

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**AUTOMAÇÃO DE PROCESSO LABORATORIAL  
DE HIDRÓLISE ENZIMÁTICA  
DE BIOMASSA VEGETAL**

**Felipe Regis Gonçalves Cabral**

**Brasília, dezembro de 2013**



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

CABRAL, FELIPE

Automação de Processo Laboratorial de Hidrólise Enzimática de Biomassa Vegetal ,

[Distrito Federal] 2013.

xii, 90p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2013). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1.Automação Laboratorial  
3.Reator Químico Batelada

2.Hidrólise Enzimática  
4.Controle

I. Mecatrônica/FT/UnB

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CABRAL, F. R. G., (2013). Automação de Processo Laboratorial de Hidrólise Enzimática de Biomassa Vegetal. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 10 , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Felipe Regis Gonçalves Cabral.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Automação de Processo Laboratorial de Hidrólise Enzimática de Biomassa Vegetal.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Felipe Regis Gonçalves Cabral  
CLN 408 Bloco E ap 205 – Asa Norte.  
70856-550 Brasília – DF – Brasil.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**AUTOMAÇÃO DE PROCESSO LABORATORIAL  
DE HIDRÓLISE ENZIMÁTICA  
DE BIOMASSA VEGETAL**

**Felipe Regis Gonçalves Cabral**

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Eduardo Stockler Tognetti, ENE/UnB

*Orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB

*Co-orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. Rossano Gambetta, Embrapa Agroenergia

Brasília DF  
*Examinador externo*

\_\_\_\_\_

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, ENE/UnB

*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho à todos que colaboraram de alguma forma para tornar possível a realização dessa grande conquista, em especial à minha mãe Jandira.*

*Felipe Regis Gonçalves Cabral*

---

## RESUMO

**Este** trabalho apresenta o projeto de automação de um sistema reacional para hidrólise enzimática de biomassa em escala **laboratorial**. O projeto compreende a especificação de seis reatores químicos, com controles de agitação e temperatura e desenvolvimento de mecanismos de manipulação de amostras realizada por braços robóticos em intervalos de tempo pré-determinados. **O sistema também compreende a análise automática de percentual de glicose através de um espectrofotômetro.**

---

## ABSTRACT

This work presents a reaction system's automation design for enzymatic hydrolysis of biomass in laboratory scale. The project comprises the specification of six chemical reactors with temperature and agitation controls and the development of a sample manipulating mechanism done by robotic arms at predetermined time intervals. The system also automatically performs a percentile analysis of glucose using a spectrophotometer.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2	O PROBLEMA .....	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO .....	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO.....	2
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	O ETANOL E BIOCOMBUSTÍVEIS .....	4
2.2	O ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO .....	4
2.2.1	BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA .....	5
2.2.2	HIDRÓLISE ENZIMÁTICA .....	6
2.3	REATORES .....	7
2.3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DO REATOR BATELADA .....	8
2.4	VALOR EFICAZ DA POTÊNCIA DE UM PWM EM UM RESISTOR.....	9
2.5	CONTROLADORES PID .....	11
2.6	ANTI WIND-UP .....	13
2.7	GERADOR DE ONDA TRIANGULAR.....	14
2.8	CIRCUITOS RETIFICADORES UTILIZANDO AMPOP .....	15
2.9	GERADOR PWM .....	16
2.10	CIRCUITOS RETIFICADORES UTILIZANDO DIODOS .....	17
2.11	SENSOR DE PROXIMIDADE INDUTIVO .....	18
2.12	RELÉ TEMPORIZADOR.....	19
2.13	AUTOMAÇÃO LABORATORIAL.....	20
2.13.1	BENEFÍCIOS DA AUTOMAÇÃO .....	20
2.13.2	AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS .....	21
2.13.3	AUTOMAÇÃO LABORATORIAL NOS DIAS ATUAIS .....	22
2.14	SOLUÇÕES EM AUTOMAÇÃO LABORATORIAL .....	23
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....</b>	<b>26</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE REAÇÃO ENZIMÁTICA .....	26
3.2	DESCRIÇÃO DO LABORATÓRIO.....	30
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>32</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	32

4.2	PROJETO PRELIMINAR DE AUTOMAÇÃO .....	32
4.3	MANIPULADOR ROBÓTICO .....	33
4.3.1	SEQUENCIAMENTO DAS OPERAÇÕES.....	33
4.4	PROJETO DO REATOR .....	36
4.4.1	MODELAGEM DA TEMPERATURA DO REATOR.....	38
4.4.2	RESPOSTA EM MALHA ABERTA DA TEMPERATURA DO REATOR .....	39
4.4.3	PROJETO DO CONTROLE DE TEMPERATURA .....	40
4.4.4	ELETRÔNICA DO CONTROLE DE TEMPERATURA .....	43
4.4.5	GERADOR DE ONDA TRIANGULAR.....	45
4.4.6	CIRCUITO PARA AQUECIMENTO DA RESISTÊNCIA .....	46
4.4.7	CONTROLE DE RPM DO AGITADOR .....	47
4.4.8	CONTROLE DA BOMBA .....	47
4.4.9	CONTROLE DA ABERTURA E FECHAMENTO DA TAMPA .....	48
4.4.10	DIMENSIONAMENTO DO REATOR .....	50
4.5	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO REATOR .....	50
4.6	ESQUEMÁTICO GERAL DA ELETRÔNICA DO REATOR .....	51
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>53</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	53
5.2	SIMULAÇÃO DO PWM PARA CONTROLE DE RPM DO AGITADOR .....	53
5.3	SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DO REATOR .....	54
5.4	SIMULAÇÃO DO CONTROLE DA BOMBA DE CIRCULAÇÃO DO LÍQUIDO AQUECIDO....	57
5.5	SIMULAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO DO MANIPULADOR ROBÓTICO.....	57
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	60
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>63</b>
<b>I</b>	<b>CÓDIGOS .....</b>	<b>64</b>
<b>II</b>	<b>DESENHOS TÉCNICOS.....</b>	<b>67</b>
<b>III</b>	<b>DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS .....</b>	<b>71</b>
III.1	PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DA ELETRÔNICA DO REATOR .....	71
III.2	ESQUEMÁTICO DO SIMULINK MATLAB .....	71
III.3	ESQUEMÁTICO DA REDE DE PETRI.....	74
<b>IV</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD.....</b>	<b>77</b>
IV.1	CÓDIGOS.....	77
IV.2	DESENHOS TÉCNICOS.....	77
IV.3	VÍDEOS .....	77
IV.4	RELATÓRIO .....	77

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Fluxograma da produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica. ....	5
2.2	Principais componentes de materiais lignocelulósicos. (RITTER, 2008) .....	6
2.3	Reatores batelada. ....	7
2.4	Reator batelada com trocador de calor.....	8
2.5	Onda de pulsos retangulares. ....	10
2.6	Controlador P. ....	11
2.7	Controlador PI.....	12
2.8	Controlador PD. ....	12
2.9	Somador.....	13
2.10	PID completo. ....	13
2.11	Circuito de Anti Wind-Up. ....	14
2.12	Multivibrador Biestável. ....	14
2.13	Circuito Integrador. ....	15
2.14	Gerador de onda triangular. ....	15
2.15	Retificador de onda completa utilizando AmpOp.....	16
2.16	Diagrama em blocos do modulador PWM analógico.....	17
2.17	Comparação para obtenção do sinal PWM. ....	17
2.18	Retificador utilizando diodos com filtro capacitivo. ....	18
2.19	Gráfico da onda gerada pelo retificador com filtro capacitivo. ....	18
2.20	Sensor indutivo.....	19
2.21	Diagrama de temporização. ....	19
2.22	Temporizador. ....	20
2.23	Esquema de funcionamento de um laboratório. (BARBEDO, 2012).....	21
2.24	Agilent BioCel 900. (Agilent Technologies, 2009) .....	24
2.25	Automate.it Safecel (Peak Analysis & Automation, 2010) .....	24
2.26	Tecan Freedom EVO <sup>®</sup> (Tecan, 2009). ....	25
3.1	Fluxograma geral do processo manual. ....	28
3.2	Fluxograma do processo manual.....	29
3.3	Dispositivos básicos do laboratório. ....	30
3.4	Agitador orbital com controle de temperatura semelhante ao utilizado no processo.....	30
3.5	Centrífuga utilizada no processo.....	31
3.6	Espectrofotômetro utilizado.....	31

4.1	Fluxograma da movimentação do manipulador. ....	34
4.2	Microplaca dividida. ....	35
4.3	Bancada explicada. ....	36
4.4	Projeto do reator. ....	37
4.5	Valores da simulação. ....	39
4.6	Temperatura do reator em malha aberta com aquecimento de 500W de potência. ....	40
4.7	Temperatura do reator em malha aberta em regime permanente. ....	40
4.8	Modelo em malha fechada. ....	41
4.9	Modelo em malha fechada com controlador. ....	41
4.10	Erro no regime estacionário no sistema realimentado com ganho unitário. ....	42
4.11	Lugar geométrico das raízes para o sistema realimentado com ganho unitário. ....	42
4.12	Lugar geométrico das raízes para o sistema compensado com PID. ....	43
4.13	Relação entre resistência e temperatura de um sensor pt100. ....	43
4.14	Controlador de temperatura. ....	44
4.15	Circuito gerador de onda triangular. ....	45
4.16	Gráfico de onda triangular. ....	45
4.17	Esquemático do circuito de potência da resistência de aquecimento. ....	46
4.18	Datasheet do SA14. ....	46
4.19	Circuito de controle da velocidade do motor. ....	47
4.20	Datasheet do CI 555. ....	47
4.21	Circuito elétrico da bomba que circula o líquido aquecido. ....	48
4.22	Vista superior do posicionamento dos sensores para abertura da tampa. ....	48
4.23	Esquemático elétrico do acionamento do motor para abertura da tampa. ....	49
4.24	Local de fixação do sensor de curso S1. ....	49
4.25	Dimensões do motor. ....	50
4.26	Moto-Bomba DC. ....	51
4.27	Resistência de 500W. ....	51
4.28	Esquemático geral da eletrônica do reator. ....	52
5.1	Gráficos da saída PWM do circuito de controle de velocidade do agitador. ....	54
5.2	Gráfico da resposta da temperatura do reator em malha fechada. ....	54
5.3	Resposta da temperatura do reator quando submetido a um distúrbio do tipo degrau em $T_a$ . .	55
5.4	Gráfico da diferença entre o sistema com anti wind-up e sem anti wind-up. ....	56
5.5	Comparação entre o sistema compensado e o sistema não compensado. ....	57
5.6	Circuito de ligamento e desligamento da bomba que circula o líquido aquecido. ....	57
5.7	Imagens da simulação. ....	58
I.1	Bancada vista pela software ....	64
I.2	Código da simulação ....	66
II.1	Dimensões da microplaca ....	67
II.2	Dimensões geral do local das microplacas que estão nos lugares dos reatores ....	67
II.3	Dimensões vista de cima ....	68

II.4	Vista superior do reator com tampa .....	69
II.5	Vista lateral do reator .....	70
III.1	Projeto da placa de circuito impresso .....	71
III.2	Código do Simulink para resposta da temperatura em malha aberta .....	72
III.3	Código do Simulink para resposta da temperatura em malha fechada .....	73
III.4	Bloco do controlador PID no MATLAB .....	73
III.5	Rede de Petri .....	74

# LISTA DE TABELAS

2.1	Composição química dos resíduos agrícolas (%) .....	5
4.1	Parâmetros da eletrônica do PID.....	44
4.2	Tabela das ações. ....	48
4.3	Tabela de especificações. ....	50
4.4	Especificações do motor DC.....	51
I.1	Tabela de comentários sobre o código utilizado na programação.....	64
III.1	Atividades da Rede de Petri.....	75
III.2	Transições da Rede de Petri.....	76

