Além desta instalação, foram corrigidos os problemas de vazamento e o posicionamento da bomba de saída dos decantadores. A partir deste momento, foi possível testar a planta em sua totalidade, através do desenvolvimento do programa para o CLP.

Por fim, em novembro de 2011, ocorreu um problema mecânico com a bomba centrífuga de recirculação do biodiesel no reator de sílica, impossibilitando os testes de secagem do biodiesel e transferência do mesmo para o reservatório pulmão. Este problema foi resolvido no final do mês de novembro.

Ainda neste mês, a Bomba de Água (BA) e a Bomba de Vácuo (BV) foram instaladas na tubulação dos condensadores do reator e do evaporador, permitindo a realização do primeiro teste de produção de biodiesel no dia 20 de novembro de 2011. Este e os demais testes realizados na sequência são descritos de forma detalhada posteriormente.

## **5.2 Automação da planta de biodiesel**

Esta seção descreve a automação desenvolvida para a planta de produção de biodiesel, contemplando a forma de utilização dos componentes da malha de controle apresentada na seção 4.3 e elucidando o método de operação da interface de comando, a qual permite programar e visualizar as principais variáveis do processo em tempo real.

### **5.2.1 Controle de temperatura**

Utilizando a informação de temperatura mensurada pelos sensores Pt-100, o CLP atua nas resistências de aquecimento destes componentes, objetivando atingir e manter a temperatura estipulada pela receita programada pelo operador. A Figura 40 apresenta o Pt-100 e a resistência térmica conectados ao evaporador.

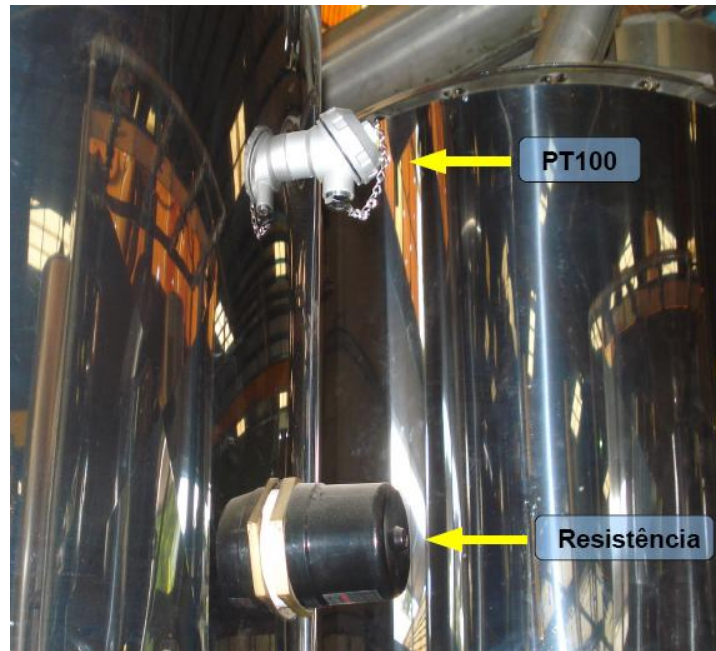


Figura 40 – Pt-100 e resistência térmica do evaporador.

O sistema desenvolvido permite que o operador programe e visualize as temperaturas de transesterificação e evaporação, de acordo com as características dos produtos a serem processados e testes realizados previamente.

### 5.2.2 Controle de nível de produto

O reator possui dois sensores de nível, os quais indicam nível mínimo (B2) e nível máximo (B1) de produto. Quando o processo de produção de biodiesel é iniciado, o Reator está vazio, ou seja, ambos os sensores estão desligados (contato aberto). A partir do momento em que o óleo é inserido no reator, o nível ascende gradativamente até atingir o sensor de nível mínimo, fazendo seu flutuador magnético acionar o contato elétrico conectado ao controlador. Com isso, o controlador identifica presença de óleo no reator e inicia os processos de aquecimento e mistura necessários para a reação de transesterificação.

Além disso, o sensor de nível máximo instalado próximo à extremidade superior do reator impede que ocorram transbordamentos. Tendo em vista que todos os componentes da planta possuem capacidades iguais ou inferiores a do reator, limitando-se a quantidade de produto neste, evita-se problemas de transbordamento na linha de processo. Caso o nível máximo do reator seja atingido, o controlador desliga automaticamente a bomba de óleo (M0). A Figura 41 apresenta a vista



interna do reator, identificando os sensores de nível mínimo e nível máximo, bem como o Pt-100 e a resistência elétrica de aquecimento.

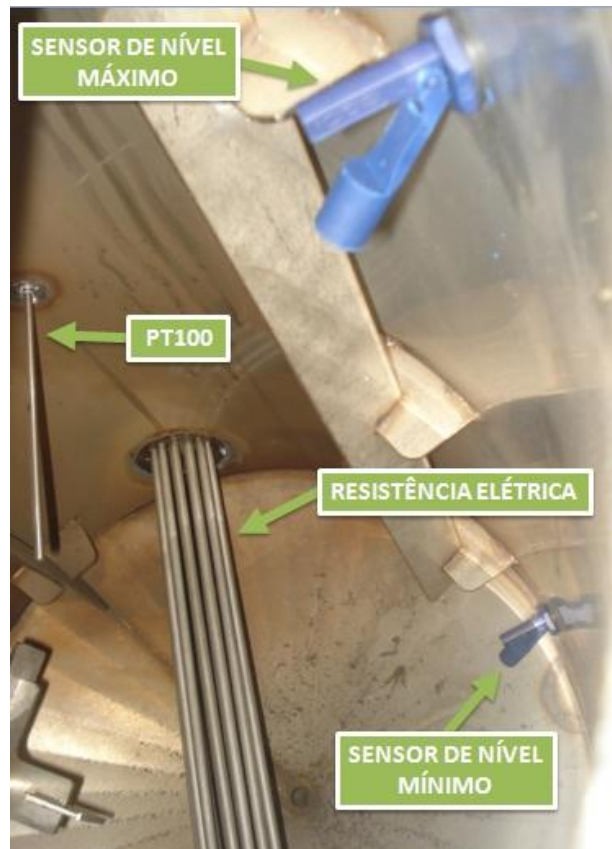


Figura 41 – Vista interna do reator.

O evaporador possui um sensor de nível mínimo (B4), instalado da mesma forma que o sensor de nível mínimo do reator, porém não possui sensor de nível máximo, pelo fato de que a quantidade de produto na linha já é limitada pelo nível máximo do reator. No caso do evaporador, o nível mínimo informa o controlador que o processo de evaporação do álcool pode ser iniciado e evita que seja inserido produto proveniente do reator durante a operação no evaporador. Com isso, não há o risco de mistura de dois produtos de bateladas diferentes no evaporador durante o processo de evaporação.

Na sequência, cada decantador possui um sensor de nível mínimo instalado. A partir da informação enviada por esses sensores (B9, B10, B11, B12), o controlador inicia o processo de contagem do tempo de decantação programado de cada decantador. Além disso, caso os quatro decantadores estejam cheios, o sistema não permite que o produto proveniente do evaporador seja transportado. Com isso, evita-se o transbordamento e a mistura de produtos de bateladas diferentes.

Os sensores de nível mínimo dos decantadores foram instalados na altura dos visores. De acordo com o projeto dos decantadores (Figura 23), instalando-se o sensor nesta altura, torna-se possível indicar se há presença de produto ou se há apenas a fase inferior proveniente do processo de decantação.

Por fim, o reator de sílica possui um sensor de nível mínimo (B6) instalado da mesma forma que os sensores do reator e do evaporador. Seu intuito é informar ao controlador se há presença de produto proveniente do reservatório de lavagem. Caso o sensor indique nível mínimo, o controlador inicia o processo de secagem através da recirculação do biodiesel em contato com a sílica, para posteriormente transferir o biodiesel para o reservatório pulmão.

### **5.2.3 Controle de fluxo de produto**

A primeira etapa da produção de biodiesel consiste no abastecimento de óleo vegetal, álcool e catalisador no reator. Para tanto, o controlador permite que a etapa de abastecimento seja realizada caso não haja produto proveniente de uma batelada anterior dentro do reator e a válvula de saída do reator (Y3) esteja fechada, bloqueando a passagem de produto para o misturador. Se no momento em que o operador pressionar o botão para iniciar o abastecimento do óleo a válvula de saída do reator (Y3) estiver aberta, o controlador bloqueia o acionamento da bomba de óleo (M0) e solicita, através de uma mensagem de texto exibida na IHM, que o operador feche a respectiva válvula para que o processo possa ser realizado.

Após a reação de transesterificação no reator, o produto pode ser transferido para o evaporador. Para tanto, o controlador exibe uma mensagem de texto na IHM solicitando a abertura da válvula de saída do reator (Y3) e o fechamento da válvula de saída do evaporador (Y4), caso a mesma esteja aberta, pois o produto deve permanecer dentro do evaporador durante o processo de evaporação.

Da mesma forma, há um sensor indutivo na válvula (Y19) instalada na saída da bomba (M5) que transfere a fase superior do biodiesel dos decantadores para o tanque de lavagem. Além deste, há um sensor indutivo instalado na válvula (Y18) que conecta o tanque de lavagem ao reator de sílica. Após concluir o processo de separação de fases em um dos quatro decantadores, o controlador solicita que o operador abra as válvulas Y18 e Y19 para que a fase superior da decantação possa

entrar em contato com a água acidificada no tanque de lavagem e ser transferida diretamente ao reator de sílica.

Por fim, o reator de sílica possui dois sensores indutivos. O sensor indutivo (B7) informa o estado atual da válvula de saída (Y21) do reator de sílica. Já o sensor indutivo (B8) informa o estado atual da válvula de entrada (Y23) do reservatório pulmão. Com isso, o controlador orienta o operador a abrir a válvula Y21 e fechar a válvula Y23 durante o processo de recirculação. Após este processo, o controlador solicita a abertura da válvula Y23 para que o produto possa ser transferido ao reservatório pulmão.

Com isso, as principais válvulas de acionamento manual da planta são supervisionadas pelo controlador, possibilitando o controle do fluxo do produto durante todas as etapas de produção.

#### **5.2.4 Programação do CLP**

O programa do CLP foi desenvolvido no software Logo Soft Comfort 6.0, o qual permite, além da escrita do código, o acompanhamento de todas as variáveis de entrada e saída em tempo real, possibilitando a análise contínua do processo realizado, bem como a detecção de possíveis erros no código desenvolvido.

O código foi escrito inteiramente em linguagem *Ladder*, seguindo as orientações da norma IEC 61131. O programa desenvolvido não possui restrições de cópia e edição, sendo que todas as rotinas desenvolvidas apresentam comentários textuais, possibilitando o entendimento por parte de demais programadores de CLP que tenham conhecimento de linguagem *Ladder*. A Tabela 4 apresenta a relação de entradas e saídas utilizadas no CLP e nas expansões.

Tabela 4 – Relação de entradas e saídas do CLP Logo e suas expansões

<b>CLP LOGO! 24C OBA6</b>			
<b>ENTRADAS DIGITAIS</b>		<b>SAÍDAS DIGITAIS</b>	
<b>I1</b>	Sensor de Nível Máximo do Reator (B1)	<b>Q1</b>	Motor Misturador do Reator (M1)
<b>I2</b>	Sensor de Nível Mínimo do Reator (B2)	<b>Q2</b>	Resistência do Evaporador (R2)
<b>I3</b>	Sensor Indutivo da Válvula Y3 (B3)	<b>Q3</b>	Bomba de Saída do Reator (M2)
<b>I4</b>	Sensor de Nível Mínimo do Evaporador (B4)	<b>Q4</b>	Motor Misturador do Evaporador (M3)
<b>I5</b>	Sensor Indutivo da Válvula Y4 (B5)	-	
<b>I6</b>	Sensor de Nível Mínimo da Sílica (B6)	-	
<b>I7</b>	Sensor Indutivo da Válvula Y21 (B7)	-	
<b>I8</b>	Botão de Emergência do Painel	-	
<b>1º MÓDULO DE EXPANSÃO DM8 24 OBA0</b>			
<b>ENTRADAS DIGITAIS</b>		<b>SAÍDAS DIGITAIS</b>	
<b>I1</b>	Botão Automático/Manual do Painel	<b>Q1</b>	Resistência do Reator (R1)
<b>I2</b>	Sensor de Nível Mínimo do Decantador 1 (B9)	<b>Q2</b>	Bomba de Saída do Evaporador (M4)
<b>I3</b>	Sensor de Nível Mínimo do Decantador 2 (B10)	<b>Q3</b>	Bomba de Saída dos Decantadores (M5)
<b>I4</b>	Sensor Indutivo da Válvula Y19 (B13)	<b>Q4</b>	Bomba de Saída do Reator de Sílica (M7)
<b>2º MÓDULO DE EXPANSÃO DM8 24 OBA0</b>			
<b>ENTRADAS DIGITAIS</b>		<b>SAÍDAS DIGITAIS</b>	
<b>I1</b>	Sensor Indutivo da Válvula Y18 (B14)	<b>Q1</b>	Motor Misturador do Reator de Sílica (M6)
<b>I2</b>	Sensor Indutivo da Válvula Y23 (B8)	<b>Q2</b>	Bomba de Entrada de Óleo Vegetal (M0)
<b>I3</b>	Sensor de Nível Mínimo do Decantador 3 (B11)	<b>Q3</b>	RESERVA
<b>I4</b>	Sensor de Nível Mínimo do Decantador 4 (B12)	<b>Q4</b>	RESERVA
<b>MÓDULO DE EXPANSÃO AM2 RTD</b>			
<b>ENTRADAS ANALÓGICAS</b>		<b>SAÍDAS ANALÓGICAS</b>	
<b>1</b>	Sensor de Temperatura do Reator (TT1)	-	
<b>2</b>	Sensor de Temperatura do Evaporador (TT2)	-	

Descritos os componentes utilizados na automação da planta, será abordado na seção seguinte o quadro de comando projetado para centralizar todas as ligações elétricas efetuadas e servir de interface de operação para o produtor.

### 5.2.5 O quadro de comando

Conforme mencionado anteriormente, todos os cabos utilizados nesta etapa foram direcionados através das canaletas metálicas até o quadro de comando fixado na estrutura da planta, o qual foi projetado para interligar o CLP com todos os acionamentos elétricos da planta de forma ordenada, conforme o diagrama elétrico desenvolvido.

Já na parte externa do quadro de comando, foi projetada a interface de operação da planta de biodiesel. Esta interface possibilita ao operador comandar todos os atuadores da planta de forma manual e automática, além de visualizar dados inerentes ao processo, conforme ilustra a Figura 42.



Figura 42 – Interface de operação do quadro de comando.

A automação desenvolvida neste trabalho permite a operação da planta de forma manual e automática. Por forma manual, entende-se a possibilidade de comandar todos os atuadores da planta sem a necessidade de respeitar a sequência imposta pelo programa do CLP. Esta forma de operação é importante, pois permite ao operador testar os equipamentos de forma prática e eficiente, além de efetuar correções na rota de produção antes de realizar uma batelada de forma automática.

Para permitir o acionamento manual de cada atuador da planta, o quadro de comando conta com sete botões, uma chave seletora de duas posições e uma IHM. Cada botão presente na interface de operação do painel de comando representa um

acionamento elétrico da planta, ou seja, uma saída digital do CLP. No entanto, para que o sistema acione os equipamentos através do sinal proveniente dos botões, é necessário selecionar o modo de operação manual, conforme exemplifica a Figura 43.



Figura 43 – Identificação da interface de operação do quadro de comando.

O painel de comando conta com um botão de emergência instalado em sua porta, o qual possui fácil acesso e permite desativar todos os acionamentos elétricos de forma instantânea em caso de emergência.

Por fim, o painel de comando disponibiliza uma IHM, a qual permite ao operador controlar a planta, configurar e visualizar em tempo real os valores de temperatura e tempo de processo. A operação da IHM é abordada na seção seguinte.

### 5.2.6 A Interface Homem Máquina

Embora o CLP utilizado neste trabalho possua uma IHM embutida, o mesmo está fixado dentro do quadro de comando, tornando seu manuseio uma operação de

risco, em virtude da possibilidade de contato por parte do operador com os demais componentes elétricos alocados no interior do painel. Para tanto, o projeto contemplou uma IHM externa, fixada na porta do painel de comando, possibilitando uma operação segura e de fácil acesso, conforme mostra a Figura 44.



Figura 44 – IHM utilizada no trabalho.

A IHM LOGO TD! Display possui uma tela monocromática de cristal líquido de 4 linhas por 12 caracteres que exibe informações e alarmes inerentes ao processo, visando auxiliar o operador nas etapas de fabricação de biodiesel. A tela com 61mm de largura e 31mm de altura, possui iluminação própria e contraste ajustável para facilitar a leitura das informações.

Além da tela, a IHM possui um conjunto de 10 teclas que podem ser utilizadas para navegar entre as telas disponíveis, selecionar e configurar variáveis de controle e controlar a Bomba de Adição de Óleo (M0), a qual inicia a batelada de processo.

Foram desenvolvidas 8 telas de controle, configuração e visualização dos principais processos da planta de biodiesel, as quais são exibidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação de telas da IHM e suas respectivas descrições

TELA	DESCRIÇÃO
	<p><b>TELA DE CONTROLE DA BOMBA DE ÓLEO</b></p> <p><b>SETUP:</b> Configuração do tempo de atuação da Bomba de Óleo (M0).  <b>DECOR:</b> Tempo decorrido durante o bombeamento de óleo.  <b>DESLIG:</b> Indica a situação atual da Bomba de Óleo (M0).</p>

TELA	DESCRIÇÃO																																																
<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td>R</td><td>E</td><td>A</td><td>T</td><td>O</td><td>R</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>O</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>:</td><td></td><td>2</td><td>3</td><td>.</td><td>5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>R</td><td>E</td><td>S</td><td>:</td><td>D</td><td>E</td><td>S</td><td>L</td><td>I</td><td>G</td><td>.</td><td></td></tr> </table>			R	E	A	T	O	R			T	E	M	P	O	:	0	0	:	0	0	m	T	E	M	P	:		2	3	.	5			R	E	S	:	D	E	S	L	I	G	.		<p><b>TELA DE SUPERVISÃO DO REATOR</b></p> <p><b>TEMPO:</b> Tempo restante do processo de transesterificação.  <b>TEMP:</b> Temperatura atual em °C no reator.  <b>RES:</b> Estado atual da resistência de aquecimento (R1).</p>		
		R	E	A	T	O	R																																										
T	E	M	P	O	:	0	0	:	0	0	m																																						
T	E	M	P	:		2	3	.	5																																								
R	E	S	:	D	E	S	L	I	G	.																																							
<table border="1"> <tr><td>S</td><td>E</td><td>T</td><td>U</td><td>P</td><td></td><td>R</td><td>E</td><td>A</td><td>T</td><td>O</td><td>R</td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>O</td><td>:</td><td>3</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>:</td><td></td><td>4</td><td>6</td><td>.</td><td>0</td><td></td><td></td></tr> </table>	S	E	T	U	P		R	E	A	T	O	R	T	E	M	P	O	:	3	0	:	0	0	m	T	E	M	P	:		4	6	.	0			<p><b>TELA DE CONFIGURAÇÃO DO REATOR</b></p> <p><b>TEMPO:</b> Tempo configurável para a reação de transesterificação.  <b>TEMP:</b> Temperatura configurável para a reação de transesterificação.</p>												
S	E	T	U	P		R	E	A	T	O	R																																						
T	E	M	P	O	:	3	0	:	0	0	m																																						
T	E	M	P	:		4	6	.	0																																								
<table border="1"> <tr><td></td><td>E</td><td>V</td><td>A</td><td>P</td><td>O</td><td>R</td><td>A</td><td>D</td><td>O</td><td>R</td><td></td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>O</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>:</td><td></td><td>2</td><td>5</td><td>.</td><td>3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>R</td><td>E</td><td>S</td><td>:</td><td>D</td><td>E</td><td>S</td><td>L</td><td>I</td><td>G</td><td>.</td><td></td></tr> </table>		E	V	A	P	O	R	A	D	O	R		T	E	M	P	O	:	0	0	:	0	0	m	T	E	M	P	:		2	5	.	3			R	E	S	:	D	E	S	L	I	G	.		<p><b>TELA DE SUPERVISÃO DO EVAPORADOR</b></p> <p><b>TEMPO:</b> Tempo restante do processo de evaporação.  <b>TEMP:</b> Temperatura atual em °C no evaporador.  <b>RES:</b> Estado atual da resistência de aquecimento (R2).</p>
	E	V	A	P	O	R	A	D	O	R																																							
T	E	M	P	O	:	0	0	:	0	0	m																																						
T	E	M	P	:		2	5	.	3																																								
R	E	S	:	D	E	S	L	I	G	.																																							
<table border="1"> <tr><td>S</td><td>E</td><td>T</td><td>U</td><td>P</td><td></td><td>E</td><td>V</td><td>A</td><td>P</td><td>O</td><td>R</td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>O</td><td>:</td><td>4</td><td>0</td><td>:</td><td>1</td><td>5</td><td>m</td></tr> <tr><td>T</td><td>E</td><td>M</td><td>P</td><td>:</td><td></td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>.</td><td>0</td><td></td></tr> </table>	S	E	T	U	P		E	V	A	P	O	R	T	E	M	P	O	:	4	0	:	1	5	m	T	E	M	P	:		1	0	0	.	0		<p><b>TELA DE CONFIGURAÇÃO DO EVAPORADOR</b></p> <p><b>TEMPO:</b> Tempo configurável para a reação de evaporação.  <b>TEMP:</b> Temperatura configurável para a reação de evaporação.</p>												
S	E	T	U	P		E	V	A	P	O	R																																						
T	E	M	P	O	:	4	0	:	1	5	m																																						
T	E	M	P	:		1	0	0	.	0																																							
<table border="1"> <tr><td>D</td><td>E</td><td>C</td><td>A</td><td>N</td><td>T</td><td>A</td><td>D</td><td>O</td><td>R</td><td></td><td>1</td></tr> <tr><td>S</td><td>E</td><td>T</td><td>U</td><td>P</td><td>:</td><td>1</td><td>5</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> <tr><td>D</td><td>E</td><td>C</td><td>O</td><td>R</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> </table>	D	E	C	A	N	T	A	D	O	R		1	S	E	T	U	P	:	1	5	:	0	0	m	D	E	C	O	R	:	0	0	:	0	0	m	<p><b>TELA DE CONTROLE DO DECANTADOR 1</b></p> <p><b>SETUP:</b> Configuração do tempo de decantação no decantador 1.  <b>DECOR:</b> Tempo decorrido de decantação no decantador 1.</p>												
D	E	C	A	N	T	A	D	O	R		1																																						
S	E	T	U	P	:	1	5	:	0	0	m																																						
D	E	C	O	R	:	0	0	:	0	0	m																																						