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$C_p$	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
$h$	Entalpia específica	[kJ/kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$T$	Temperatura	[°C]
$U$	Coefficiente global de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> .K]

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\Delta$	Varição entre duas grandezas similares	
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]

## Subscritos

$e$	entrada
$s$	saída

## Sobrescritos

$\cdot$	Derivada temporal
$—$	Valor médio

## Siglas

AC	Corrente Alternada (do inglês <i>Alternate Current</i> )
AmpOp	Amplificador Operacional
CI	Circuito Integrado
DC	Corrente Constante (do inglês <i>Direct Current</i> )
LIHA	Braço de Manipulação de Líquidos (do inglês <i>Liquid Handling Arm</i> )
PWM	Modulação por Largura de Pulso (do inglês <i>Pulse Width Modulation</i> )
RMS	Valor Quadrático Médio (do inglês <i>Root Mean Square</i> )
RPM	Rotações Por Minuto

# Capítulo 1

## Introdução

*Este capítulo apresenta o contexto no qual se insere a hidrólise enzimática de uma biomassa vegetal para geração de etanol, a motivação do trabalho, os objetivos a serem atingidos e a estrutura do conteúdo.*

### 1.1 Contextualização

O suprimento de energia está na base da estruturação e da dinâmica operacional da sociedade humana nos seus mais diversos aspectos, desde o bem-estar individual até o desempenho industrial e de prestação de serviços. Neste contexto, o petróleo tem tido uma importância ímpar, sendo responsável pelo fornecimento de um terço da energia primária consumida no planeta. A sociedade humana depara-se com a incerteza de escassez a médio prazo e com a perspectiva de aumento do preço desta fonte não renovável de energia. Avaliações mais pessimistas afirmam que em torno de 41 anos chegar-se-ia à sua total depleção [1]. Paralelamente, a combustão crescente de combustíveis fósseis, iniciada há 60 anos, tem gerado, juntamente com o desmatamento, o acúmulo na atmosfera de gases poluentes, particularmente de  $CO_2$ , responsáveis pelo efeito estufa e consequentes alterações climáticas. A conjunção e sinergia dos fatores acima mencionados, indicam uma tendência crescente e irreversível no aumento do preço do petróleo e, em um prazo mais longo, a diminuição do seu uso.[2]

Neste contexto, a busca por fontes renováveis de energia e de alternativas ao uso do petróleo está mobilizando internacionalmente, e de forma ímpar, setores acadêmicos, industriais, sociais e governamentais com ênfase no desenvolvimento de processos biotecnológicos de menor impacto ambiental. Desse modo, a busca por combustíveis alternativos levou alguns países a optarem por biocombustíveis devido principalmente ao recente interesse na energia da biomassa, produção local, segurança energética, geração de emprego e agregação de valor ao produto agrícola. Um caso de sucesso é o que gerou combustíveis líquidos tais como o etanol produzido pela fermentação de açúcares (etanol de primeira geração) extraído, principalmente, da cana-de-açúcar, do milho, da beterraba, entre outras fontes. Hoje há uma grande quantidade de biomassa descartada no campo, **tais como palha e ponteiros**, ditas biomassa lignocelulósicas. A fração celulósica da biomassa quando submetido a hidrólise enzimática libera os açúcares que podem então ser usados na fermentação para produção de etanol (dito de segunda geração) ou outros produtos químicos de interesse. Para evitar que se atinja o limite da oferta ou venha a ocorrer a competição pelo uso

da terra para a produção de biocombustíveis e de alimentos, é necessário investir no desenvolvimento de tecnologias de segunda geração para produção de etanol.

## **1.2 O problema**

A hidrólise enzimática, processo que busca extrair a glicose do material celulósico, é considerada hoje como um dos pontos críticos no desenvolvimento de processo economicamente viável de produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa, principalmente do bagaço e palha residual do cultivo e processamento da cana-de-açúcar. Como todos os vegetais contêm celulose, quem dominar o processo poderá, no futuro, produzir etanol a partir de diversas matérias-primas, como palha de milho, de trigo e até alguns tipos de grama.

O desenvolvimento da hidrólise enzimática para uma dada biomassa envolve encontrar um coquetel de enzimas (tipos de enzimas e suas concentrações) e condições de processo (temperatura, pH, agitação, aditivos) mais eficientes na conversão da celulose e hemicelulose em açúcares, em experimentos que podem levar até três dias de duração.

A Embrapa Agroenergia de Brasília, DF, está conduzindo estes experimentos de hidrólise enzimática de biomassa lignocelulósica com o intuito de fornecer dados conclusivos sobre o desenvolvimento de processo da produção de etanol de segunda geração. Esses experimentos são caracterizados pelo uso extensivo de mão-de-obra, não sendo raro a troca do técnico responsável ao longo dos dias, incorrendo em perda de reprodutibilidade e finalmente acarretando em conclusões errôneas sobre os processos em estudo, ou necessidade de repetir testes já executados.

## **1.3 Objetivos do projeto**

Objetiva-se projetar um sistema laboratorial automatizado para hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar em escala de bancada, que viabilize a obtenção de dados confiáveis num curto intervalo de tempo. O escopo do trabalho compreende a fase de projeto, sem executar a implementação do mesmo. O sistema compreende a preparação e alimentação dos reagente em um número pré-determinado de reatores, todos com controle de agitação e temperatura. Amostras devem ser retiradas em intervalos de tempo pré-determinados e conduzidas para análise em sistema de cromatografia líquida de alta performance.

## **1.4 Apresentação do manuscrito**

O presente trabalho segue a estrutura apresentada a seguir: no capítulo 2 é feita uma revisão teórica sobre hidrólise enzimática do bagaço da cana-de-açúcar com o intuito de esclarecer o problema alvo da automação, apresenta uma breve introdução sobre reatores químicos e seu modelo matemático, são colocados os conceitos teóricos que serão utilizados ao longo do trabalho e também realiza uma contextualização e análise sobre automação laboratorial, seus benefícios, o que deve ser levado em conta e perspectivas sobre tecnologias de automação laboratorial nos dias atuais.

Em seguida, no capítulo 3 é descrito o processo de hidrólise enzimática tal como ele é realizado atualmente na Embrapa, de forma manual, sendo este o ponto de partida para o projeto de automação. No capítulo é explicado os equipamentos utilizados no laboratório bem como suas funcionalidade. Em seguida, o capítulo 4 descreve as metodologias e os detalhes dos recursos empregados no desenvolvimento do presente trabalho, desde o projeto do sequenciamento do manipulador robótico até o projeto do reator com suas modelagens e circuitos de controle. Os resultados das simulações computacionais são discutidos no capítulo 5, seguido das conclusões no capítulo 6 e as Referências Bibliográficas. Os anexos contêm material complementar.

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica

*Este capítulo aborda alguns fundamentos teóricos para o entendimento de assuntos apresentados ao longo do presente trabalho.*

### 2.1 O etanol e biocombustíveis

O etanol, também chamado de álcool etílico, é uma substância orgânica obtida a partir da fermentação de açúcares, hidratação do etileno ou redução do acetaldeído. A fermentação do açúcar em etanol é uma das primeiras biotecnologias empregadas na humanidade, ela é realizada com a atuação do micro-organismo *Sacchomyces cerevisiae*.

Os biocombustíveis são combustíveis de origem biológica não fóssil. O etanol é um dos maiores exemplos de biocombustíveis no **Brasil e ele é produzido** principalmente a partir da cana de açúcar. Já nos Estados Unidos a maior produção é a partir do milho. O etanol é altamente inflamável e incolor, sendo muito utilizado em automóveis, servindo de combustível para motores a explosão do tipo ciclo Otto. Essa substância é renovável, pois sua matéria-prima é obtida através de plantas cultivadas pelo homem.

### 2.2 O etanol de segunda geração

As tecnologias de segunda geração para produção de etanol são diferentes quando comparadas com a forma tradicional e secular de fazer álcool (fermentar o caldo dos vegetais que possuem açúcares). Essas tecnologias não utilizam os açúcares simples contidos na seiva, por exemplo, caldo da cana-de-açúcar, mas transformam a madeira (celulose) da planta em açúcares simples para posterior fermentação e produção de etanol.

O etanol de segunda geração é obtido a partir de biomassas lignocelulósicas empregando processos de pré-tratamento seguidos de processos de hidrólise enzimática. Os processos de pré-tratamento tem como objetivo modificar a estrutura da biomassa, expondo a celulose ao ataque enzimático. A hidrólise enzimática emprega várias enzimas com o objetivo de desconstruir a celulose no seu constituinte mais básico, a glicose. A Figura 2.1 ilustra o fluxograma da produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-se-açúcar.

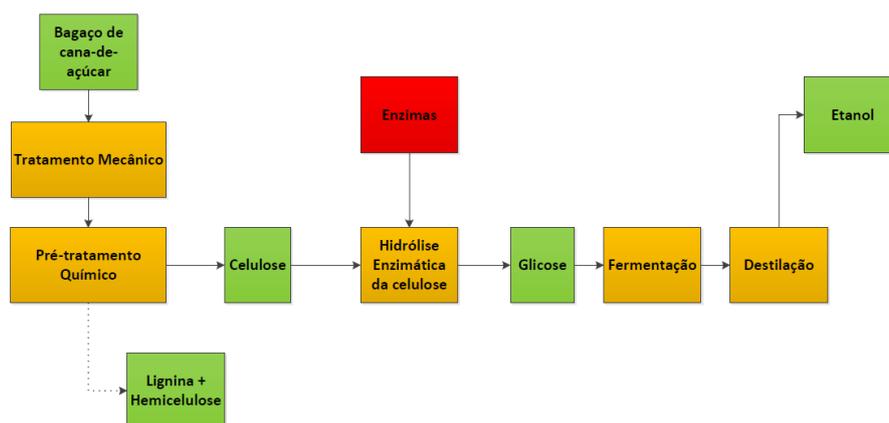


Figura 2.1: Fluxograma da produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica.

Para a realização da hidrólise enzimática, necessita-se primeiramente de um tratamento mecânico, onde a biomassa é limpa e passa por um processo de adequação mecânica para que haja homogeneização e redução do tamanho e dessa maneira tenhamos uma boa eficiência nas próximas etapas. Depois, realiza-se um pré-tratamento que pode ser químico, físico ou biológico. Esse pré-tratamento tem o objetivo de eliminar as estruturas que cobrem a celulose e que impedem a ação das enzimas celulases. Estes polímeros são a lignina e a hemicelulose, esta última também pode ser hidrolisada, porém, necessita de enzimas específicas para tal. A Figura 2.2 ilustra a composição de uma biomassa.

### 2.2.1 Biomassa lignocelulósica

A Figura 2.2 apresenta como uma biomassa lignocelulósica está estruturada. Os materiais lignocelulósicos são constituídos basicamente pelos compostos estruturais ou celulares. Além da celulose, lignina e hemicelulose, outros constituintes menores também se mostram presentes. Estes incluem compostos orgânicos também chamados de extrativos (ésteres, alcoóis, esteróides e outros) e inorgânicos (sulfatos, oxalatos, carbonatos e silicatos de cálcio, potássio e magnésio, principalmente). As proporções entre os constituintes dependem do tipo de material (LEWIN & GOLDESTEIN, 1991). A tabela 2.1 indica a composição química básica de alguns dos principais resíduos lignocelulósicos.

Tabela 2.1: Composição química dos resíduos agrícolas (%)

Resíduos	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Proteína	Cinzas
<b>Palha de arroz</b>	32-47	19-27	5-24	-	12,4
<b>Palha de trigo</b>	35-47	20-30	8-15	3,1	10,1
<b>Palha de milho</b>	42,6	21,6	8,2	5,1	4,3
<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b>	33-36	28-30	18,4	3	2,4

Fonte: SARKAR et al. (2012)

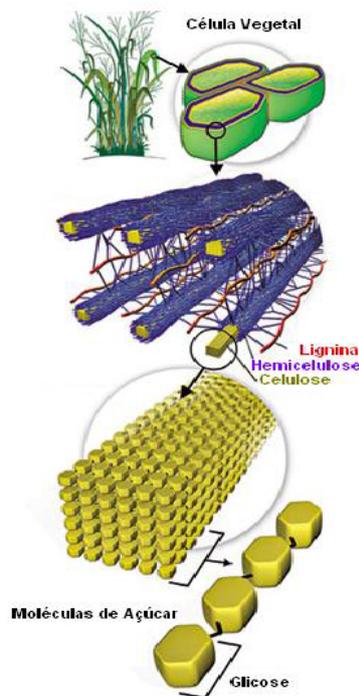


Figura 2.2: Principais componentes de materiais lignocelulósicos. (RITTER, 2008)

### 2.2.2 Hidrólise enzimática

A hidrólise da celulose é uma das tecnologias de produção de etanol de segunda geração, ou bioetanol. Hidrolisar a celulose significa quebrar a estrutura molecular do bagaço da cana-de-açúcar (madeira) em açúcares simples, em outras palavras, transformar "a madeira da planta" em açúcares solúveis e passíveis de se transformarem em etanol pela ação de microrganismos. A hidrólise é o processo bioquímico que quebra a celulose em moléculas de glicose. A hidrólise da celulose pode ser realizada de várias formas, a saber, a rota enzimática, a rota ácida e a rota alcalina.

A hidrólise enzimática é uma reação química na qual uma enzima quebra uma molécula em outras menores utilizando água. Na produção de etanol celulósico, a hidrólise enzimática acontece logo após o pré-tratamento da biomassa. Nessa etapa, as enzimas digerem a parede celular vegetal, liberando os açúcares C6 e C5 que serão convertidos posteriormente em etanol pelas leveduras durante a fermentação.

A reação enzimática para a degradação da celulose necessita ocorrer em um reator químico com agitação e temperatura pré-determinados. Esta reação costuma levar horas e até dias para finalizar, por isso esta etapa é o principal gargalo da futura produção em larga escala de bioetanol. Além disso, encontrar a melhor combinação de enzimas para uma reação mais eficiente é um problema importante, especialmente devido ao alto custo dessas enzimas.

## 2.3 Reatores

Um reator químico é onde ocorre uma reação química de forma controlada. Em termos de configurações físicas encontradas, existem basicamente dois tipos de reatores: o reator tanque e o reator tubular. O reator tanque ideal é aquele no qual a agitação é tão eficiente que as variáveis de processo, composição e temperatura são sempre uniformes dentro desse tipo de reator. O reator tubular ideal é aquele no qual elementos de fluidos reagente (*plugs*) movem-se através de um tubo, como *plugs* movendo paralelo ao eixo do tubo. As variáveis como temperatura e composição variam com a posição ao longo do comprimento do reator. Nesta literatura iremos nos concentrar no reator do tipo tanque.

Um reator tanque simples pode ser operado numa variedade de formas: batelada, semibatelada e fluxo contínuo, o reator de interesse é o reator batelada (em inglês *BATCH*). No reator batelada simples, as variáveis como temperatura e concentração não variam com a posição dentro do reator, mas variam com o tempo. Reatores batelada são usualmente tanques cilíndricos e a orientação usualmente é vertical. Vasos cilíndricos são empregados porque eles são mais fáceis de serem fabricados e limpos e os custos de construção para unidades de alta pressão são consideravelmente menores do que configurações alternativas. Agitação pode ser conseguida por agitadores de vários tipos ou por circulação através de bomba. Devido aos efeitos de energia envolvidos em uma reação, é usualmente necessário empregar um trocador de calor através de jaquetas ou serpentinas externas ou internas, embora possa-se usar resistência elétrica ou fogo direto. A Figura 2.3 ilustra dois reatores batelada, um simples e outro com trocador de calor através de jaqueta.

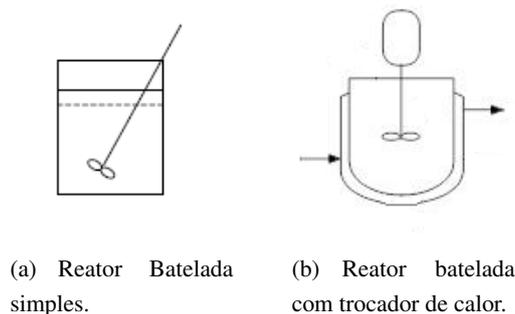


Figura 2.3: Reatores batelada.

O uso de reatores batelada é bastante variado, entre eles o uso em reações em fase líquida particularmente quando a produção é pequena ou para produzir diversos produtos no mesmo equipamento. Também, quando é necessária limpeza regular do reator, como no caso de constante contaminação por fuligem ou culturas de fermentação também emprega-se o reator batelada, devido a sua grande flexibilidade para limpeza e procedimentos de sanitização.

A principal vantagem do reator batelada é o menor investimento de capital em relação aos chamados processos contínuos quando a capacidade de produção é baixa, tanto que reatores batelada são preferíveis quando está se testando um novo produto. Além disso as necessidades de construção e instrumentação são mais baratas e simples para reatores batelada.

### 2.3.1 Modelagem matemática do reator batelada

A Figura 2.4 mostra um reator batelada e variáveis onde,  $T_{ji}$  é a temperatura de entrada da jaqueta,  $T_{jo}$  é a temperatura de saída da jaqueta,  $T_j$  é a temperatura da jaqueta,  $T_t$  é a temperatura do tanque e  $f$  é o fluxo do fluido que circula pela jaqueta. Neste sistema o fluido da troca de calor está circulando através da jaqueta aquecendo o fluido dentro do tanque. O objetivo é aumentar a temperatura do tanque até um valor desejado.

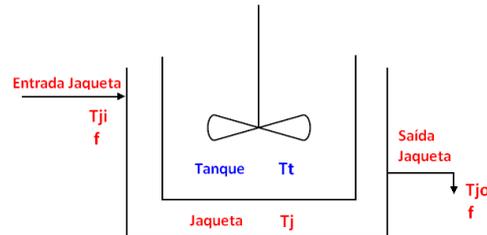


Figura 2.4: Reator batelada com trocador de calor.

Para simplificar a modelagem assumimos que :

- Nenhuma mudança de fase ocorre no fluido do tanque nem no fluido da jaqueta;
- Volume do fluido do tanque e da jaqueta são constantes;
- Os líquidos do tanque e da jaqueta têm densidade e capacidade calorífica constantes;
- A taxa de transferência de calor da jaqueta para o tanque é governada pela equação (2.1):

$$\dot{Q} = UA(T_j - T_t) \quad (2.1)$$

Onde  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor, e  $A$  é a área de transferência de calor. Da lei de conservação das massas aplicada na jaqueta temos que:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (2.2)$$

Onde  $m$  é a massa do sistema,  $\dot{m}_e$  é a vazão mássica de entrada e  $\dot{m}_s$  é a vazão mássica de saída, desenvolvendo a equação temos:

$$\frac{d}{dt}\rho_j V_j = \rho_j \dot{V}_{ji} - \rho_j \dot{V}_{jo} \quad (2.3)$$

Onde  $\rho_j$  é a densidade do fluido da jaqueta,  $V_j$  é o volume da jaqueta  $\dot{V}_{ji}$  é o fluxo volumétrico de entrada do fluido na jaqueta e  $\dot{V}_{jo}$  é o fluxo volumétrico de saída na jaqueta. Como assumimos que o volume da jaqueta é constante  $\frac{d}{dt}V_j = 0$ , então:

$$\dot{V}_{ji} = \dot{V}_{jo} \quad (2.4)$$

Isso significa que o fluxo de entrada é igual ao fluxo de saída.

Pelo balanço de energia, temos:

$$\text{Taxa acumulo}(E) = \text{taxa entrada}(E) - \text{taxa saída}(E) \quad (2.5)$$

Para sistemas abertos:

$$\frac{dE}{dt} = \left( \sum_{e=\text{entrada}} \rho_e \dot{V}_e H_e \right) + \dot{Q} + \dot{W} - \sum_{s=\text{saída}} \rho_s \dot{V}_s H_s \quad (2.6)$$

Onde  $\frac{dE}{dt} = \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dU}{dt}$ , sendo que  $E_c$  é a energia cinética,  $E_p$  é a energia potencial e  $U$  a energia interna,  $H$  é a entalpia e  $\dot{W}$  é o trabalho realizado. Assumindo que são desprezíveis:

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{dE_p}{dt} = \dot{W} \simeq 0 \quad (2.7)$$

e que:

$$\frac{dU}{dt} \simeq \frac{dH}{dt} = \frac{d(\rho V C_p \Delta T)}{dt} \quad (2.8)$$

utilizando (2.4), (2.7) e (2.8) na equação (2.6), temos que:

$$\rho V_j C_{pj} \frac{dT_j}{dt} = \rho \dot{V}_j C_{pj} (T_{ji} - T_j) + \dot{Q} \quad (2.9)$$

Como a transferência de calor da jaqueta para o tanque é  $\dot{Q} = \mathbf{UA}(T_j - T_t)$ , ou seja a jaqueta está perdendo calor para o tanque, temos:

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{\dot{V}_j}{V_j} (T_{ji} - T_j) - \frac{UA(T_j - T_t)}{\rho_j V_j C_{pj}} \quad (2.10)$$

Fazendo uma análise análoga para o tanque temos:

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{UA(T_j - T_t)}{\rho_t V_t c_{pt}} \quad (2.11)$$

As equações (2.10) e (2.11) são as equações que governam as temperaturas da jaqueta e do tanque respectivamente.

## 2.4 Valor eficaz da potência de um PWM em um resistor

Um PWM, *Pulse-Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso, utiliza uma onda de pulso retangular no qual a largura do pulso é modulada resultando numa variação na média do valor da forma de onda. Já o valor eficaz ou RMS (Root Mean Square ou Valor Quadrático Médio) de uma onda, em termos estatísticos, é a medida da magnitude de uma quantidade que varia. Fisicamente falando, o valor eficaz de

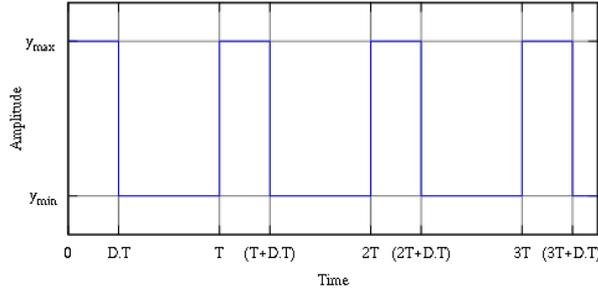


Figura 2.5: Onda de pulsos retangulares.

uma corrente alternada tem o mesmo valor da intensidade de uma corrente contínua que entregaria uma mesma potência para uma resistência. O valor eficaz pode ser encontrado pela seguinte equação:

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} [x(t)]^2 dt} \quad (2.12)$$

Considerando a onda de pulsos retangulares mostrada na Figura 2.5. Onde  $D$  é o *duty cycle* (razão cíclica ou ciclo de trabalho) que é a razão do tempo que o sinal fica no máximo sobre o período  $T$ , dada pela fórmula:

$$D = \frac{t_H}{t_H + t_L} = \frac{t_H}{T} \quad (2.13)$$

onde  $T$  é o período do sinal,  $t_H$  é o tempo em um período em que o sinal está no nível alto, e  $t_L$  é o tempo em um período em que o sinal está no nível baixo. Desenvolvendo a equação (2.12) para a onda de pulsos retangulares, tem-se:

$$\begin{aligned} V_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} [V_{max}]^2 dt + \int_{DT}^T [V_{min}]^2 dt \right)} \\ V_{RMS} &= \sqrt{\frac{D \cdot T \cdot V_{max}^2 + T \cdot (1 - D) \cdot V_{min}^2}{T}} \\ V_{RMS} &= \sqrt{D \cdot V_{max}^2 + (1 - D) \cdot V_{min}^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

onde  $V_{min}$  e  $V_{max}$  são os valores de tensão mínima e máxima respectivamente que o pulso pode assumir. Considerando que o  $V_{min}$  do PWM é zero, temos:

$$V_{RMS} = V_{max} \sqrt{D} \quad (2.15)$$

A potência dissipada em um resistor pode ser dada pela fórmula:

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

Portanto, temos que a potência entregue a um resistor por uma onda PWM é:

$$P = \frac{V_{max}^2 \cdot D}{R} = P_{max} \cdot D \quad (2.16)$$

Ou seja, a potência eficaz de uma onda PWM é igual a potência máxima da onda multiplicada pelo *duty cycle*.