TELA	DESCRIÇÃO																																																
<table border="1"> <tr><td>D</td><td>E</td><td>C</td><td>A</td><td>N</td><td>T</td><td>A</td><td>D</td><td>O</td><td>R</td><td> </td><td>2</td></tr> <tr><td>S</td><td>E</td><td>T</td><td>U</td><td>P</td><td>:</td><td>0</td><td>1</td><td>:</td><td>3</td><td>0</td><td>h</td></tr> <tr><td>D</td><td>E</td><td>C</td><td>O</td><td>R</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>h</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>	D	E	C	A	N	T	A	D	O	R		2	S	E	T	U	P	:	0	1	:	3	0	h	D	E	C	O	R	:	0	0	:	0	0	h													<p><b>TELA DE CONTROLE DO DECANTADOR 2</b></p> <p><b>SETUP:</b> Configuração do tempo de decantação no decantador 2.  <b>DECOR:</b> Tempo decorrido de decantação no decantador 2.</p>
D	E	C	A	N	T	A	D	O	R		2																																						
S	E	T	U	P	:	0	1	:	3	0	h																																						
D	E	C	O	R	:	0	0	:	0	0	h																																						
<table border="1"> <tr><td> </td><td>S</td><td>E</td><td>C</td><td>A</td><td>D</td><td>O</td><td>R</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>S</td><td>E</td><td>T</td><td>U</td><td>P</td><td>:</td><td>1</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> <tr><td>R</td><td>E</td><td>S</td><td>T</td><td>A</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>:</td><td>0</td><td>0</td><td>m</td></tr> <tr><td> </td><td>V</td><td>A</td><td>Z</td><td>I</td><td>O</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>		S	E	C	A	D	O	R					S	E	T	U	P	:	1	0	:	0	0	m	R	E	S	T	A	:	0	0	:	0	0	m		V	A	Z	I	O							<p><b>TELA DE CONTROLE DO REATOR DE SÍLICA (SECADOR)</b></p> <p><b>SETUP:</b> Configuração do tempo de recirculação (secagem).  <b>RESTA:</b> Tempo restante para o final da recirculação (secagem).  <b>VAZIO/CHEIO:</b> Indicação de produto no reator de sílica.</p>
	S	E	C	A	D	O	R																																										
S	E	T	U	P	:	1	0	:	0	0	m																																						
R	E	S	T	A	:	0	0	:	0	0	m																																						
	V	A	Z	I	O																																												

Além destas, foram desenvolvidas 10 telas de alerta de sequência de processo. Estas telas exibem instruções a serem seguidas para que as etapas de produção possam ser executadas. A Figura 45 exibe as telas desenvolvidas.

	A	B	R	I	R		A				
V	Á	L	V	U	L	A	(	B	4	)	
D	E	D	E	S	C	A	R	G	A		
E	V	A	P	O	R	A	D	O	R		
E	S	V	A	Z	I	E		O			
S	E	C	A	D	O	R		P	A	R	A
C	O	N	T	I	N	U	A	R	!		
	A	B	R	I	R		A				
V	Á	L	V	U	L	A	(	Y	2	1	)
A	B	A	I	X	O		D	O			
	S	E	C	A	D	O	R				
	A	B	R	I	R		A				
V	Á	L	V	U	L	A	D	E			
E	N	T	R	A	D	A		D	O		
T	Q	.	P	U	L	M	Ã	O			
	F	E	C	H	A	R		A			
V	Á	L	V	U	L	A	(	B	4	)	
D	E	D	E	S	C	A	R	G	A		
E	V	A	P	O	R	A	D	O	R		
	A	B	R	I	R		A				
V	Á	L	V	U	L	A	(	Y	2	1	)
P	A	R	A		I	N	I	C	I	A	R
R	E	C	I	R	C	U	L	A	Ç	Ã	O
	A	B	R	I	R		A				
V	Á	L	V	U	L	A	D	E			
E	N	T	R	A	D	A		D	O		
T	Q	.	P	U	L	M	Ã	O			

Figura 45 – Telas de alerta.

Todas as telas desenvolvidas são explanadas de forma detalhada no Manual de Operações da Planta de Biodiesel (Anexo D). Este manual foi desenvolvido com o intuito de elucidar o funcionamento da planta, abordando todos os acionamentos, as etapas de produção de biodiesel, instruções de operação do painel de comando e da IHM.

### 5.3 Testes de produção

Esta seção contempla os testes de produção utilizando óleo vegetal, catalisador e álcool, realizados após a conclusão da etapa de automação da planta. Ao Todo foram realizados três testes de produção, os quais foram executados nos dias 22 de dezembro de 2011 e 20 de janeiro de 2012 (2 últimos testes). As seções a seguir descrevem os testes realizados.

#### 5.3.1 Teste de produção 1

O primeiro teste foi realizado, com 100 litros de uma mistura de óleo bruto de canola, tabaco e girassol, 20 litros de metanol e 2 litros de metilato de sódio como catalisador. Primeiramente, o óleo vegetal foi transferido para o reator através do acionamento da bomba centrífuga M0.

A transferência foi realizada de forma manual, através da interface de operação do painel de comando, cronometrando-se o tempo necessário para a transferência de 100 litros de óleo vegetal. Com isso, definiu-se o tempo de 2 minutos e 36 segundos como suficiente e adequado para esta operação.

Após a etapa de transferência do óleo vegetal para o reator, a planta foi configurada para atuar em modo automático, conforme valores de tempo e temperatura apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Configurações de tempo e temperatura para o primeiro teste

OPERAÇÃO	CONFIGURAÇÕES
<p style="text-align: center;"><u>REATOR</u> REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO</p>	<p><b>TEMPO DE REAÇÃO:</b> 60 minutos. <b>TEMPERATURA DE REAÇÃO:</b> 65 °C.</p>
<p style="text-align: center;"><u>EVAPORADOR</u> REAÇÃO DE EVAPORAÇÃO DO ÁLCOOL</p>	<p><b>TEMPO DE REAÇÃO:</b> 90 minutos. <b>TEMPERATURA DE REAÇÃO:</b> 70 °C.</p>
<p style="text-align: center;"><u>DECANTADOR 1</u> SEPARAÇÃO DE FASES</p>	<p><b>TEMPO DE DECANTAÇÃO:</b> 120 minutos.</p>

De acordo com os dados informados na Tabela 6, verifica-se que a reação de transesterificação foi programada para ocorrer durante 60 minutos a temperatura de 65 °C, sendo que a temperatura mensurada no interior do reator no início do processo indicou 30 °C. Nestas condições, o tempo necessário para que o óleo

vegetal atingisse 65 °C e permanecesse estável nesta temperatura foi de 30 minutos.

Ao atingir a temperatura programada, foi adicionada ao óleo vegetal a mistura de metanol e metilato de sódio, depositada no tanque para metóxido a temperatura ambiente. Neste momento, percebeu-se o decréscimo instantâneo da temperatura interna do reator para 59,8 °C. Tendo em vista que a planta foi configurada para operar em modo automático, o CLP controlou o acionamento da resistência elétrica do reator objetivando atingir e manter a temperatura programada de 65 °C durante todo o processo.

Durante a etapa de transesterificação, foram capturados os dados de temperatura mensurada no interior do reator em intervalos de 5 minutos. Estes dados são apresentados no gráfico da Figura 46.

Após atingir o tempo programado para a reação de transesterificação, o produto resultante foi transferido para o evaporador, para realizar a evaporação do álcool durante um período de 90 minutos a temperatura de 70 °C. Da mesma forma, a temperatura interna do evaporador foi capturada em intervalos de 5 minutos e os dados são apresentados no gráfico da Figura 46.

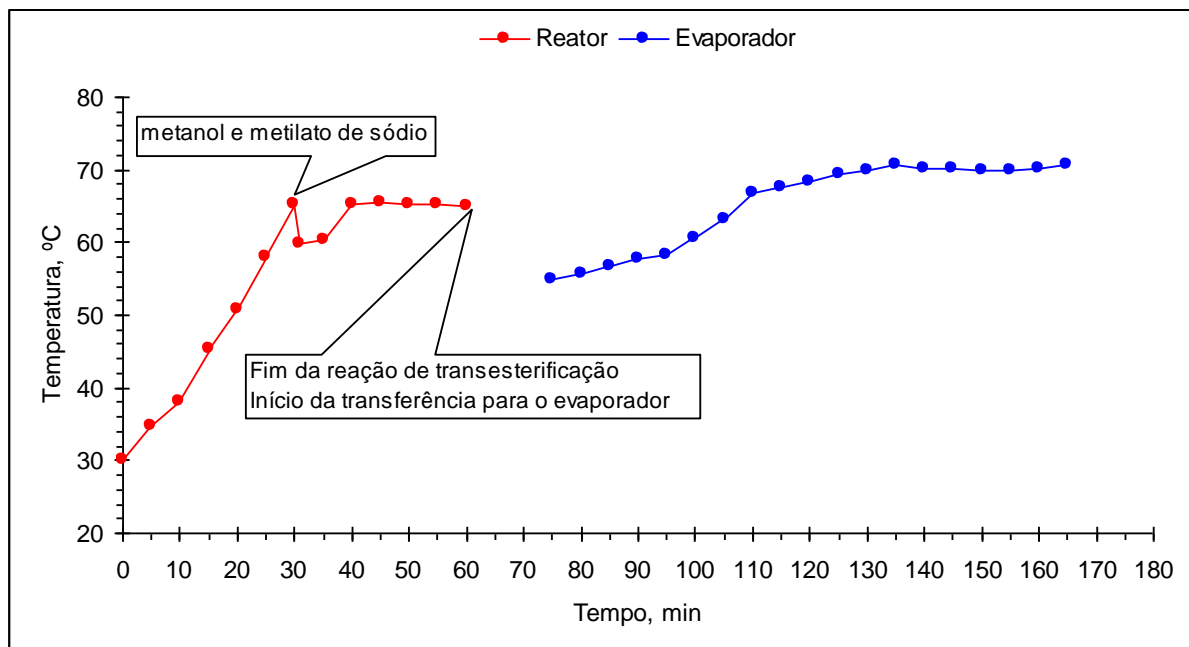


Figura 46 – Gráfico de temperatura do reator e do evaporador durante o primeiro teste.

Durante a operação de evaporação, a Bomba de Vácuo foi acionada para efetuar a captura do álcool condensado em um recipiente de 2 litros. Após os 90

minutos de operação, foram retirados 9 litros de álcool da reação, definindo uma relação média de destilação de 1 litro de álcool a cada 10 minutos de operação.

Verifica-se, através dos dados apresentados na Figura 46, que houve uma queda brusca de cerca de 10 °C na temperatura da mistura no momento da sua transferência para o evaporador. Isso se deu em virtude de vazamentos de vapor na estrutura do evaporador e da tubulação. Após a reação de evaporação atingir o tempo programado, o produto resultante foi transferido para o decantador 1.

Durante a transferência para o decantador 1, percebeu-se que a aparência do produto resultante da evaporação não condizia com o resultado esperado. Analisando o biodiesel visualmente, conclui-se que ocorreu uma reação de saponificação, o que impossibilitou a reação de transesterificação.

Isto explica também a quantidade de álcool recuperada no evaporador, tendo em vista que o álcool é consumido na reação de transesterificação para converter o óleo vegetal em biodiesel. Como ocorreu a saponificação, uma grande parcela do álcool não reagiu com o óleo e o catalisador, sendo retirada durante o processo de evaporação. A Figura 47 apresenta o resultado obtido ao final da evaporação.



Figura 47 – Saponificação resultante do primeiro teste.

Conforme salientado anteriormente por Mourad (2008), mesmo que seja utilizada uma mistura de álcool e óleo livre de água, ocorre a produção de água do meio (hidrólise). A presença desta água provoca uma reação de saponificação que acarretará na redução do rendimento do éster e na dificuldade de recuperação do glicerol.

Além disso, Quiriano (2008), Brasil (2003) e Grangeiro (2009) comentam que a matéria-prima utilizada na reação de transesterificação deve ter o mínimo de umidade e acidez, sendo que a especificidade do tratamento utilizado para este fim depende da natureza e das condições de cada produto.