## 2.5 Controladores PID

Em controle e automação é muito comum o uso de controladores PID - proporcional mais integral mais derivativo. Segundo SEBORG(2003), em torno de 90% das malhas industriais utilizam este controlador. O controlador PID quando bem sintonizado, permite um bom controle do processo na maioria das aplicações. Ele pode ser utilizado em diversos tipos de plantas, **proporcionando erro nulo em regime estacionário para excitações constantes**, pequeno tempo de resposta (acomodação) e níveis aceitáveis de sobre-sinal.

O controlador PID pode ser implementado de forma analógica ou digital. Os de forma analógica, processam diretamente os sinais dos transdutores disponíveis utilizando circuitos de eletrônica analógica. São muito utilizados os amplificadores operacionais, para implementar os blocos Proporcional, Derivativo e Integrador. Existem diversas configurações analógicas possíveis de implementação de blocos PID, a utilizada neste presente trabalho emprega o uso de três blocos: um para o proporcional, um para o derivativo e outro para o integrador. No final precisamos de um quarto bloco somador para somar as saídas de cada bloco.

O circuito da Figura 2.6, ilustra o bloco Proporcional. Perceba que ele não passa de um circuito amplificador. O ganho é determinado pelos resistores.

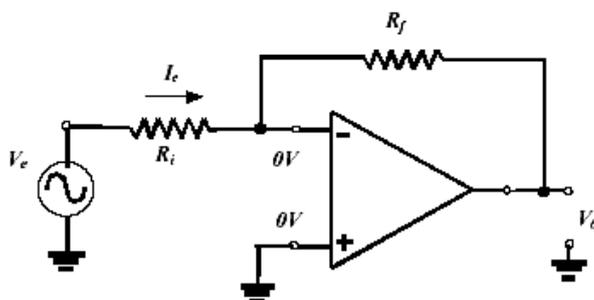


Figura 2.6: Controlador P.

Para o Bloco Proporcional, temos:

$$\frac{V_o}{V_e} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.17)$$

O bloco da Figura 2.7 é um Integrador. Da Figura 2.7, temos:

$$i = \frac{V_e}{R} \quad e \quad V_o = -\frac{Q}{C} \quad \text{Onde} \quad Q = \int i dt = \int \frac{V_e}{R} dt, \quad \text{portanto}$$

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_e dt \quad (2.18)$$

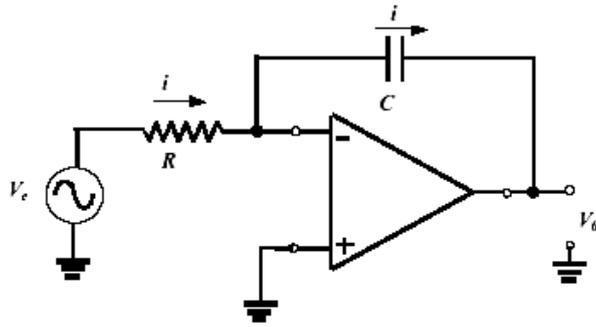


Figura 2.7: Controlador PI.

Ou seja, a tensão de saída é igual ao produto da constante  $-\frac{1}{RC}$  pela integração da tensão de entrada ao longo do tempo.

E finalmente na Figura 2.8, temos o bloco Derivativo. Da Figura 2.8, temos:

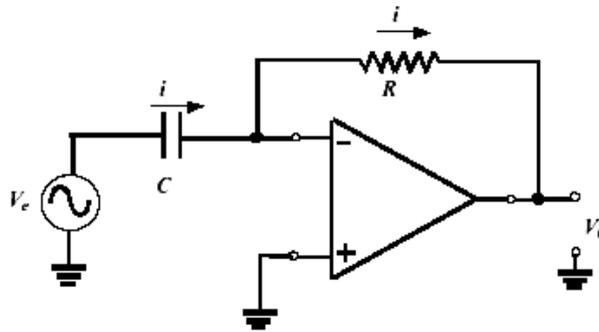


Figura 2.8: Controlador PD.

$$V_o = -R \cdot i \quad e \quad V_e = \frac{Q}{C} \quad \text{Onde} \quad i = \frac{dQ}{dt} = \frac{C \cdot dV_e}{dt}, \quad \text{portanto}$$

$$V_o = -\frac{R \cdot C dV_e}{dt} \quad (2.19)$$

Ou seja, a tensão de saída é igual ao produto da constante  $-RC$  pela derivação da tensão de entrada ao longo do tempo.

E finalmente para se obter a saída correta, basta somar as saídas de cada bloco com um amplificador do tipo somador. Este somador pode ser visualizado na Figura 2.9

Da Figura 2.9, temos:

$$V_o = -\left(\frac{V_1 \cdot R_f}{R_1} + \frac{V_2 R_f}{R_2} + \frac{V_3 R_f}{R_3}\right) \quad (2.20)$$

fazendo  $R_f = R_1 = R_2 = R_3$ , temos:

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3) \quad (2.21)$$

O resultado é o bloco PID completo exibido na Figura 2.10.

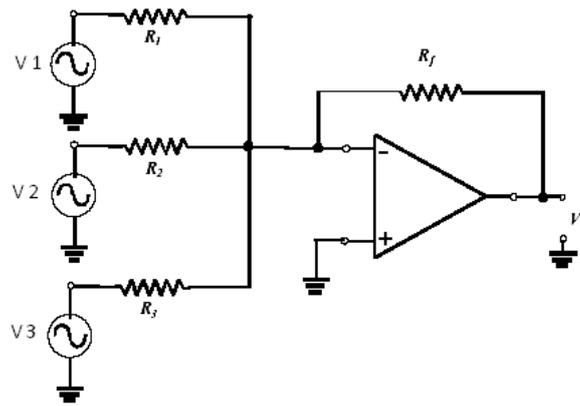


Figura 2.9: Somador.

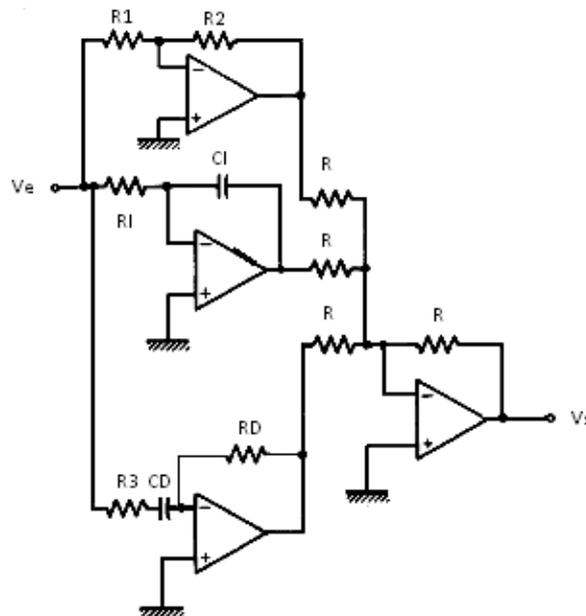


Figura 2.10: PID completo.

## 2.6 Anti Wind-Up

O fenômeno de *wind-up* ocorre quando o sistema é impedido de aumentar a sua ação de correção de um erro devido à saturação de um atuador qualquer. Nessa situação, o controlador continuará a integrar um erro que é inevitável, aumentando ainda mais o sinal de referência para o sistema. O inconveniente deste aumento é que, quando o erro finalmente diminuir, o sinal de referência dado pelo controlador irá encontrar-se num valor muito elevado e ele não voltará para a faixa de valores normais antes de decorrido algum tempo, o que introduz atraso no sistema e pode mesmo conduzi-lo à instabilidade.

Existem diversas maneiras de evitar o fenômeno *wind-up* chamados de estratégias anti *wind-up*. O objetivo é fazer com que o integrador atue somente próximo do regime estacionário, quando o erro é normalmente pequeno. Isto evita a saturação do integrador devido a fortes transitórios, ou grandes erros. O circuito implementado, Figura 2.11, não anula a entrada do integrador quando o erro é grande, mas passa

para o integrador o sinal truncado.

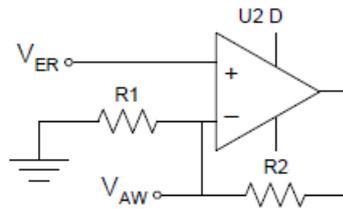


Figura 2.11: Circuito de Anti Wind-Up.

A saída do circuito de anti wind-up, mostrada como  $V_{AW}$ , tem a seguinte curva característica

$$V_{AW} = \begin{cases} V^{++} \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2}\right), & \text{se } V_{ER} > V^{++} \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2}\right), \\ V_{ER}, & \text{se } V^{--} \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2}\right) < V_{ER} < V^{++} \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2}\right), \\ V^{--} \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2}\right), & \text{se } V_{ER} < V^{--} \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2}\right). \end{cases} \quad (2.22)$$

Ou seja, percebemos que a saída do anti wind-up é limitada até certos valores, que no caso depende da tensão de alimentação do amplificador, neste caso representadas por  $V^{++}$  e  $V^{--}$ . Vale lembrar que, na prática, quando o amplificador estiver saturado a sua saída é em torno de  $\pm 90\%$  da tensão de alimentação. Com este circuito evitamos a saturação do integrador, pois, o erro que chega nele é limitado para valores previamente projetados através das escolhas de  $R1$  e  $R2$  da Figura 2.11.

## 2.7 Gerador de onda triangular

Neste projeto, o gerador de onda triangular será usado para gerar a onda quadrada do sinal PWM. Para gerar uma onda triangular precisamos de um Multivibrador Biestável conectado a um integrador. Na Figura 2.12 temos um exemplo de Multivibrador Biestável.

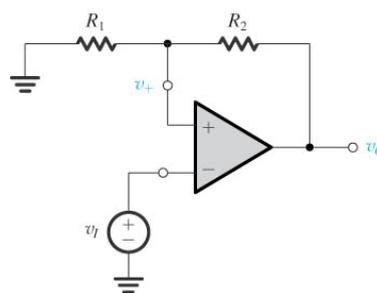


Figura 2.12: Multivibrador Biestável.

O Multivibrador Biestável é um circuito que tem dois estados estáveis, em que, uma vez que o circuito for comutado permanecerá indefinidamente neste estado. O circuito pode ser comutado através de um sinal de entrada  $V_I$ . O Biestável pode ser implementado conectando a um amplificador operacional uma realimentação positiva.

No circuito Integrador, substituímos R2 do biestável por um capacitor C conforme mostra a Figura 2.13(a).

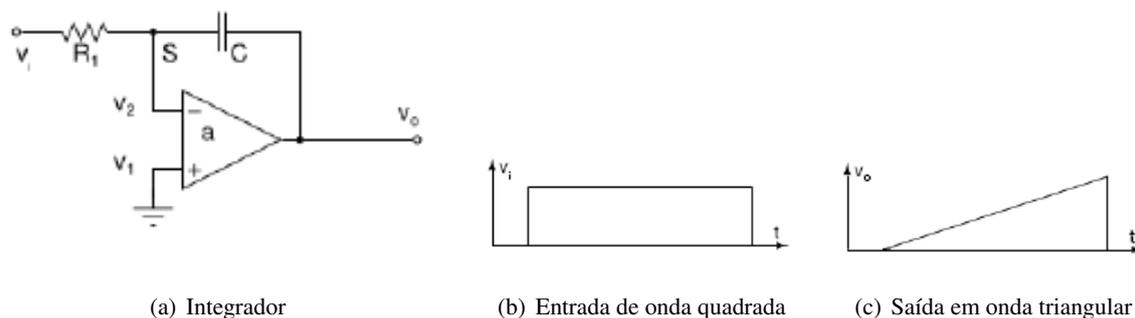


Figura 2.13: Circuito Integrador.

Utilizando a equação (2.18), obtemos o seguinte resultado

$$v_o = -\frac{1}{R_1 C} \int v_i dt \quad (2.23)$$

Associando ambos os circuitos, podemos construir o Gerador de Ondas Triangulares. A Figura 2.14 mostra o circuito para gerar uma onda triangular.

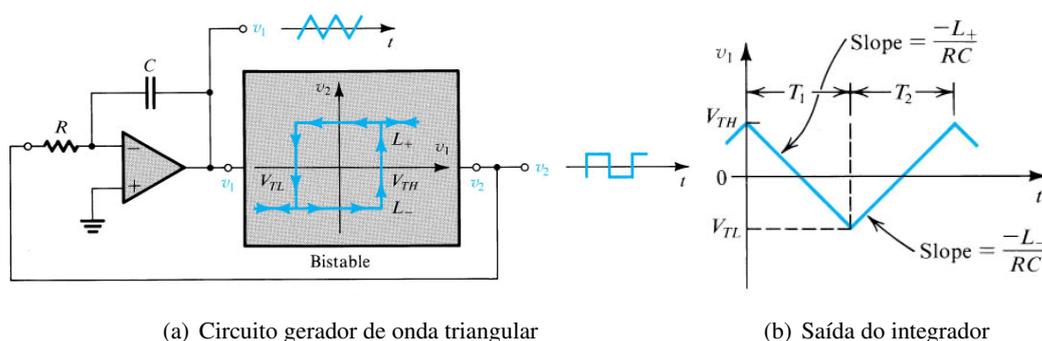


Figura 2.14: Gerador de onda triangular.

Onde +L e -L os limites positivo e negativo respectivamente, são os valores das fontes de alimentação DC,  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  são as tensões no qual ocorre comutação no circuito no biestável, a diferença entre ambos é devido à histerese, e  $T_1$  é o meio período do sinal.

## 2.8 Circuitos retificadores utilizando AmpOp

Um circuito retificador é assim chamado pois é utilizado para gerar uma saída unipolar para a carga. Um sinal senoidal, portanto, contendo ciclos positivos e negativos de tensão, é retificado de forma a fornecer apenas os ciclos positivos para a carga. O circuito da Figura 2.15 é apresentado como circuito retificador de onda completa, aquele em que tanto o ciclo negativo como o positivo são retificados. Este circuito será utilizado para retificar a onda triangular para valores acima de zero.

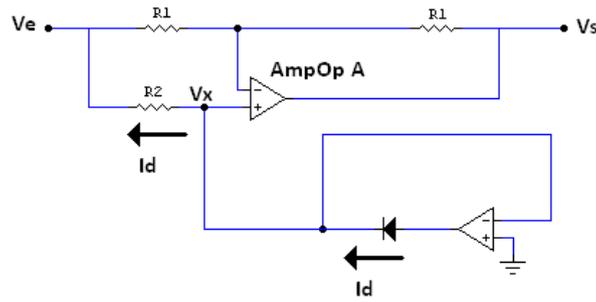


Figura 2.15: Retificador de onda completa utilizando AmpOp.

Na condução do diodo, tem-se que:

$$I_d \geq 0$$

Como  $I_d = -\frac{V_e}{R_2}$ , para o diodo conduzir deve-se ter:

$$-\frac{V_e}{R_2} \geq 0 \implies V_e \leq 0 \quad (2.24)$$

Na condução do diodo. O circuito envolvendo o AmpOp A funciona como um amplificador inversor. Portanto:

$$V_s = -\frac{R_1}{R_1} \cdot V_e = -V_e, \quad \text{para } V_e \leq 0 \quad (2.25)$$

Na condição complementar, do diodo não conduzir, temos  $V_x = V_e$ , e assim:

$$V_s = V_e, \quad \text{para } V_e > 0 \quad (2.26)$$

Portanto, a curva característica se torna:

$$V_s = \begin{cases} V_e, & \text{se } V_e > 0, \\ -V_e, & \text{se } V_e \leq 0. \end{cases} \quad (2.27)$$

ou,

$$V_s = |V_e| \quad (2.28)$$

## 2.9 Gerador PWM

Existem várias formas de se implementar uma modulação PWM, neste trabalho será apresentado apenas o método analógico. Na Figura 2.16 é mostrado o diagrama em blocos de um modulador PWM analógico.

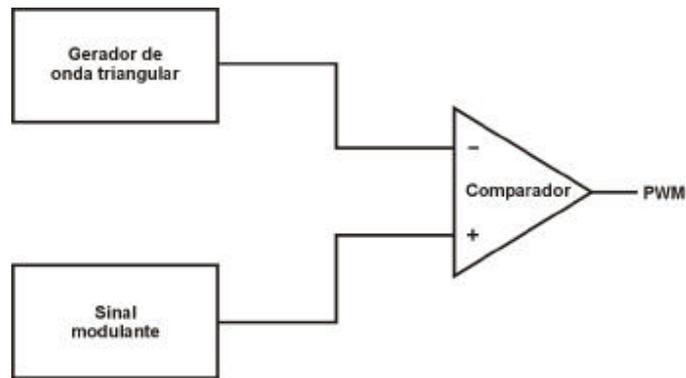


Figura 2.16: Diagrama em blocos do modulador PWM analógico.

De acordo com a Figura 2.16, observa-se que o sinal PWM é obtido através da comparação do sinal modulante com uma onda triangular. O sinal modulante pode ser um nível DC ou outra forma de onda qualquer, o importante é garantir que a frequência da onda triangular seja bem superior a maior componente de frequência do sinal modulante. Na Figura 2.17 é apresentada a comparação descrita acima.

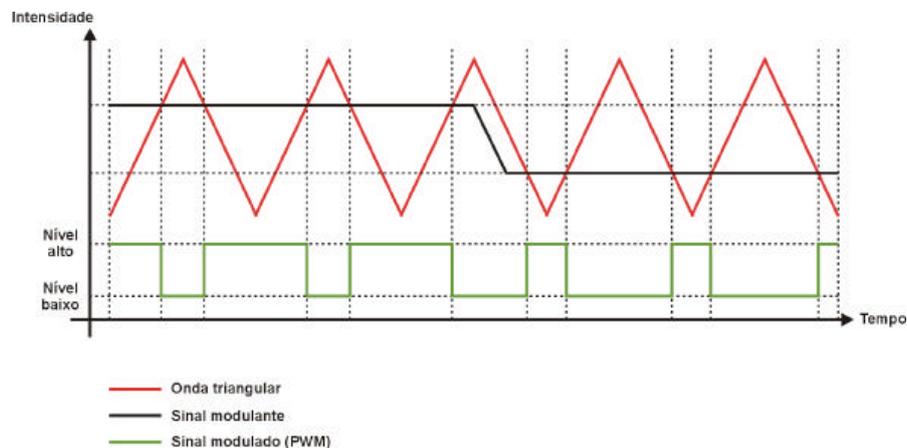


Figura 2.17: Comparação para obtenção do sinal PWM.

Na Figura 2.17, observa-se que sempre que o sinal modulante é de maior intensidade que a onda triangular a saída do PWM vai a nível alto e permanece neste estado até que esta condição seja desfeita.

## 2.10 Circuitos retificadores utilizando diodos

O circuito da Figura 2.18 mostra um retificador de onda completa utilizando diodos para realizar a retificação, um capacitor em paralelo à carga resistiva é colocado para realizar um filtro e a onda de saída ficar igual a apresentada na Figura 2.19, VP é o valor de pico. Este circuito será utilizado no projeto para retificar o sinal de alimentação do circuito.

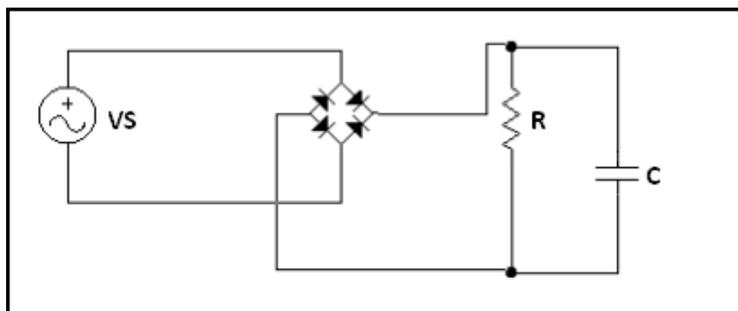


Figura 2.18: Retificador utilizando diodos com filtro capacitivo.

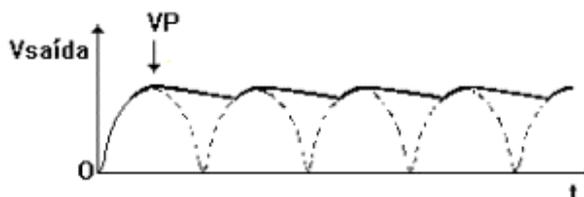


Figura 2.19: Gráfico da onda gerada pelo retificador com filtro capacitivo.

## 2.11 Sensor de proximidade indutivo

Sensor indutivo é um dispositivo eletrônico que é capaz de reagir a proximidade de objetos metálicos, estes dispositivos exploram o princípio da impedância de uma bobina de indução, que ao conduzir uma corrente alternada tem esta alterada quando um objeto metálico ou corrente elétrica é posicionado dentro do fluxo do campo magnético radiante. Isso ocorre pois o objeto absorve parte do campo magnético, essa variação é detectada pelo circuito do sensor que produz um sinal de saída, podendo ser a atuação de um contato NA (normalmente aberto) ou NF (normalmente fechado). Um sensor indutivo é composto por quatro partes sendo:

- Uma bobina: cria um campo magnético que será afetado pela presença de metal;
- Um oscilador: verifica as mudanças de corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC);
- Um circuito de disparo: comuta o sinal da saída;
- Um circuito de saída: leva a informação para outros equipamentos;

Os sensores indutivos geralmente são aplicados para a substituição de chaves-fim-de-curso pois não requerem contato físico para atuar. Este fator proporciona uma maior durabilidade, segurança e velocidade de trabalho do equipamento. Possuem grande aplicação também na indústria sendo utilizados em máquinas para contar peças, medir velocidade, detectar metais de baixa resistência mecânica, entre muitas outras aplicações. A Figura 2.20 mostra o sensor indutivo e sua configuração interna.