Os conceitos apresentados pelos autores citados justificam a saponificação ocorrida neste teste, tendo em vista que o óleo utilizado não foi previamente analisado, estava armazenado na Incubadora há mais de 90 dias e resquícios de água poderiam estar presentes no interior do reator.

Tendo em vista que a reação de transesterificação não ocorreu conforme o esperado, o produto resultante da evaporação foi retirado da linha de produção, encerrando-se então este teste.

### 5.3.2 Teste de produção 2

Após a ocorrência de saponificação resultante do primeiro teste, foi encomendada uma nova amostra de óleo vegetal para a realização de novos testes. Para este teste, utilizou-se 100 litros de óleo de girassol refinado tipo 1, 20 litros de metanol e 1,6 litros de metilato de sódio. A planta foi configurada para atuar em modo automático, conforme valores de tempo e temperatura apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Configurações de tempo e temperatura para o Teste 2

OPERAÇÃO	CONFIGURAÇÕES
<u>REATOR</u> REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO	<b>TEMPO DE REAÇÃO:</b> 75 minutos. <b>TEMPERATURA DE REAÇÃO:</b> 65 °C.
<u>EVAPORADOR</u> REAÇÃO DE EVAPORAÇÃO DO ÁLCOOL	<b>TEMPO DE REAÇÃO:</b> 90 minutos. <b>TEMPERATURA DE REAÇÃO:</b> 70 °C.
<u>DECANTADOR 1</u> SEPARAÇÃO DE FASES	<b>TEMPO DE DECANTAÇÃO:</b> 145 minutos.
<u>LAVADOR</u> LAVAGEM DO BIODIESEL	<b>TEMPO DE LAVAGEM:</b> 30 minutos.
<u>REATOR DE SÍLICA</u> SECAGEM DO BIODIESEL	<b>TEMPO DE SECAGEM:</b> 30 minutos.

De acordo com os dados listados na Tabela 7, identifica-se a programação de reação de transesterificação durante 75 minutos a temperatura de 65 °C, sendo que a temperatura mensurada no interior do reator no início do processo indicou 28,5 °C.

Nestas condições, o tempo necessário para que o óleo vegetal atingisse 65 °C e permanecesse estável nesta temperatura foi de 30 minutos, assemelhando-se ao comportamento registrado no primeiro teste.

Ao atingir a temperatura programada, foi adicionada ao óleo vegetal a mistura de metanol e metilato de sódio, depositada no tanque para metóxido a temperatura ambiente. Neste momento, percebeu-se o decréscimo instantâneo da temperatura interna do reator para 60,5 °C. Tendo em vista que a planta foi configurada para operar em modo automático, o CLP controlou o acionamento da resistência elétrica do reator objetivando atingir e manter a temperatura programada de 65 °C durante todo o processo.

Durante a etapa de transesterificação, foram capturados os dados de temperatura mensurada no interior do reator em intervalos de 5 minutos. Estes dados são apresentados no gráfico da Figura 48.

Após atingir o tempo programado para a reação de transesterificação, o produto resultante foi transferido para o evaporador, para realizar a evaporação do álcool durante um período de 90 minutos a temperatura de 70 °C. Entretanto, durante este teste o programa do CLP realiza um pré aquecimento no evaporador, acionando sua resistência de aquecimento durante os 10 minutos finais do processo de transesterificação. Com isso, a temperatura interna do evaporador vazio atinge valores da ordem de 90 °C. A temperatura interna do evaporador foi capturada em intervalos de 5 minutos e os dados são apresentados no gráfico da Figura 48.

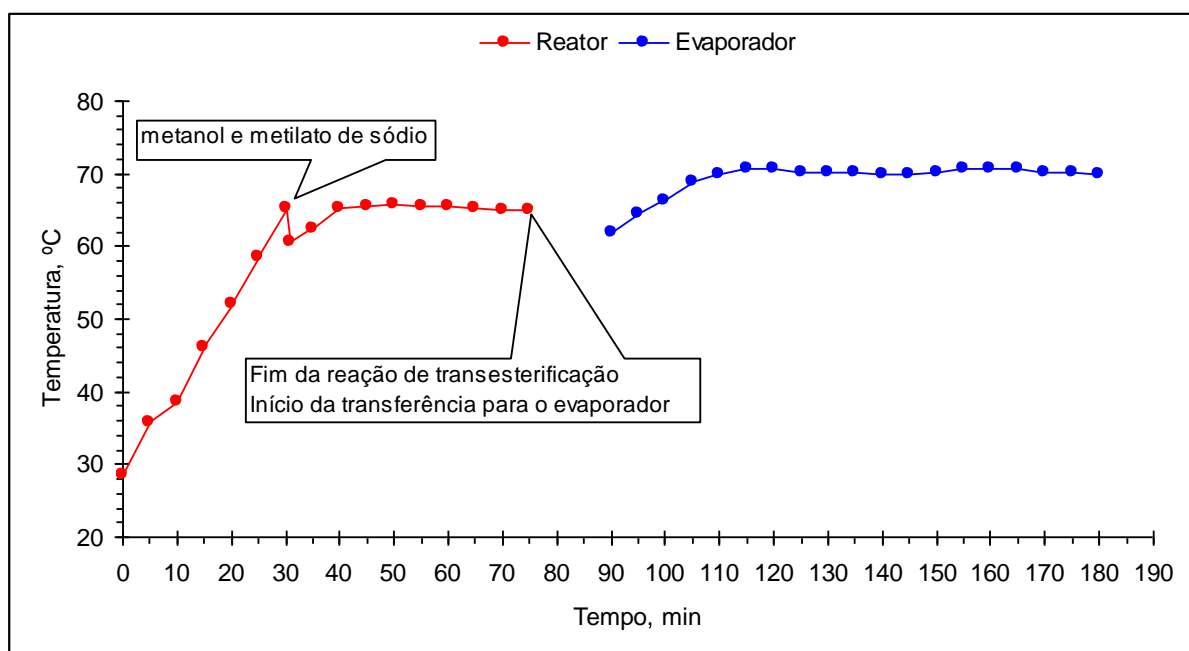


Figura 48 – Gráfico de temperatura do reator e do evaporador durante o segundo teste.

Verifica-se, através dos dados apresentados na Figura 48, que houve uma queda de cerca de 3 °C na temperatura da mistura no momento da sua transferência para o evaporador. Tendo em vista que a queda de temperatura nas mesmas condições foi de cerca de 10 °C no Teste 1, conclui-se que a rotina de pré aquecimento do evaporador é eficaz.

Contudo, ocorreram vazamentos na estrutura do evaporador, dificultando a captura do álcool proveniente da condensação. Desta vez, foram retirados somente 3,5 litros de álcool da reação. Com isso, a quantidade de álcool destilado decresce em relação ao Teste 1 (9 litros de álcool). Isto se dá também pelo fato de que a reação de transesterificação ocorreu de forma plena, ou seja, houve maior consumo de álcool durante a reação.

Ao transferir o produto resultante da evaporação para o decantador 1, percebeu-se a diferença na aparência em relação ao Teste 1. Desta vez, não ocorreu a reação de saponificação, ou seja, a reação de transesterificação foi realizada, resultando em biodiesel.

Aguardou-se então o tempo de 145 minutos de decantação, objetivando a separação do glicerol (fase inferior) do biodiesel (fase superior). Após este período, transferiu-se 45 litros de uma mistura de água e 0,5 litros de ácido fosfórico 85% para o reservatório de lavagem. Então, a fase superior do decantador 1 foi transferida ao reservatório de lavagem, onde entrou em contato com a água ácida por um período de 30 minutos.

Após o período de lavagem, o biodiesel foi transferido ao reator de sílica. Neste reator, o biodiesel resultante da lavagem reagiu com 400 ml de sílica por 30 minutos, objetivando o processo de secagem. Terminado o processo de secagem, o biodiesel foi transferido ao reservatório pulmão para armazenamento. Foi coletada uma amostra de 600 ml do biodiesel armazenado no reservatório pulmão para fins de análise em laboratório.

### **5.3.3 Teste de produção 3**

Durante a etapa de decantação do biodiesel produzido no Teste 2, foi realizada uma batelada de 100 litros de óleo de girassol refinado tipo 1, 20 litros de metanol e 1,6 litros de metilato de sódio. O objetivo principal deste teste foi determinar a eficiência de conversão do biodiesel no reator em função do tempo de reação.

Para isso, amostras do material em reação foram coletadas a cada 5 minutos, durante toda a reação de transesterificação no reator, para fins de análise cromatográfica. Da mesma forma, foi programado um tempo de 75 minutos de reação a temperatura de 65 °C. O gráfico da Figura 49 apresenta um comparativo entre os valores de temperatura interna do reator e do evaporador mensurados em períodos de 5 minutos durante os Testes 1, 2 e 3.

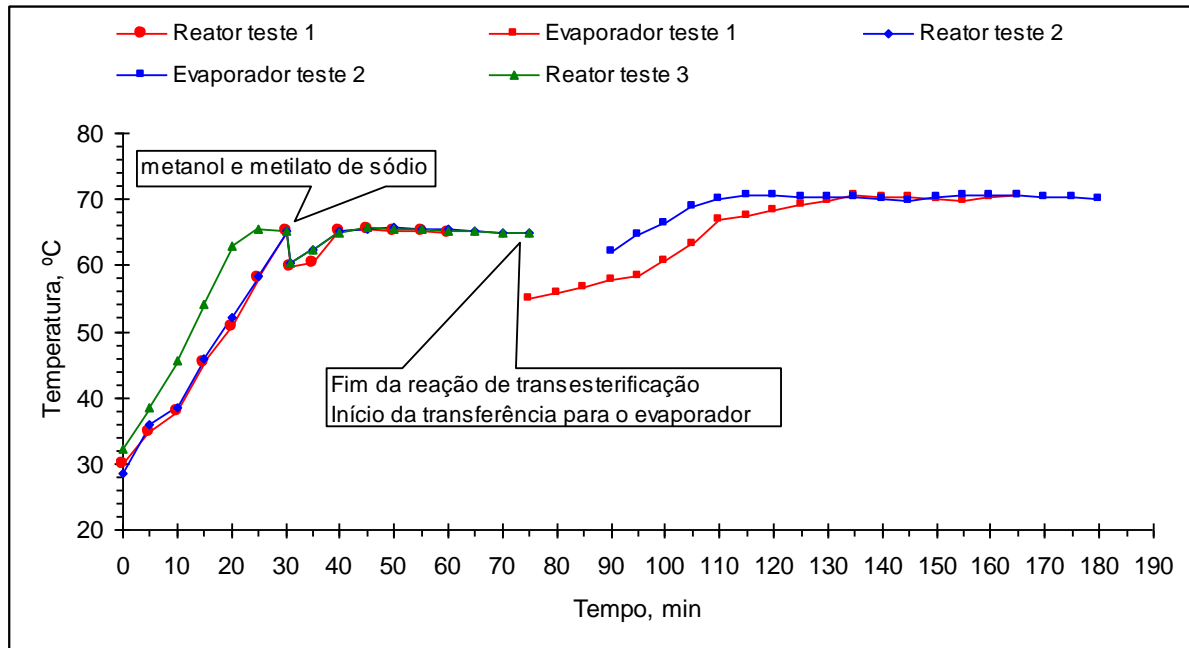


Figura 49 – Gráfico de temperatura do reator e do evaporador durante os testes.

Conforme ilustra a Figura 49, a temperatura interna do reator no início do Teste 3 atingiu 32,3 °C, superior às temperaturas iniciais dos demais testes, em virtude de que o Teste 2 havia sido realizado há pouco mais de 2 horas. Durante este período de espera entre os testes, a temperatura reduziu lentamente, permanecendo na faixa dos 32,3 °C. Com isso, o aquecimento da mistura no reator no Teste 3 ocorreu de forma mais rápida, apresentando uma curva com comportamento uniforme em comparação aos demais testes após a adição do metanol com o metilato de sódio.