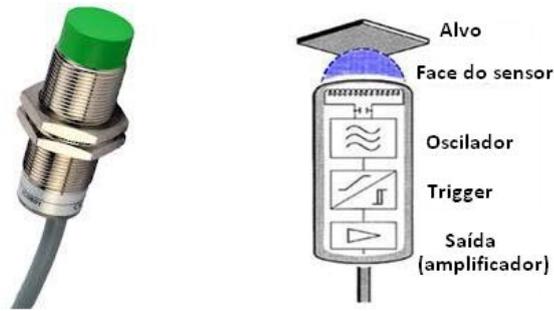


Figura 2.20: Sensor indutivo.

## 2.12 Relé temporizador

Relé temporizador ou simplesmente relé de tempo ou *timer*, é o termo utilizado para denominar qualquer relé com a capacidade de realizar operações de chaveamento com manipulação de tempo. As principais funções desse tipo de relé são retardo na energização, retardo na desenergização, geração de pulsos dentre muitas outras.

O mecanismo do relé temporizador manipula a comutação de um mecanismo relé (eletromecânico ou estado sólido), esse mecanismo pode ser desempenhado por um sistema eletromecânico, com eletrônica convencional ou por um sistema microprocessado. Quando o relé é alimentado por uma fonte de energia, o estado de seus contatos será alterado depois de um determinado período de tempo pré-estabelecido em seu seletor de programação. Podem funcionar de duas maneira:

- **On-delay:** Quando a bobina de um relé temporizador on-delay é energizada, os contatos mudam os estados depois de um tempo pré-determinado;
- **Off-delay:** Quando a bobina ou entrada de um relé temporizador off-delay é energizada, os contatos mudam imediatamente os estados e depois de um tempo pré-determinado voltam para a posição original, quando desenergizado;

A Figura 2.22 mostra uma imagem de um relé temporizador, e a Figura 2.21 mostra um diagrama de temporização no modo on-delay deste temporizador, este diagrama é encontrado no datasheet fornecido pelo fabricante. A letra "t" neste diagrama significa o tempo configurado e "t-a" significa que o período é menor que o tempo configurado.

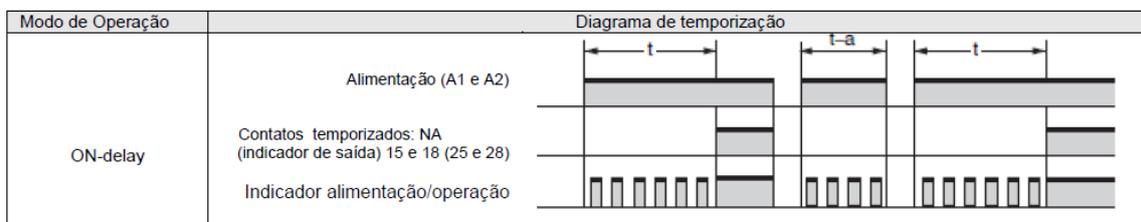


Figura 2.21: Diagrama de temporização.



Figura 2.22: Temporizador.

## 2.13 Automação laboratorial

Os desafios envolvidos no processo de automação de um laboratório podem variar significativamente, dependendo do tipo de automação que se deseja realizar <sup>1</sup>. O grau ótimo de automação depende das configurações do laboratório e considerações de custo, volume de atividades, flexibilidade, tempo para instalação, espaço disponível, disponibilidade de pessoal técnico especializado, segurança e confiabilidade. Qualquer laboratório pode se beneficiar da automação, mas determinar o que deve ser automatizado e qual o grau dessa automação deve ser feito caso a caso. As opções variam desde a automação pontual de um ou alguns poucos processos, até a adoção de sistemas completamente integrados.

O grau de automação mais adequado para cada laboratório depende de três fatores fundamentais: custo, quantidade de amostras processadas (*throughput*) e flexibilidade. O custo sempre será um ponto central, independentemente do tipo de laboratório. Os outros dois fatores são, inversamente proporcionais, então é conveniente que se escolha um deles como prioritário. No caso de laboratórios de pesquisa, como os da Embrapa, flexibilidade tende a ser mais importante que velocidade de processamento. Além desses três fatores, existem outros que podem assumir diferentes graus de importância dependendo do tipo de laboratório, como segurança, confiabilidade, espaço físico requerido, proporção de testes de rotina, etc.

Embora as atividades de cada laboratório possam variar significativamente, é possível resumi-las num esquema genérico, como mostrado na Figura 2.23.

### 2.13.1 Benefícios da automação

Existem diversos motivos pelos quais pode ser interessante investir na automação de processos laboratoriais. Alguns exemplos que se aplicam ao nosso caso:

Melhoria da qualidade: em muitos casos, os sistemas automáticos podem oferecer resultados mais

<sup>1</sup>Sub-seção adaptada de (BARBEDO J.G., 2012)

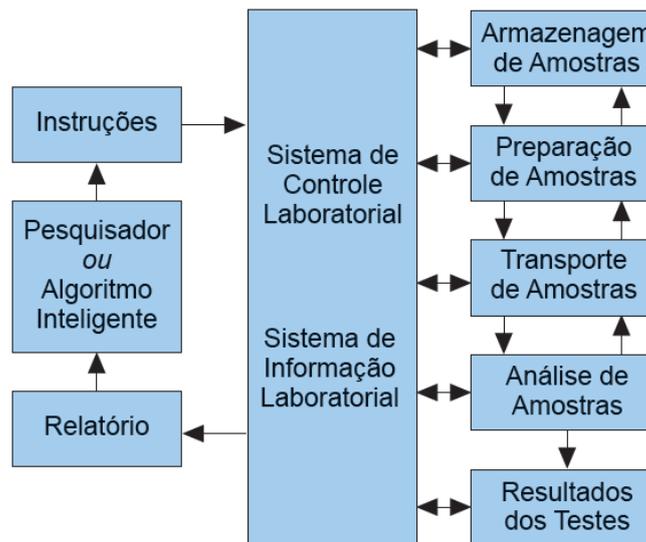


Figura 2.23: Esquema de funcionamento de um laboratório. (BARBEDO, 2012)

confiáveis do que aqueles obtidos por meio de processos manuais. Em particular, computadores e sistemas robóticos não estão sujeitos a fatores que sabidamente levam a erros em processos realizados por humanos, como distrações externas e fadiga.

Melhoria da eficiência do laboratório: os sistemas automáticos de gerenciamento laboratorial podem ser muito úteis para reduzir redundâncias e evitar falhas de comunicação, especialmente em casos em que muitas pessoas estão envolvidas e as atividades são altamente interconectadas.

Aumento da velocidade com que as atividades são completadas: enquanto alguns processos não podem ser acelerados, outros podem ser significativamente acelerados pelo uso de ferramentas de automação. Em particular atividades tediosas e/ou repetitivas, muitas vezes podem ser realizadas automaticamente de maneira rápida e sem esforço.

### 2.13.2 Avaliação das alternativas

Uma vez que se decida pela automação, deve-se escolher qual sistema será implantado e quais equipamentos serão adquiridos. Existem três fatores básicos a serem considerados no momento de se determinar a melhor escolha: a qualidade, custo e tempo (de implantação e aprendizado). Deve-se escolher um desses como o mais importante, porque isso determinará os outros dois fatores:

- Alta qualidade quase sempre acarretará em aumento do custo e do tempo de implantação e aprendizado.
- Baixo custo quase sempre acarretará perda de qualidade e aumento do tempo.
- Tempo de implantação e aprendizado curto quase sempre acarretará perda de qualidade e aumento dos custos.

Além desses fatores gerais, existem outros mais específicos que devem também ser levados em conta no momento de decidir pelo sistema mais adequado. Alguns deles são descritos a seguir:

**Integração com o restante do fluxo de trabalho.** Quando se deseja substituir um certo processo manual por um automático, é importante observar não apenas se a ferramenta automática realiza a tarefa satisfatoriamente, mas também se sua integração com os processos anteriores e posteriores dentro do fluxo de trabalho pode enfrentar algum problema.

**Evolução futura do laboratório.** Laboratórios de pesquisa frequentemente operam nas fronteiras do conhecimento. Como resultado, novas linhas de pesquisa e novas atividades podem ser iniciadas dentro de um espaço relativamente curto. Dessa forma, é desejável que um sistema de automação tenha uma capacidade de se adaptar a novas situações, a fim de evitar que este tenha que ser trocado pouco depois de ter sido implantado, simplesmente pelo surgimento de uma nova situação.

**Confiabilidade do sistema automático.** Existem várias maneiras de se medir a confiabilidade de um sistema de automação. Por exemplo, tem-se o "uptime" (período em que uma máquina fica operacional), tempo médio entre falhas, número médio de operações entre falhas etc. É importante observar que não existem sistemas 100% confiáveis. Outros fatores também podem influenciar a confiabilidade tais como características ambientais do laboratório, habilidade e experiência do usuário, tipo de aplicação, etc.

**Flexibilidade do sistema.** Este fator está intimamente ligado aos demais, e diz respeito à capacidade do sistema automático de se adaptar a variações nas demandas do laboratório. É o sistema que deve se adaptar ao processo, não o contrário.

**Versatilidade do sistema.** Este fator diz respeito à capacidade do sistema realizar diversos tipos de tarefas e se adaptar a diferentes configurações das tarefas a ele submetidas.

**Usabilidade do sistema.** Este fator diz respeito à facilidade de aprendizado e uso do sistema. Este é um dos fatores mais difíceis de se avaliar já que cada usuário tem suas preferências pessoais, diferentes formações e expectativas, etc. Portanto é conveniente que os potenciais usuários estejam envolvidos em todas as etapas do processo, a fim de determinar quais características de usabilidade são mais importantes naquele contexto particular

### **2.13.3 Automação laboratorial nos dias atuais**

A automação de laboratórios no contexto atual mostra-se bastante evoluída em termos tecnológicos e de versatilidade das soluções, as empresas conseguem reunir diversos requisitos demandados pelos pesquisadores em únicas plataformas de processamento. A diversidade de arquiteturas e funcionalidades são imensas e focaremos naquilo que a maioria oferece como padrão.

- **Armazenagem de amostras:** em laboratórios de pesquisa, os testes são conduzidos em amostras armazenadas em bibliotecas de amostras e recuperadas conforme necessário. Essas bibliotecas podem conter um número enorme de amostras e, à medida que esse número cresce, o sistema de ensaios vai se tornando mais complexo. As tarefas relacionadas ao armazenamento incluem:

1. **Coleta de amostras:** aquisição de amostras, armazenamento físico, manipulação física.

2. Gerenciamento de materiais: logística, controle de qualidade e sistemas de integração.
  3. Instrumentação e automação laboratorial: preparação, recuperação e seleção das amostras.
- Estágio de preparação: normalmente é o que apresenta o maior grau de automação. As tarefas que podem ser automatizadas incluem:
    1. Identificação e classificação de amostras;
    2. Gravação dos dados;
    3. Centrifugação;
    4. Remoção de tampas;
    5. Disposição das amostras nos dispositivos de análise.
  - Transporte: o transporte do carregamento e descarregamento das amostras entre as etapas de armazenamento, preparação e análise. Isso pode ser alcançado por meio de trilhos lineares, empilhadeiras e braços robóticos.
  - Análise das amostras: após seleção e preparação, as investigações podem ser realizadas através de sistemas automáticos ou por métodos com baixos níveis de automação. Dentre os equipamentos automáticos que podem ser utilizados nesta etapa, podemos citar:
    1. Estação de trabalho para pipetagem;
    2. Detector de resultados : absorvância, bioluminescência, radioatividade, etc;
    3. Dispenser : para pipetagem em massa;
    4. Seladores : selagem automática de microplacas com uma camada protetora ;
    5. Incubadoras : fornecem ambiente com temperatura e umidade adequados;
    6. Lavadores : para lavagem rápida das placas usando as substâncias apropriadas;
    7. Autoamostradores : injetam amostras nos instrumentos de análise.