Após a reação de transesterificação, o biodiesel resultante permaneceu em repouso no reator para efetuar a separação de fases e posterior evaporação do álcool no evaporador. Entretanto, o Teste 3 deu-se por encerrado após a coleta das amostras.



#### 5.4 Qualidade do biodiesel produzido

O acompanhamento da conversão do óleo ao longo do tempo é fundamental para obter-se a cinética da reação necessária para os estudos de otimização do processo de produção do biodiesel.

As análises realizadas no biodiesel produzido tiveram como objetivo principal identificar a conversão deste, no reator, em função do tempo de reação de 75 minutos, a uma temperatura de 65 °C e velocidade de agitação 474 rpm.

A Figura 50 permite visualizar os sinais de mono, di e triacilglicerídeos característicos do óleo de girassol utilizado como matéria prima para a produção do biodiesel e o sinal de nos tempos 5, 10, 15 e 20 minutos de reação já apresentam a ausência destes picos característicos e indicam o sinal de biodiesel já na amostra coletada 5 minutos após o início da reação.

Estes resultados podem direcionar para a possibilidade de reduzir o tempo de reação, e por consequência, os custos de operação do sistema, de 45 minutos para 10 minutos (5 minutos de reação mais 5 minutos de margem de segurança).

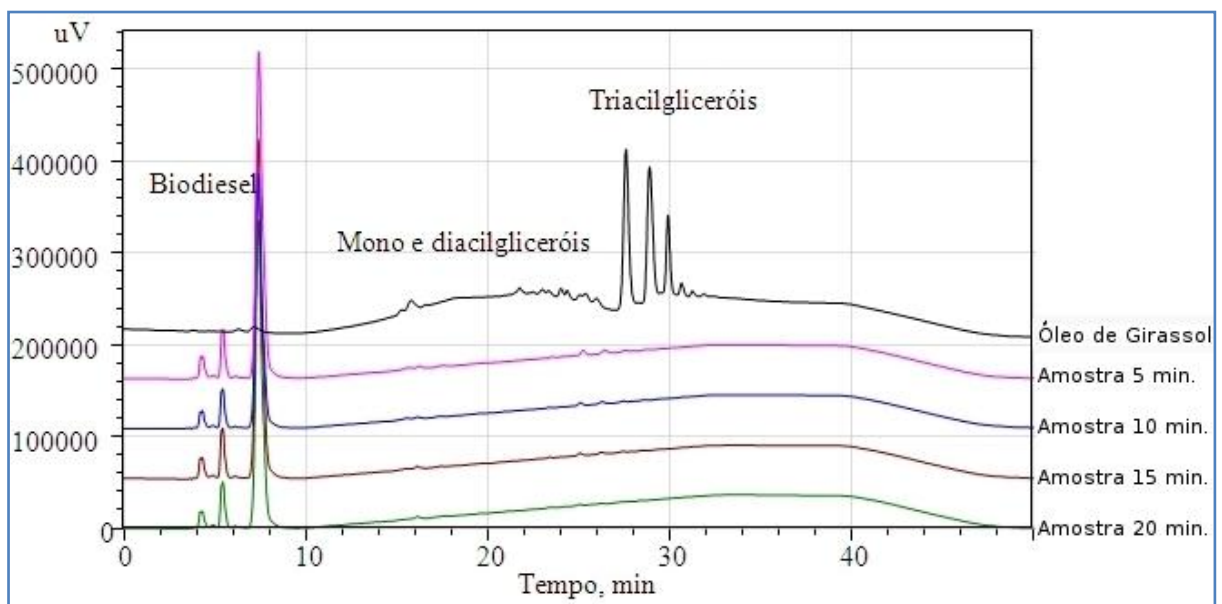


Figura 50 – Gráfico de análise de cromatografia da reação de transesterificação.

Da mesma forma, nos espectros de MIR das amostras de biodiesel coletadas nos tempos 5, 10, 15 e 20 minutos de reação, percebe-se o alto grau de similaridade que existe entre as amostras (figuras 51 e 52).

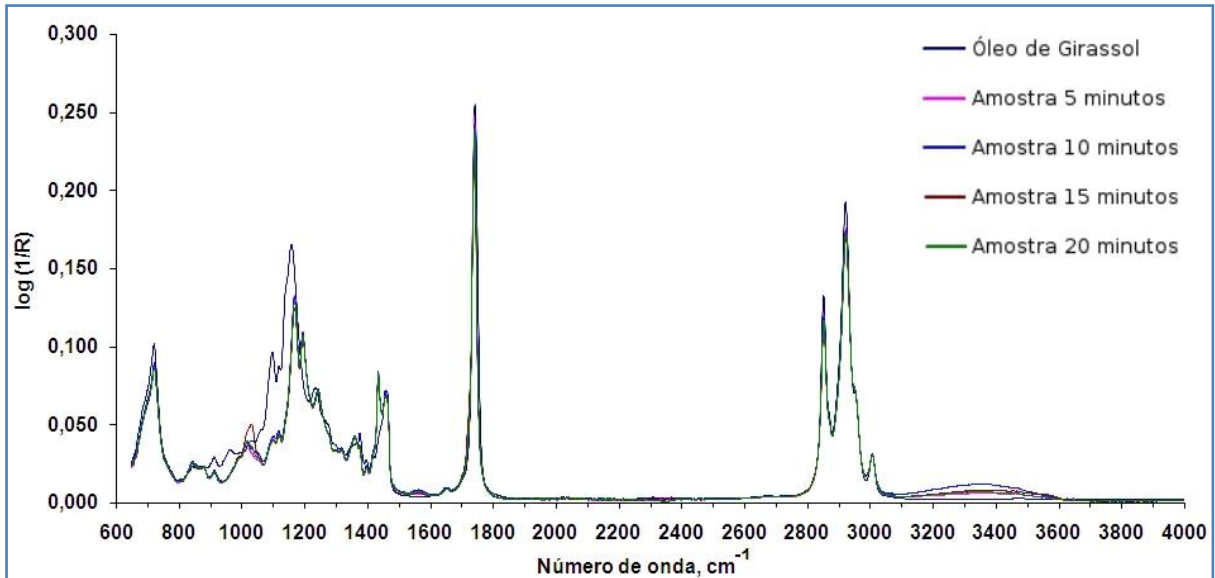


Figura 51 – Espectros de MIR das amostras no intervalo entre 650 e 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

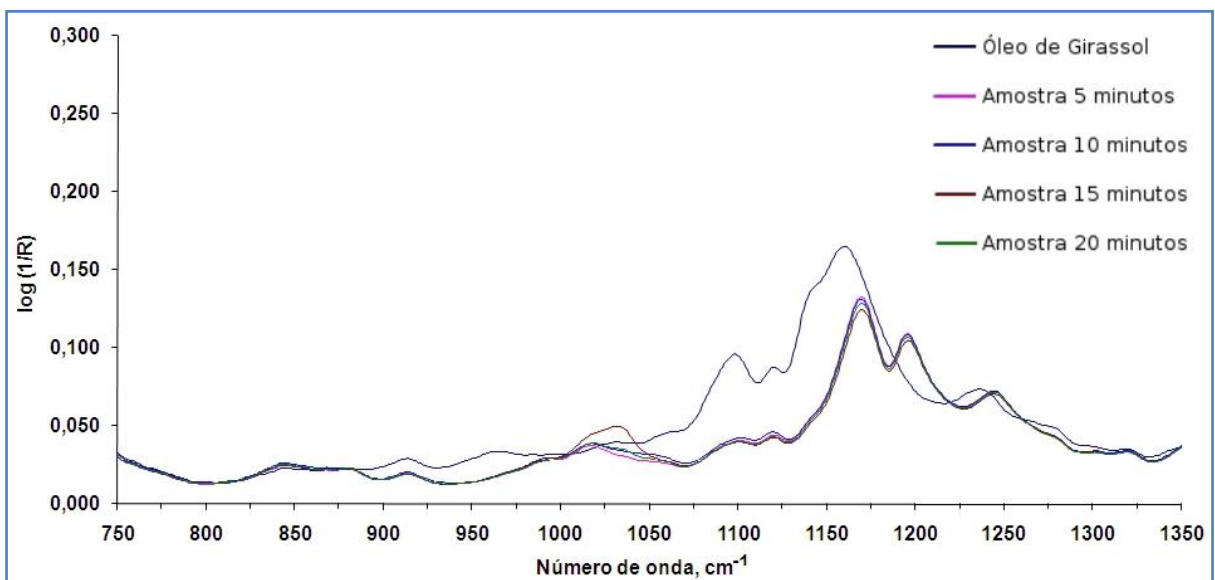


Figura 52 – Espectros de MIR das amostras no intervalo entre 750 e 1350  $\text{cm}^{-1}$ .

Observa-se, também, que a diferença principal entre os espectros de infravermelho do óleo de girassol e do biodiesel produzido ocorre na região entre 750 e 1350  $\text{cm}^{-1}$  (região de impressão digital), permitindo identificar a formação de três bandas próximas em 1250, 1205 e 1175  $\text{cm}^{-1}$ , características de éster metílico (ALISKE, 2010) e, a redução da banda em 1100 e 1150  $\text{cm}^{-1}$ , atribuídas a deformações axiais da ligação C-O, indicando a transesterificação do óleo.

## 5.5 Análise das condições ideais de operação

Analisando o gráfico da Figura 49, o qual lista os dados de temperatura interna do reator coletados em períodos de 5 minutos durante os Testes 1, 2 e 3 respectivamente, percebe-se um comportamento semelhante na curva de aquecimento da mistura. Verifica-se também que o tempo de 30 minutos é suficiente para aquecer a mistura a uma temperatura de 65 °C, tendo por base uma temperatura ambiente de 28 °C ou superior.

Por sua vez, o gráfico apresentado na Figura 50 demonstra que a reação de transesterificação ocorreu em 5 minutos de operação no reator. Com base nesta análise, definiu-se o tempo de 10 minutos para esta reação, visando uma margem de erro para diferentes matérias-primas.

Com base nos resultados obtidos, foram definidas as seguintes condições de operação para a planta, conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8 – Condições ideais de operação

<b>OPERAÇÃO</b>	<b>CONFIGURAÇÕES</b>
<u>BOMBA DE ÓLEO</u> TRANSFERÊNCIA DO ÓLEO PARA O REATOR	<b>TEMPO DE OPERAÇÃO:</b> 2 minutos e 36 segundos.
<u>REATOR</u> REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO	<b>TEMPO DE REAÇÃO:</b> 40 minutos. <b>TEMPERATURA DE REAÇÃO:</b> 65 °C.
<u>EVAPORADOR</u> REAÇÃO DE EVAPORAÇÃO DO ÁLCOOL	<b>TEMPO DE REAÇÃO:</b> 90 minutos. <b>TEMPERATURA DE REAÇÃO:</b> 70 °C.
<u>DECANTADOR 1</u> SEPARAÇÃO DE FASES	<b>TEMPO DE DECANTAÇÃO:</b> 120 minutos.
<u>LAVADOR</u> LAVAGEM DO BIODIESEL	<b>TEMPO DE LAVAGEM:</b> 30 minutos.
<u>REATOR DE SÍLICA</u> SECAGEM DO BIODIESEL	<b>TEMPO DE SECAGEM:</b> 30 minutos.

Com isso, tem-se que o tempo total necessário para a realização de uma batelada de biodiesel utilizando a mistura de 100 litros de óleo de girassol refinado tipo 1, 20 litros de metanol e 1,6 litros de metilato de sódio, é de aproximadamente 5 horas e 13 minutos.