## 2.14 Soluções em automação laboratorial

Existem várias empresas no ramo de automação laboratorial, oferecendo soluções cada vez mais versáteis e oferecendo uma maior oportunidade de escolha para os usuários finais do sistema. As soluções vão desde as mais específicas até as soluções mais gerais, com foco em flexibilidade, modularidade, velocidade de processamento entre outros. A escolha de determinado fabricante, ou de determinado conjunto de soluções, deve ser feita de acordo com a possibilidade de atendimento dos requisitos do cliente e das diversas variáveis explicadas nas seções anteriores. Aqui serão apresentadas algumas soluções comerciais de grandes empresas no mercado, lembrando que existem empresas que focam em soluções que atendem necessidades mais específicas do que as apresentadas.

A *Agilent Technologies* provê soluções em automação laboratorial para diversas demandas e necessidades. Um de seus produtos é o *Agilent BioCel System* que conta com plataformas de manipulação de



Figura 2.24: Agilent BioCel 900. (Agilent Technologies, 2009)

líquidos customizáveis, braços robóticos de manipulação direta, centrifugação, rastreamento de amostras por código de barras entre outros. A Figura 2.24 mostra uma imagem do produto.

A *paa-Automation (Peak Analysis & Automation)* oferece soluções modulares com opção de integrar os seus dispositivos em diversas montagens. Utiliza braços robóticos para manipulação de amostras, codificação por código de barras, dispositivos de armazenagem, manipulação de líquidos, pratos e tubos, empilhadores, incubadores e agitadores entre outros. A Figura 2.25 mostra um produto da *paa-Automation* chamado *Automate.it Safecel*, este produto tem opção de escolha dos módulos que irão compôr a solução de modo a oferecer mais flexibilidade ao cliente.



Figura 2.25: Automate.it Safecel (Peak Analysis & Automation, 2010)

A Tecan é uma empresa voltada exclusivamente para soluções de automação laboratorial, oferece soluções de estações de trabalho completas, com integração de *hardware* e de *software* entre os seus dispositivos. Diferente das empresas anteriores, a empresa oferece dispositivos mais acessíveis para desenvolvedores de soluções de automação customizadas que utilizam os produtos dela. O *software* de programação do produto pode ser achado facilmente na internet e ele ainda possui uma opção de simulação *offline*, na qual podemos simular o posicionamento dos manipuladores sem necessidade de adquirir o produto propriamente dito.

Um exemplo de produto de automação laboratorial da Tecan é o Freedom EVO<sup>®</sup>, ele possui opções de configuração do sistema de forma customizada, podendo adquirir os módulos do produto individualmente ou a solução integrada por completo. Contempla todos os equipamentos dos produtos mencionados anteriormente, além da possibilidade de integração com espectrofotômetros e lavadores de pratos que precisam ser da mesma marca, além das facilidades para desenvolvedores e projetistas já descritas. A Figura 2.26 mostra uma possível configuração do produto.



Figura 2.26: Tecan Freedom EVO<sup>®</sup> (Tecan, 2009).

## Capítulo 3

# Descrição do Processo

*Neste capítulo, descrevemos o processo de hidrólise enzimática detalhadamente tal como ele é realizado e também explicaremos os equipamentos utilizados no laboratório e suas funcionalidades.*

### 3.1 Descrição do processo de reação enzimática

Uma hidrólise enzimática consiste numa reação química catalisada por um conjunto de enzimas que utiliza água ( $H_2O$ ) para quebrar a celulose em seus monômeros (glicose). Este processo, tal como ele é realizado nos laboratórios da Embrapa Agroenergia - Brasília/DF, pode ser dividido em 4 sub-processos para melhor entendimento do problema, a seguir é mostrado esta divisão:

- A) Processo de dosagem da solução no reator;
- B) Processo de reação enzimática no reator;
- C) Processo de análise da concentração de glicose na solução;
- D) Processo de lavagem da biomassa com água (enzimas já saturadas) e reinício do processo (volta para A);

A Figura 3.1 ilustra o fluxograma completo e detalhado do processo tal como ele é realizado manualmente, a partir deste fluxograma foi elaborada a estratégia mais detalhada da automação.

No processo A, são realizadas as condições iniciais para a hidrólise enzimática. Para isto, é necessário um pré-tratamento adequado da biomassa, onde esta é submetida a uma reação com um produto ácido que quebra as moléculas de lignina e hemicelulose as quais impedem a ação das enzimas celulases para a degradação da celulose. Após isto, é retirada uma amostra da biomassa que é pesada antes e depois de aquecê-la em uma estufa, com os resultados obtidos por estas pesagens é possível realizar o cálculo da umidade do bagaço de cana e cálculo do seu peso seco. A solução enzimática, que é um coquetel composto de vários tipos de enzimas, utilizada para a reação é misturada a uma solução tampão que tem o objetivo de controlar o p.H. da mistura. Este coquetel degrada diferentemente a celulose, sendo composto principalmente por três classes de diferentes de enzimas (exoglucanases, endoglucanases e  $\beta$ -glucosidase). A mistura das duas precisa ser preparada na proporção de 1:100 de coquetel enzimático para solução tampão. A solução resultante é adicionada à biomassa na proporção de 10 ml de solução para cada 1 grama

de biomassa (peso seco).

O processo B é realizado em um erlenmeyer que contém a solução misturada com a biomassa dentro de um agitador orbital com controle de temperatura, onde, em intervalos de tempo pré-determinados uma amostra é retirada do sistema para análise da quantidade de glicose. É neste processo que a hidrólise enzimática de fato ocorre, no reator com a agitação e temperaturas adequadas as enzimas degradam a celulose e a transformam em glicose. Esta etapa precisa ser constantemente monitorada devido ao processo ser bastante lento e pelo fato da quantidade de glicose precisar ser quantificada em intervalos de tempo regulares ao longo do processo.

O processo C acontece simultaneamente ao processo B, neste processo a amostra é retirada, utilizando uma pipeta, e colocada em uma centrífuga para realizar a separação da fração líquida e da sólida, a retirada de resíduos sólidos da amostra é necessária, pois podem interferir no processo de análise da quantidade de glicose. A análise é realizada em um espectrofotômetro, porém, antes deve ser aplicado uma reagente para reagir com a glicose e obter uma coloração rósea na amostra para o espectrofotômetro conseguir realizar a quantificação de glicose.

O processo D ocorre quando a quantidade de glicose se estabiliza muito antes de atingir a quantidade esperada, isto é sinal de que as enzimas saturaram e não estão mais digerindo a celulose. Quando isto ocorre é realizada uma etapa de lavagem da mistura da reação para coleta de glicose, e sua posterior quantificação, e também para a limpeza da glicose no sistema e dessa forma poder colocar um novo coquetel de enzimas para realizarem novamente a degradação da celulose.

As etapas A e D não foram automatizadas em virtude, primeiramente, do processo A ser realizado para configurar as condições iniciais do processo e, neste caso, o grau de automatização desta etapa precisaria ser muito elevado para obter um ganho consideravelmente pequeno. Já o processo D não foi automatizado por ser muito manual.

A Figura 3.2 ilustra o loop principal, que é a etapa mais crítica, do processo e que foi utilizada como base para a automatização do processo.

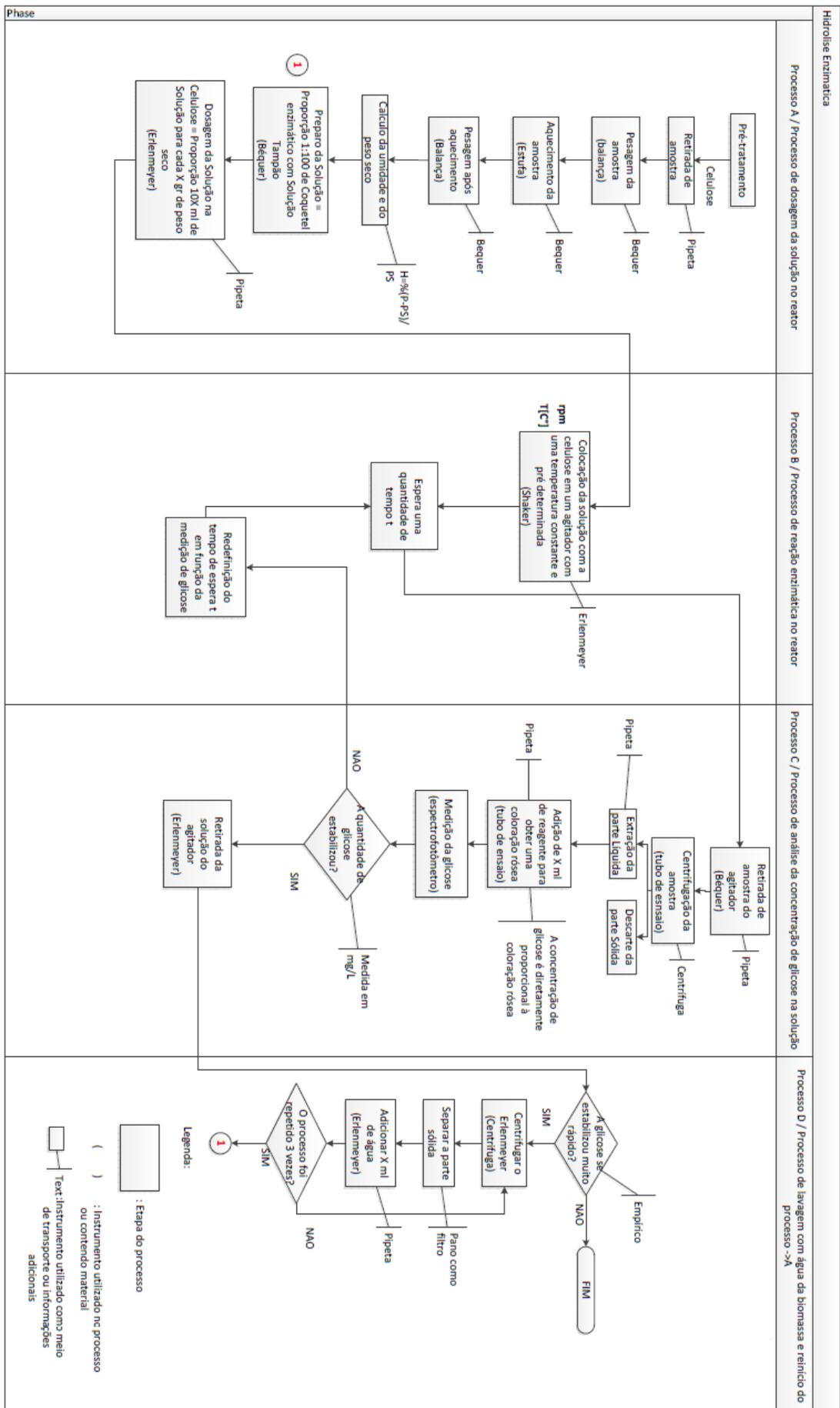


Figura 3.1: Fluxograma geral do processo manual.