Além disso, percebe-se também que a operação de evaporação do álcool contempla o gargalo de produção da planta. Tendo em vista que esta operação necessita de 90 minutos para concluir e que o tempo de decantação é de 120

minutos, descarta-se a necessidade de utilização de quatro decantadores como consta no projeto, pois somente dois decantadores serão utilizados simultaneamente em caso de produção contínua.

Para determinar o custo de operação da planta, multiplica-se o consumo total dos equipamentos pela tarifa vigente aplicada pela concessionária de energia elétrica. Tendo em vista que o valor do kWh cobrado pela concessionária de energia elétrica AES-SUL corresponde a R\$ 0,31 (ANEEL, 2012), somando-se o consumo de energia elétrica dos principais atuadores da planta durante o período de uma batelada (Tabela 8), obtém-se um custo médio de operação de R\$ 4,85 por batelada.

É importante salientar que este custo pode variar de acordo com as ações tomadas pelo operador durante o processo de fabricação de biodiesel. Para garantir uma operação automática e segura, é necessário implementar algumas mudanças na planta, conforme será discutido na próxima seção.

## **5.6 Análise de custos da planta**

De acordo com os dados fornecidos pelas empresas Startup Automação Industrial LTDA e Sur Engenharia e Máquinas, pôde-se discriminar o montante investido na construção e na automação da planta, conforme os itens listados na Tabela 9. Os valores investidos não são apresentados, pois não representam os custos da planta em si, mas sim de todo o processo de desenvolvimento do sistema de automação e otimização das condições de operação, assim não representando de forma significativa o valor de comercialização da planta.

Apesar disto, na Tabela 9 consta o peso percentual de cada item no orçamento da planta de produção de biodiesel.

Tabela 9 – Discriminação de valores investidos na planta

Itens	Componentes	Descrição	Qtde.	Peso (%)
M O N T A G E M	Reator	Estrutura do Reator	1	5,10
	Reservatório de Metóxido	Anexo ao Reator	1	0,88
	Evaporador	Estrutura do Evaporador	1	5,56
	Decantador	Estrutura do Decantador	1	2,21
	Reservatório de Lavagem	Estrutura do Reservatório de Lavagem	1	3,23
	Reservatório de Água Ácida	Anexado ao Reservatório de Lavagem	1	1,01
	Reator de Sílica	Estrutura do Reator de Sílica	1	4,59
	Reservatório Pulmão	Estrutura do Reservatório Pulmão	1	2,86
	Mão-de-Obra	Construção e Instalação da Planta	1	44,10
A C I O N A M E N T O S	Válvulas Manuais	Válvula para transferência do produto da reação.	16	3,47
	Válvulas Manuais	Válvula de 3 Vias	1	0,13
	Válvulas Manuais	Válvula para retirada de amostras	4	0,42
	Válvulas Manuais	Válvula de drenagem	1	0,12
	Bombas Centrífugas	Transferência do Biodiesel	4	6,58
	Motoredutores	Agitadores do Reator, Evaporador e Reator de Sílica	3	7,02
	Resistências de Aquecimento	Aquecimento do Reator e do Evaporador	2	0,87
A U T O M A Ç Ã O	Quadro de Comando	Material para montagem do quadro de comando	1	7,26
	Sensores Indutivos	Sensores para verificação do estado das válvulas manuais	6	0,31
	Pt-100	Sensores de temperatura do Reator e do Evaporador	2	0,24
	Sensores de Nível	Sensores para controle de nível	8	0,43
	Mão-de-Obra	Montagem e instalação do quadro de comando	1	3,64

Analisando os valores apresentados, constata-se que foi investido um montante total composto pela soma do custo de fabricação da planta e do custo de automação da mesma. Tendo em vista essas informações, verifica-se que o valor investido na automação corresponde a 11,88% do custo total da planta.

Conforme demonstrado nos resultados apresentados anteriormente, a automação da planta proporcionou uma operação eficiente e segura, atingindo os objetivos propostos neste trabalho. Entretanto, a planta ainda necessita de intervenções humanas durante o processo de fabricação de biodiesel, o que pode afetar a repetibilidade dos resultados.

O ponto crítico que impossibilita o controle automático total da planta é a utilização de válvulas manuais para controlar o fluxo de produto. O conjunto de

válvulas manuais utilizadas equivale a um custo de 4,13 % do investimento total da planta.

Uma solução alternativa consiste na substituição destas por válvulas de acionamento elétrico por solenóide, as quais podem ser controladas diretamente pelo CLP, descartando a necessidade dos sensores indutivos que compreendem um custo total equivalente a 0,31 % do investimento total da planta.

Em conjunto com a utilização de válvulas solenóide, sugere-se a implantação de um sistema de pesagem por células de carga no reator. As células de carga informam ao CLP o peso contido no reator em tempo real, proporcionando maior precisão e, conseqüentemente, repetibilidade na dosagem dos produtos, além de permitir a configuração de valores de dosagem para diferentes receitas de produto.

Para fins de custeio destas implementações, pode-se utilizar o valor recuperado na redução do número de decantadores sugerida na seção 5.5. Com isso, o número de válvulas do decantador seria reduzido em seis unidades e seriam descartados dois sensores de nível. A Tabela 10 apresenta a discriminação dos possíveis valores percentuais da planta, caso sejam aplicadas essas sugestões.

Tabela 10 – Discriminação de valores investidos na planta após modificação

Itens	Componentes	Descrição	Qtde.	Peso (%)
M O N T A G E M	Reator	Estrutura do Reator	1	5,10
	Reservatório de Metóxido	Anexo ao Reator	1	0,88
	Evaporador	Estrutura do Evaporador	1	5,56
	Decantador	Estrutura do Decantador	1	1,10
	Reservatório de Lavagem	Estrutura do Reservatório de Lavagem	1	3,23
	Reservatório de Água Ácida	Anexado ao Reservatório de Lavagem	1	1,01
	Reator de Sílica	Estrutura do Reator de Sílica	1	4,59
	Reservatório Pulmão	Estrutura do Reservatório Pulmão	1	2,86
	Mão-de-Obra	Construção e Instalação da Planta	1	41,81
A C I O N A M E N T O S	Válvulas Solenóide	Válvula para transferência do produto da reação.	10	9,39
	Válvulas Manuais	Válvula de 3 Vias	1	0,13
	Válvulas Manuais	Válvula para retirada de amostras	4	0,42
	Válvulas Manuais	Válvula de drenagem	1	0,12
	Bombas Centrífugas	Transferência do Biodiesel	4	6,58
	Motoredutores	Agitadores do Reator, Evaporador e Reator de Sílica	3	7,02
	Resistências de Aquecimento	Aquecimento do Reator e do Evaporador	2	0,87
A U T O M A Ç Ã O	Quadro de Comando	Material para montagem do quadro de comando	1	7,26
	Pt-100	Sensores de temperatura do Reator e do Evaporador	2	0,24
	Sensores de Nível	Sensores para controle de nível	6	0,32
	Mão-de-Obra	Montagem e instalação do quadro de comando	1	3,64

Constata-se que haveria um incremento de 2,1% em relação ao custo atual da planta, caso fossem implementadas as modificações sugeridas nesta seção.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento da automação de uma planta de manufatura de biodiesel com capacidade de processamento de até 100 litros de óleo por batelada em rota metálica, para fins de utilização em propriedades rurais. Esta planta, instalada atualmente nas dependências da Incubadora da UNISC – ITUNISC, foi concebida pela empresa Sur Engenharia e Máquinas, embasada no trabalho de Kaercher (2009) e automatizada pelo autor deste trabalho em conjunto com a empresa Startup Automação Industrial.

Primeiramente, foram analisadas diferentes possibilidades de desenvolvimento de uma solução eficiente para a produção de biodiesel, adequada à estrutura mecânica previamente concebida. Definidos os componentes para a automação, foram realizadas as etapas de desenvolvimento do projeto elétrico, aquisição de componentes, montagem e instalação do quadro de comando na estrutura da planta.

Durante a execução deste trabalho, foram efetuadas diversas modificações na estrutura mecânica e hidráulica da planta em virtude da identificação de inconsistências em seus componentes ao longo do tempo, postergando assim a conclusão da etapa de automação e, conseqüentemente, a realização dos testes de produção.

Após a conclusão da automação da planta, foram realizados três testes de produção. Salvo o primeiro teste, o qual resultou em reação saponificada, durante os demais testes foi possível produzir biodiesel. O biodiesel resultante desses testes foi coletado e posteriormente analisado em laboratório. Foram realizadas três bateladas de teste utilizando 100 litros de óleo, 20 litros de metanol e 1,6 litros de metilato de sódio.

A eficiência de conversão do óleo vegetal em biodiesel foi monitorada por HPLC (*High-Performance Liquid Chromatography*) e por ATR-FTIR (Reflexão Total Atenuada no Infravermelho com Transformada de Fourier). Os resultados confirmaram a conclusão da reação de transesterificação do óleo vegetal, cinco minutos após seu início. A partir dos testes realizados, em conjunto com o resultado proveniente das análises, foi possível definir os valores ideais para as variáveis de tempo e temperatura inerentes ao processo.

Além destes critérios, constatou-se que o investimento realizado na automação da planta representa somente 11,88% do valor total de aquisição da mesma,



tornando-se uma opção viável em relação aos resultados obtidos, pois permite ao operador controlar os principais acionamentos da planta de forma manual e automática com segurança e visualizar as variáveis de tempo e temperatura inerentes ao processo em tempo real.

Em virtude dos fatos mencionados, conclui-se que a automação desenvolvida durante este trabalho tornou o processo de produção de biodiesel eficiente, seguro e atingiu os requisitos de qualidade almejados para o produto final.

Diante destas considerações e dos resultados apresentados neste trabalho, o sistema foi considerado adequado para as determinações propostas, podendo ser instalado em propriedades rurais ou cooperativas para produção própria de biodiesel. Contudo, a automação da planta pode ser incrementada, resultando em aumento de produtividade e segurança ao operador. O principal ponto de interesse para futuras melhorias consiste na substituição das válvulas manuais por válvulas com acionamento elétrico por solenóide, permitindo assim o controle de fluxo automático via CLP e reduzindo as interferências por parte do operador.

Complementando as válvulas, seria válido instalar um sistema de pesagem por células de carga na estrutura do reator, objetivando a dosagem automática dos produtos durante a reação de transesterificação, garantindo repetibilidade e confiança nas medições através do CLP.

Por fim, analisando o comportamento da planta durante os testes de produção, percebeu-se que o gargalo do processo encontra-se na etapa de evaporação. Tendo em vista que a soma dos tempos de reação de transesterificação e evaporação do álcool superam o tempo de decantação de uma batelada, sugere-se utilizar um conjunto de 2 decantadores. Com isso, além da estrutura necessária, 6 válvulas manuais e 2 sensores de nível seriam removidos. Sendo assim, o valor resgatado destes componentes poderia ser investido nas implementações sugeridas.

## REFERÊNCIAS

- ALISKE, M. A. **Medidas de Espectroscopia no Infravermelho Médio para a Determinação do Teor de Biodiesel em Óleo Diesel**. 2010. 100f. Dissertação (Engenharia e Ciência dos Materiais – Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- ANEEL. **Tarifas Residenciais Vigentes**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 29 jan. 2012.
- BEGA, E. A. et al. **Instrumentação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência LTDA, 2006.
- BHS. **Sensores de Proximidade Indutivos LM/XM**. Disponível em: <<http://www.bhseletronica.com.br/downloads/Catalogo%20sensor%20indutivo%20LM.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2012.
- BIODIESELBR. **Comissão aprova fim do registro de biodiesel para consumo próprio**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/comissao-aprova-fim-registro-biodiesel-consumo-proprio-04-11-08.htm>>. Acesso em: 20 set. 2010.
- BIODIESELBR. **Outras Etapas do Processo de Produção de Biodiesel**. Disponível em:<<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/processo-producao/outras-etapas.htm>>. Acesso em: 29 out. 2010.
- BOLTON, W. **IEC 61131-3: Programmable Logic Controllers**. 4. ed. Oxford: Editora Elsevier, 2007.
- BRANDÃO, K. S. R.; SILVA, F. C.; LOUZEIRO, H. C.; SOUZA, A. G.; CONCEIÇÃO, M. M.; MOURA, K. R. M. **Produção de Biodiesel por Transesterificação do Óleo de Soja com Misturas de Metanol-Etanol**. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 1º, 2006, Brasília, Brasil, Anais, p.141-146, 2006. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/producao/Biodiesel10.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2010.
- BRASIL. Lei n. 11.116, de 18 de maio de 2005. **Dispõe sobre o Registro Especial, na Secretaria da Receita Federal do Ministério da Fazenda, de produtor ou importador de biodiesel e sobre a incidência da Contribuição para o PIS/Pasep e da Cofins sobre as receitas decorrentes da venda desse produto**. Diário Oficial [da] Federação da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 mai. 2005. Disponível em:< <http://www.camara.gov.br/sileg/integras/558639.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2010.
- BRASIL. **O Biodiesel e a inclusão social**. Série estudos científicos e tecnológicos n. 1 24p. Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2003. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/internet/diretoria/caeat/conteudo/07020.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2010.
- BRASIL. Resolução ANP Nº 07, de 19 de mar. 2008. Estabelece a especificação do biodiesel. **Diário oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 mar. 2008. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm\\$3.0\\$q=\\$x=\\$nc\\$](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates$fn=document-frame.htm$3.0$q=$x=$nc$)>. Acesso em: 23 nov. 2010.
- CARULO, Marcelle F. **Desenvolvimento e Implementação de Controlador Fuzzy Aplicado à Produção de Biodiesel**. 2008. 196 f. Dissertação (Sistemas de Processos Químicos e Informática – Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em:<<http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000446607&fd=y>>. Acesso em: 23 nov. 2010.
- COOMBS, Clyde F. Jr. **Electronic Instrument Handbook**. 3. ed.: Editora McGraw-Hill, 2000.
- COSTA, B. J.; OLIVEIRA, S. M. M. de. **Dossiê Técnico – Produção de Biodiesel**. Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas – Instituto de Tecnologia do Paraná, nov. 2006. Disponível em: <[http://www.facabiodiesel.com.br/biodiesel/arquivos/Producao\\_de\\_biodiesel\\_Dossie\\_Tecnico.pdf](http://www.facabiodiesel.com.br/biodiesel/arquivos/Producao_de_biodiesel_Dossie_Tecnico.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2010.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; McCONNEL, K. G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

DANTAS, Carolina M. **Desenvolvimento de um protótipo de garra instrumentada para a soldagem robotizada em eletrodo revestido**. 2006. 101 f. Dissertação (Engenharia Mecânica – Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006. Disponível em: <<http://www.dominio publico.gov.br/download/cp03019 .pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2011.

DE BONI, L. A. B.; GOLDANI, E.; MILCHAREK, C. D.; SANTOS, F. A. Dos. **Tratamento Físico-Químico da Água de Lavagem Proveniente da Purificação do Biodiesel**. In Periódico Tchê Química, vol. 4, nº 7 – jan. 2007. Porto Alegre – RS. Disponível em: <[http://bdtb.biblioteca.ufpb.br/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=513](http://bdtb.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=513)>. Acesso em: 24 nov. 2010.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern Control Systems**. 11. ed. New Jersey: PEARSON Prentice Hall, 2008.

FACCINI, Candice S. **Uso de Adsorventes na Purificação de Biodiesel de Óleo de Soja**. 2008. 81 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química – Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/15264/000672930.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 nov. 2010.

FRADEN, Jacob. **Handbook of Modern Sensors – Physics, Designs and Applications**. 3. ed. New York: Editora LLC, 2004.

FRANCHI, Claiton M. **Controladores Lógicos Programáveis – Sistemas Discretos**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica LTDA, 2009.

FRANCHI, Claiton M. **Controle de Processos Industriais – Princípios e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica LTDA, 2011.

GERIS, R.; SANTOS, N. A. C. dos; AMARAL, B. A.; MAIA, I. de S.; CASTRO, V. D.; CARVALHO, J. R. M. **Biodiesel de Soja – Reação de Transesterificação para Aulas Práticas de Química Orgânica**. Revista Química Nova, vol. 30, nº. 5, 2007.

GHESTI, Grace F. **Estudo de Catalisadores para Obtenção de Biodiesel por Transesterificação e Determinação do Rendimento por Espectroscopia Raman**. 2006. 117 f. Dissertação (Química – Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <[http://bdtb.bce.unb.br/tesdesimplificado/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=1438](http://bdtb.bce.unb.br/tesdesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1438)>. Acesso em: 29 out. 2010.

GRANGEIRO, Rosa V. G. **Caracterização da água de lavagem proveniente da purificação do biodiesel**. 2009. 56 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química – Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. Disponível em: <[http://bdtb.biblioteca.ufpb.br/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=513](http://bdtb.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=513)>. Acesso em: 21 nov. 2010.

HEINZE, Luis C. Projeto de Lei n. 3.336, de 28 de abril de 2008. **Altera a Lei nº 11.116, de 18 de maio de 2005, para incentivar a produção de biocombustível para o consumo do próprio produtor rural e de associados de cooperativas agropecuárias**. Câmara dos Deputados, Brasília, DF, 28 abr. 2008. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/558474.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2010.

ICOS. **LA26M-40 Sensor de Nível para Líquidos – Folha de Dados**. Disponível em: <[http://www.icos.com.br/Pdf/fd\\_la26m.pdf](http://www.icos.com.br/Pdf/fd_la26m.pdf)>. Acesso em: 07 jan. 2012.

JOHN, Karl-Heinz; TIEGELKAMP, Michael. **IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems**. 1. ed. Berlin: Editora Springer-Verlag, 2001.

JULIATO, Angelo. **Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola**. 2006. 146 f. Dissertação (Agronomia – Mestrado) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-05032007-153037/pt-br.php>>. Acesso em: 29 out. 2010.

KAERCHER, Jonas Á. **Produção de biodiesel em escala piloto e avaliação dos impactos ambientais**. 2009. 68 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2009. Disponível em: <[http://www.unisc.br/cursos/pos\\_graduacao/mestrado/ppgta/dissertacoes/2009/jonas\\_alvaro\\_kaercher.html](http://www.unisc.br/cursos/pos_graduacao/mestrado/ppgta/dissertacoes/2009/jonas_alvaro_kaercher.html)>. Acesso em: 13 set. 2010.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. **Manual de Biodiesel**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

LIMA NETO, A. F.; SANTOS, L. S. S.; MOURA, E. M.; MOURA, C. V. R. **Biodiesel de Mamona Obtido Por Via Etílica**. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 1º, 2006, Brasília, Brasil, Anais, p.96-100, 2006. Disponível em: <[http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/producao/Via\\_Etilica03.pdf](http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/producao/Via_Etilica03.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2010.

LIMA, Paulo C. R. **O Biodiesel e a Inclusão Social**. Estudo – Consultoria Legislativa, mar. 2004. Disponível em: <[http://www2.camara.gov.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/tema16/H-Coord\\_Legislativa-Setex-Internet-2004\\_676.pdf](http://www2.camara.gov.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/tema16/H-Coord_Legislativa-Setex-Internet-2004_676.pdf)>. Acesso em: 22 nov. 2010.

LOURES, Rodrigo R. **Relatório da Comissão de Finanças e Tributação: Projeto de Lei nº 3.336, de 2008**. Câmara dos Deputados, Brasília, DF, 07 abr. 2010. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/752668.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2010.

McCORMIK, R.L. et al. **Survey of the quality and stability of biodiesel and biodiesel blends in the United States in 2004 – NREL/TP-540-038836**. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, Estados Unidos, 2005. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/38836.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2011.

MEHER, L. C., SAGAR, D. V., NAIK, S. N. **Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 10, p. 248 – 268, 2006. Disponível em: <<http://www.eprint.iitd.ac.in:8080/bitstream/2074/1497/1/mehertec2006.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2012.

METALÚRGICA MBRURAL LTDA. **Homepage da empresa Metalúrgica MBRural LTDA**. Disponível em: <<http://www.mbrural.com/>>. Acesso em 01 dez. 2010.

MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, K.; MCGHEE, J. **Temperature Measurement**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

MORAES, C. C. de.; CASTRUCCI, P. de L. **Engenharia de Automação Industrial**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MOURAD, Anna L. **Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel obtido a partir da Soja**. 2008. 141 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000445752>>. Acesso em: 22 nov. 2010.

NANOELF BIODIESEL. **Homepage da empresa Nanoelf Biodiesel**. Disponível em: <<http://biodiesel.nanoelf.co.za/index.htm>>. Acesso em: 01 dez. 2010.

NATIONAL BIODIESEL BOARD. **Specification for biodiesel (B100) – ASTM D6751-09**. 2008. Disponível em: <[http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/BDSpec.PDF](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BDSpec.PDF)>. Acesso em: 29 out. 2010.

NOVUS. **Transmissores de Temperatura**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaID=809392&SubsecaID=0>>. Acesso em: 28 dez. 2011.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

OLIVEIRA, Jeferson S. de. **Avaliação da qualidade de biodiesel por espectroscopias FTIR e FTNIR associadas à quimiometria**. 2007. 81 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química – Mestrado) Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <[http://e-groups.unb.br/iq/pg/dissertacoes/trabalhos/jefferson\\_saraiva.pdf](http://e-groups.unb.br/iq/pg/dissertacoes/trabalhos/jefferson_saraiva.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2010.

OLIVEIRA, Sibeles V. de. **Os Custos da Transação da Cadeia Produtiva do Biodiesel à Base de Soja no Rio Grande do Sul: Impactos sobre a gestão das cadeias de suprimentos das usinas instaladas**. 2010. 156 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Extensão Rural – Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: <[http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=2977](http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2977)>. Acesso em: 22 nov. 2010.

PARENTE, Expedito J. de S. **BIODIESEL: Uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**. 66 f. 2003. Fortaleza – CE. Disponível em: <<http://www.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2008/01430.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2010.

PHILLIPS, C. L.; HARBOR, R. D. **Sistemas de Controle e Realimentação**. 1. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996.

PIRES, J. Norberto. **Automação Industrial**. 3. ed. Lisboa: ETEP, 2007.

PLANETA BIODIESEL. **Homepage da empresa Planeta Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.drfotos.com/planetabiodiesel/index.htm>>. Acesso em: 01 dez. 2010.

QUIRIANO, Tatianne A. **Desenvolvimento de Metodologia para Coleta de Óleo de Fritura e Transformação em Biodiesel**. 2008. 116 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2008. Disponível em: <[http://tede.unaerp.br/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=183](http://tede.unaerp.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=183)>. Acesso em: 23 nov. 2010.

RESISTEC. **Categoria de Produtos – Aquecimento de Líquidos e Banhos**. Disponível em: <<http://www.resistec.com.br/i8/produtosDescricao.php?categoria=Resist%EAncias%20EI%E9tricas&codCat=61&codSub=137&subCategoria=Aquecimento%20de%20L%C3%ADquidos%20e%20Banhos&codProduto=312>>. Acesso em: 06 jan. 2012.

ROCHA, D. de Q.; BARROS, D. K.; COSTA, E. J.; SOUZA, K. S. de; PASSOS, R. R.; JUNIOR, V. F.; CHAAR, J da S. **Determinação da matéria-prima utilizada na produção do biodiesel adicionado ao diesel mineral através de monitoramento seletivo de íons**. Revista Química Nova, vol. 31, nº. 5, 2008.

ROCKWELL AUTOMATION. **Programmable Controllers**. Disponível em: <<http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/>>. Acesso em: 04 jan. 2012.

RODRIGUES, Rafael C. **Síntese de biodiesel através de transesterificação enzimática de óleos vegetais catalisada por lipase imobilizada por ligação covalente multipontual**. 2009. 183 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/15447>>. Acesso em: 29 out. 2010.

SALA, José A. **Desempenho de um motor diesel de injeção indireta em função da variação do teor de biodiesel**. 2008. 90 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <[http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=2253](http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2253)>. Acesso em: 29 out. 2010.

SECRETARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis**, nº 31 – jul. 2010. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/spg/menu/publicacoes.html>>. Acesso em: 17 set. 2010.

SECRETARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis**, nº 32 – ago. 2010. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/spg/menu/publicacoes.html>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E GESTÃO DO RIO GRANDE DO SUL. **Fontes Alternativas de Energia**. Disponível em: <<http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/atlas.asp?menu=646>>. Acesso em: 10 set. 2010.

SEW-EURODRIVE. **Redutores e Motoredutores**. Disponível em: <[http://br.sew-eurodrive.com/support/documentation\\_result.php?gruppen\\_id=A11#F](http://br.sew-eurodrive.com/support/documentation_result.php?gruppen_id=A11#F)>. Acesso em 02 jan. 2012.

SIEMENS. **Catálogo LOGO 2009**. 8f. 2009.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2002.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: Editora Érica LTDA, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Clean Cities Fact Sheet - Biodiesel Blends**. Abr. 2005, 2f. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37136.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2010.

UTAH BIODIESEL SUPPLY. **Homepage da empresa Utah Biodiesel Supply**. Disponível em: <<http://www.utahbiodieselsupply.com/>>. Acesso em: 01 dez. 2010.

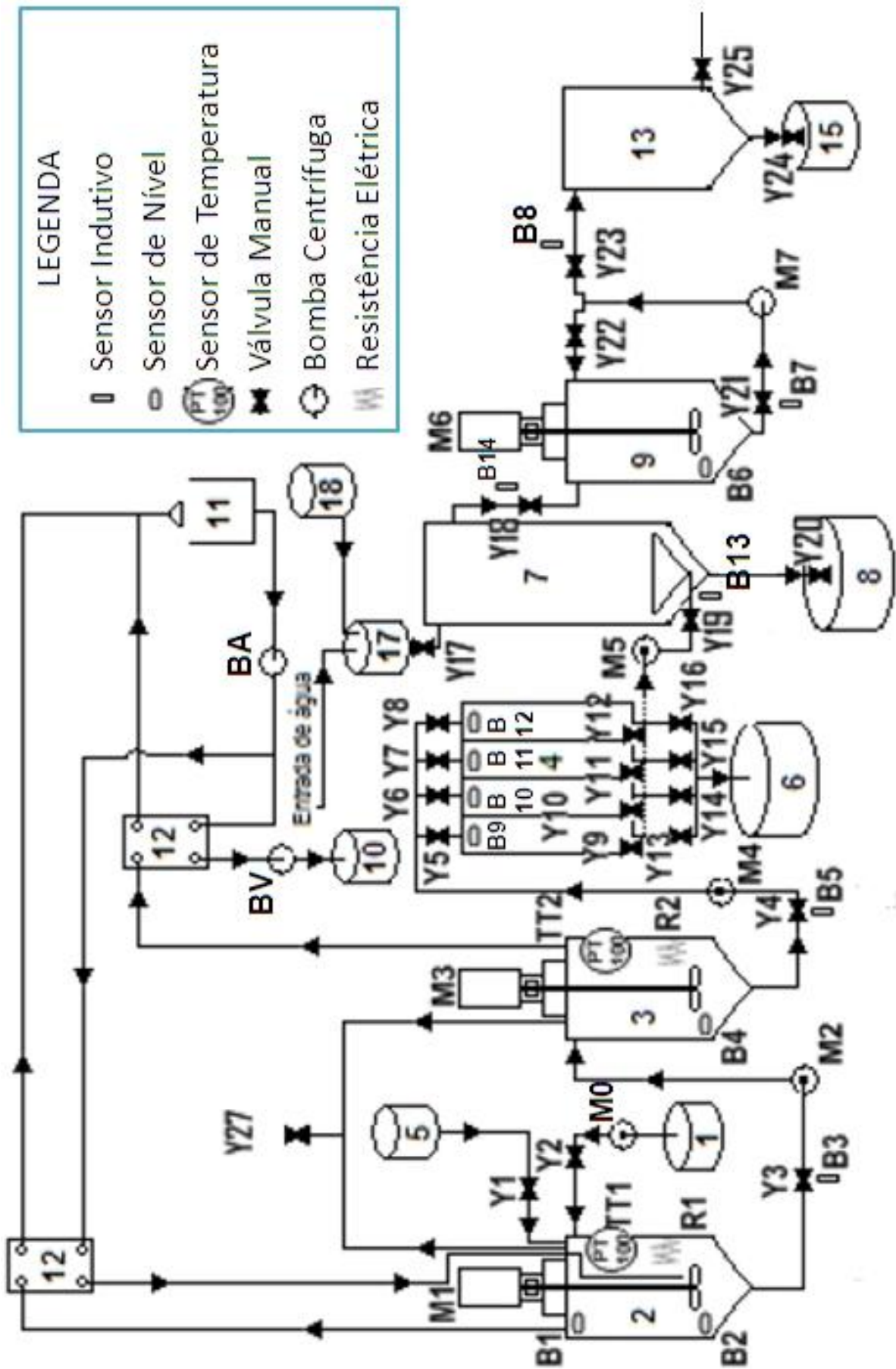
VIEIRA, J. A.; PORTILHO, B. D.; LIMA, M. S. da S. **Remoção e Reabsorção de Água em Biodiesel de Mamona e Soja**. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2º, 2007, Brasília, Brasil, 2007. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/armazenamento/13.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2010.

WEBB, J. W.; REIS, R. A. **Programmable Logic Controllers: Principles and Applications**. 5. ed. Ohio: PEARSON Prentice Hall, 2003.

ZOT, F. D. **Biodiesel no Rio Grande do Sul: Um modelo para sua distribuição e localização de usinas**. 2006. 121 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Administração de Empresas – Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7858/000558772.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 nov. 2010.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – DIAGRAMA FINAL DA PLANTA DE BIODIESEL





## ANEXO B – LISTA DE COMPONENTES DA PLANTA DE BIODIESEL

<b>LISTA DE COMPONENTES DA PLANTA DE BIODIESEL</b>	
<b>RESERVATÓRIO DE METÓXIDO DE POTÁSSIO (5)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
1	Válvula de esfera tripartida de inox Ø 3/4"
<b>REATOR (2)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
1	Motoredutor SEW 0,75KW, 4p, 60 HZ, 220V, RPM entrada - 3340, RPM saída 474, ref. RF17EZ80N2
1	Resistência do Reator 4000W Ø 3" X 540 mm - 6 feixes Ø 3/8" - 220/380V
3	Válvulas de esfera tripartida de inox Ø 3/4"
1	Sensor Indutivo BHS 12mm LM12-3002Pc *
1	Sensor de temperatura Pt-100 com cabeçote.
2	Sensores de Nível Icos LA26M-40 *
1	Bomba centrífuga ELETROPLAS - 0,45HP, monofásico, 60HZ, vazão 2,1 m³/h, sucção 1", recalque 1", ref. ICS50B
<b>EVAPORADOR (3)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
1	Motoredutor SEW 0,75KW, 4p, 60 HZ, 220V, RPM entrada – 3340, RPM saída 474, ref. RF17EZ80N2
1	Resistência RESISTEC do Reator 7000W Ø 3" X 310 mm – 6 feixes Ø 3/8" – 220/380V
2	Válvulas de esfera tripartida de inox Ø 3/4"
1	Sensor PT100 c/ cabeçote e haste Ø 1/4" x 200 mm
1	Sensor de Nível Icos LA26M-40 *
1	Sensor Indutivo BHS 12mm LM12-3002Pc *
1	Bomba centrífuga ELETROPLAS – 0,45HP, monofásico, 60HZ, vazão 2,1 m³/h, sucção 1", recalque 1", ref. ICS50B

<b>DECANTADOR (4)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
12	Válvulas de esfera tripartida de inox Ø ¾"
1	Bomba centrífuga ½CV sucção 1", recalque 1"
4	Sensores de Nível Icos LA26M-40 *
<b>RESERVATÓRIO PARA ÁGUA ACIDIFICADA (17)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
1	Válvula de esfera tripartida de inox Ø 3/4"
<b>LAVADOR COM ÁGUA ACIDIFICADA (7)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
4	Válvulas de esfera tripartida de inox Ø 3/4"
2	Sensores Indutivos BHS 12mm LM12-3002Pc *
<b>REATOR DE SÍLICA (9)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
1	Motoredutor SEW 0,75KW, 4p, 60 HZ, 220V, RPM entrada - 3340, RPM saída 469, ref. RF17EZ80N2
2	Válvulas de esfera tripartida de inox Ø 3/4"
1	Válvula de esfera tripartida de inox Ø 1/2"
1	Sensor de Nível Icos LA26M-40 *
2	Sensores Indutivos BHS 12mm LM12-3002Pc *
1	Bomba centrífuga ELETROPLAS - 0,45HP, monofásico, 60HZ, vazão 2,1 m³/h, sucção 1", recalque 1", ref. ICS50B
<b>RESERVATÓRIO PULMÃO (13)</b>	
<b>Qtd.</b>	<b>Descrição</b>
1	Válvula de esfera tripartida de inox Ø 3/4"

NOTA:

(\*) Sensores de nível e indutivos adquiridos e instalados pela empresa Startup Automação Industrial. Valor incluído na automação da planta.

## ANEXO C – LISTA DE MATERIAIS PARA AUTOMAÇÃO DA PLANTA

LISTA DE MATERIAIS PARA AUTOMAÇÃO DA PLANTA	
Qtd.	Descrição
1	CLP LOGO! 24 8DI 4AI DC 4DO DC C/ DISPLAY 6ED1052-1CC00-0BA6
2	CLP LOGO! DM8 24: 24VCC 4ED 4SD TRANS 6ED1055-1CB00-0BA0
1	CLP LOGO! 2AI RTD 12/24VDC 6ED1055-1MD00-0BA1
1	IHM Logo! Td Display
8	DISJUNTORES 3RV10 11-1GA10 4 5-6 3ª BR3:3RV10111GA10
8	CONTADORES 3RT10 15-1AN11 220V/60HZ BR4:3RT10151AN11
8	CONEXÕES 3RV S00 C/ 3RT S00 AC/DC 1UNID BR3:3RA19111AA00
1	FORNE DE ALIMENTAÇÃO SITOP SMART 24 VCC / 5 A 6EP1333-2AA01
8	RELES INTERFACE PLUG-IN LZS:RT3A4L24 LZS:RT3A4L24
1	PAINEL METÁLICO 500X400X200
2	SENSORES PT-100 ROSCA 1/2 BSP AÇO INOX
6	SENSORES INDUTIVOS BHS 12mm LM12-3002Pc
8	SENSORES DE NÍVEL ICOS LA26M-40
1	MATERIAL DE MONTAGEM (FIOS, BORNES, ANILHAS, PINOS, CALHAS, TRILHOS)

NOTA:

(\*) Sensores Pt-100 previamente adquiridos e instalados pela empresa Sur Engenharia e Máquinas.

**ANEXO D – MANUAL DE OPERAÇÃO DA PLANTA DE BIODIESEL**