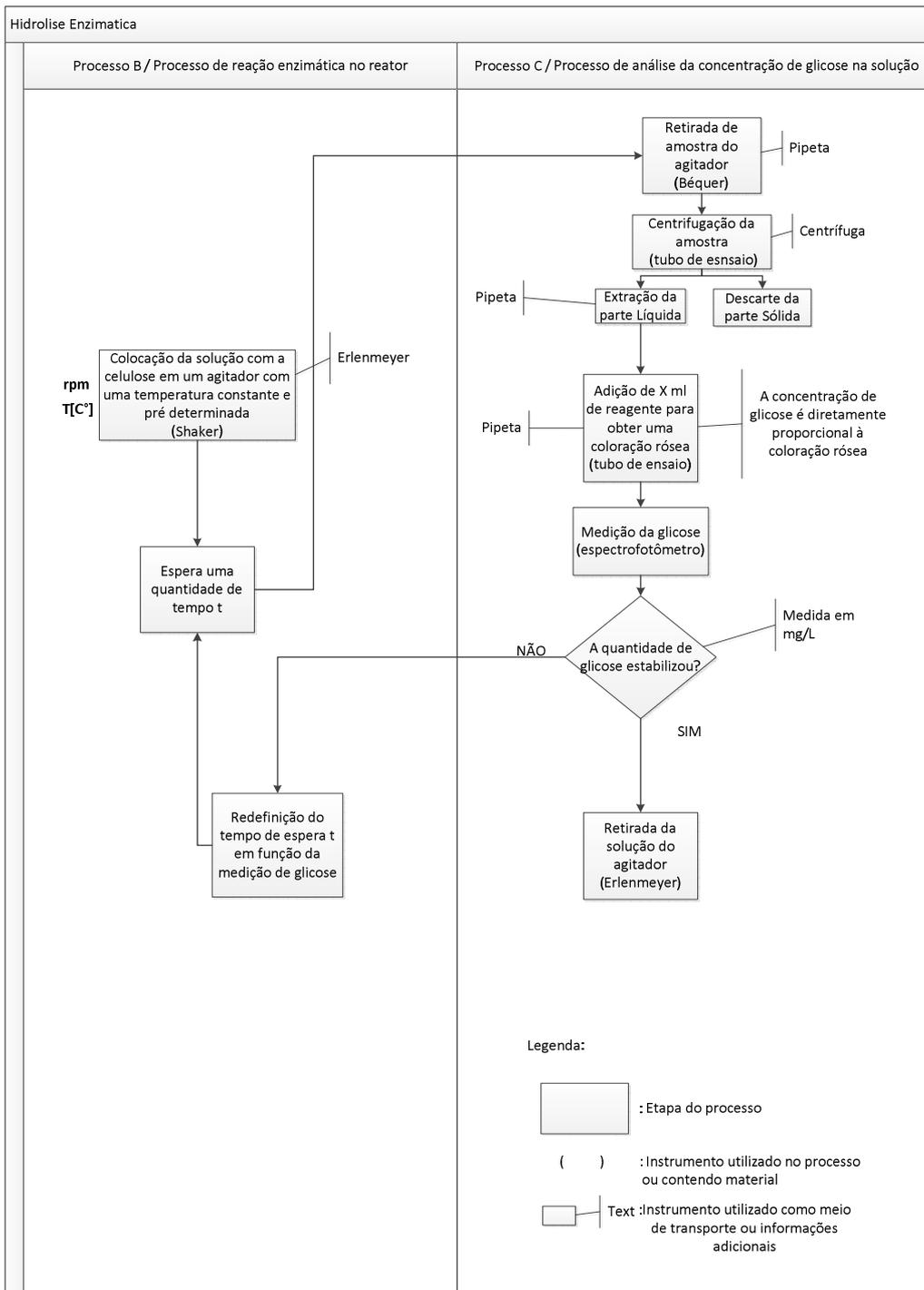


Figura 3.2: Fluxograma do processo manual.

## 3.2 Descrição do laboratório

Para descrever o laboratório pode-se começar pelos dispositivos de armazenagem e transporte de material, como também a vidraria necessária para realização dos experimentos. Entre alguns desses dispositivos estão o erlenmeyer, o béquer e a pipeta que são mostrados na Figura 3.3.



(a) Pipeta



(b) Béquer



(c) Erlenmeyer

Figura 3.3: Dispositivos básicos do laboratório.

O laboratório também possui uma incubadora com agitador orbital de erlenmeyer, semelhante ao mostrado na Figura 3.4, sua funcionalidade é agitar a reação e manter a temperatura numa faixa ótima para a hidrólise enzimática ocorrer, esta faixa ótima ainda é alvo de pesquisas laboratoriais devido ao fato da taxa de degradação de celulose pelas enzimas serem influenciadas pela temperatura de forma diferente para cada tipo de enzima.

O reator químico tem vantagens em relação ao agitador orbital de erlenmeyer pois obtêm ganhos comparativos na cinética da reação, devido a agitação ser mais eficiente, além de obter um controle mais preciso da temperatura da mistura. Em contrapartida o agitador de erlenmeyer é mais fácil de utilizar e possibilita a execução de múltiplos experimentos no mesmo equipamento.



Figura 3.4: Agitador orbital com controle de temperatura semelhante ao utilizado no processo.

A centrífuga mostrada na Figura 3.5, é um dispositivo que têm a função de centrifugar tubos com amos-

tras em velocidades muito grande, com a força da centrifugação a parte sólida da mistura é concentrada no fundo do tubo, dessa forma este equipamento é utilizado principalmente para a separação de material líquido de sólido, no caso particular do processo de hidrólise enzimática a separação ocorre antes da análise da quantidade de glicose.

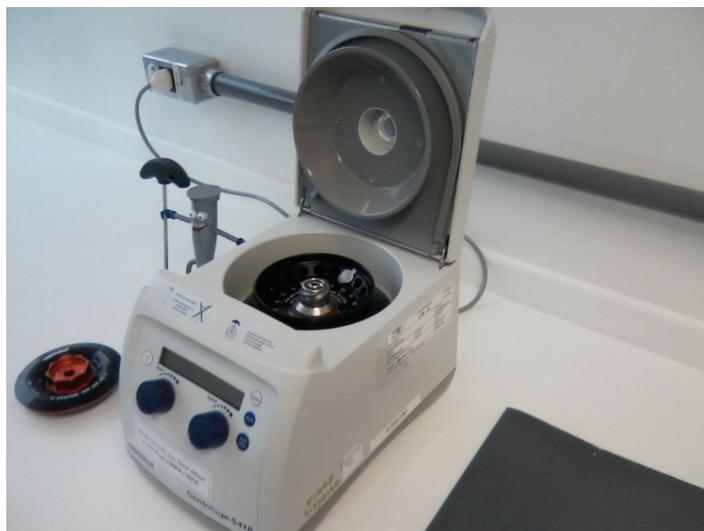


Figura 3.5: Centrífuga utilizada no processo.

Outro equipamento apresentado no laboratório para a realização do processo de hidrólise enzimática é o espectrofotômetro, mostrado na figura 3.6 , ele é um aparelho amplamente utilizado em laboratórios, cuja função é a de medir e comparar a quantidade de luz (energia radiante) absorvida por uma determinada solução. Ou seja, ele é usado para medir (identificar e determinar) a concentração de substâncias, que absorvem energia radiante, em um solvente. Este equipamento tem comandos de medição e monitoramento automatizado realizadas por um computador através de um software que vem junto com o instrumento.



Figura 3.6: Espectrofotômetro utilizado.

## Capítulo 4

# Desenvolvimento

*Neste capítulo é detalhado todos os procedimentos para o desenvolvimento do trabalho começando pela metodologia geral de abordagem do problema até especificações detalhadas da concepção do projeto.*

### 4.1 Introdução

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foi elaborada uma metodologia de processo bastante organizada em todo o projeto, este processo é constituído de algumas etapas que são apresentados a seguir.

Primeiramente foi feita uma análise de esforço-impacto sobre automatização das etapas, assim poderíamos decidir quais etapas trariam mais benefício se fossem automatizadas. Após a elaboração de um fluxograma descritivo de todo o processo laboratorial de como ele é realizado, ver Figura 3.1, foi decidido automatizar apenas as etapas B e C, resultando no fluxograma reduzido para o da Figura 3.2, a partir daí foi definido um projeto preliminar de automação contendo a filosofia de controle, estratégias e tipos de equipamentos utilizados, após esta etapa foi feita uma representação matemática das etapas (eventos) do processo de automação em forma de rede de Petri que atende ao fluxograma da primeira etapa, nesta etapa também foi concebida o sequenciamento de operações do sistema de automação e dos manipuladores robóticos (com simulação). A partir disso temos uma base para a implementação e programação do controlador do processo e posteriormente a criação de um projeto completo do reator que atenda às nossas especificações, incluindo modelagem matemática e simulação dos controles no reator. Depois disto foi necessário elaborar um projeto detalhado de automação incluindo especificação técnica de todos os equipamentos do projeto e documentação de engenharia.

### 4.2 Projeto preliminar de automação

O projeto preliminar de automação consistiu na criação da filosofia de controle geral e uma pesquisa sobre produtos e estratégias que aplicadas contemplariam nossos requisitos. A escolha do produto Tecan Freedom EVO<sup>®</sup> para a automação dos eventos dos manipuladores robóticos foi tomada em virtude do fato deste produto oferecer uma alta confiabilidade no mercado e uma capacidade de integração de dispositivos variados, o fabricante nos oferece uma plataforma de integração de todos os seus produtos e softwares o

que diminui o problema em relação à comunicação de módulos distintos, além de ter uma versão demo do software que nos permite programar o sequenciamento de operações com possibilidade de execução em modo simulacional para teste de eventuais problemas de posicionamento dos braços em regiões que oferecem riscos. A partir disto chegou-se a uma solução de automação que seria dividida em duas grandes partes:

- Programação e simulação dos eventos e do sequenciamento de operações dos manipuladores robóticos através dos softwares Tecan Freedom EVOware (software de programação das posições e das ações dos manipuladores) e do software Tecan EVOsim (ferramenta que simula em 3D a bancada, os manipuladores e suas ações de acordo com o que foi programado).
- Projeto de seis reatores cada um com controle de temperatura e velocidade com especificações de velocidade de rotação e temperatura numa faixa de trabalho que contêm o ponto de operação e dimensões que atendam à uma integração com o módulo Tecan Freedom EVO<sup>®</sup>.

## 4.3 Manipulador robótico

### 4.3.1 Sequenciamento das operações

Para realizar o sequenciamento das operações, antes era preciso identificar alguns problemas durante o processo. Primeiramente foi detectado alguns problemas para automatizar a análise da quantidade de glicose, como a quantidade de glicose aumenta com o tempo, a dosagem de reagente que é necessária colocar na amostra para a realização de análise também precisava ser ajustada ao longo do tempo. Isto precisa ocorrer em virtude do fato de que a glicose na amostra analisada precisa estar diluída de uma forma que a leitura realizada pelo espectrofotômetro esteja correta, esta limitação se deve ao fato de o espectrofotômetro possuir uma determinada faixa de onda no qual ele realiza a medição. Se a quantidade de reagente colocada nas amostras ao longo do tempo for sempre a mesma, vai acontecer um momento, em que as leituras irão "estourar" pois a quantidade de glicose aumentará e valores inconclusivos serão lidos. Para solucionar este problema foi necessário realizar a retirada de 4 amostras e adicionar 4 volumes diferentes de reagentes de forma que a proporção entre o volume da amostra e o volume de reagente seja de 1:1, 1:5, 1:10 e 1:20. Desta maneira o espectrofotômetro realiza 4 leituras para cada reator e, portanto, sempre cobrirá a faixa de leitura da quantidade de glicose em qualquer instante de tempo de maneira automatizada.

O sequenciamento de operações propriamente dito foi elaborado de acordo com as necessidades que deveriam ser contempladas pelo projeto de automação resolvendo os problemas de automação já na fase preliminar do projeto do sequenciamento, para o começo do sequenciamento foi necessário a elaboração de um fluxograma contendo o detalhamento das operações, este pode ser visualizado na Figura 4.1.

Neste fluxograma percebemos mais detalhadamente a sequência de ações dos manipuladores e as decisões que devem ser tomadas para automação do processo. As operações podem ser resumidas da seguinte forma.

- 1) Iniciar Ciclo (4 vezes):

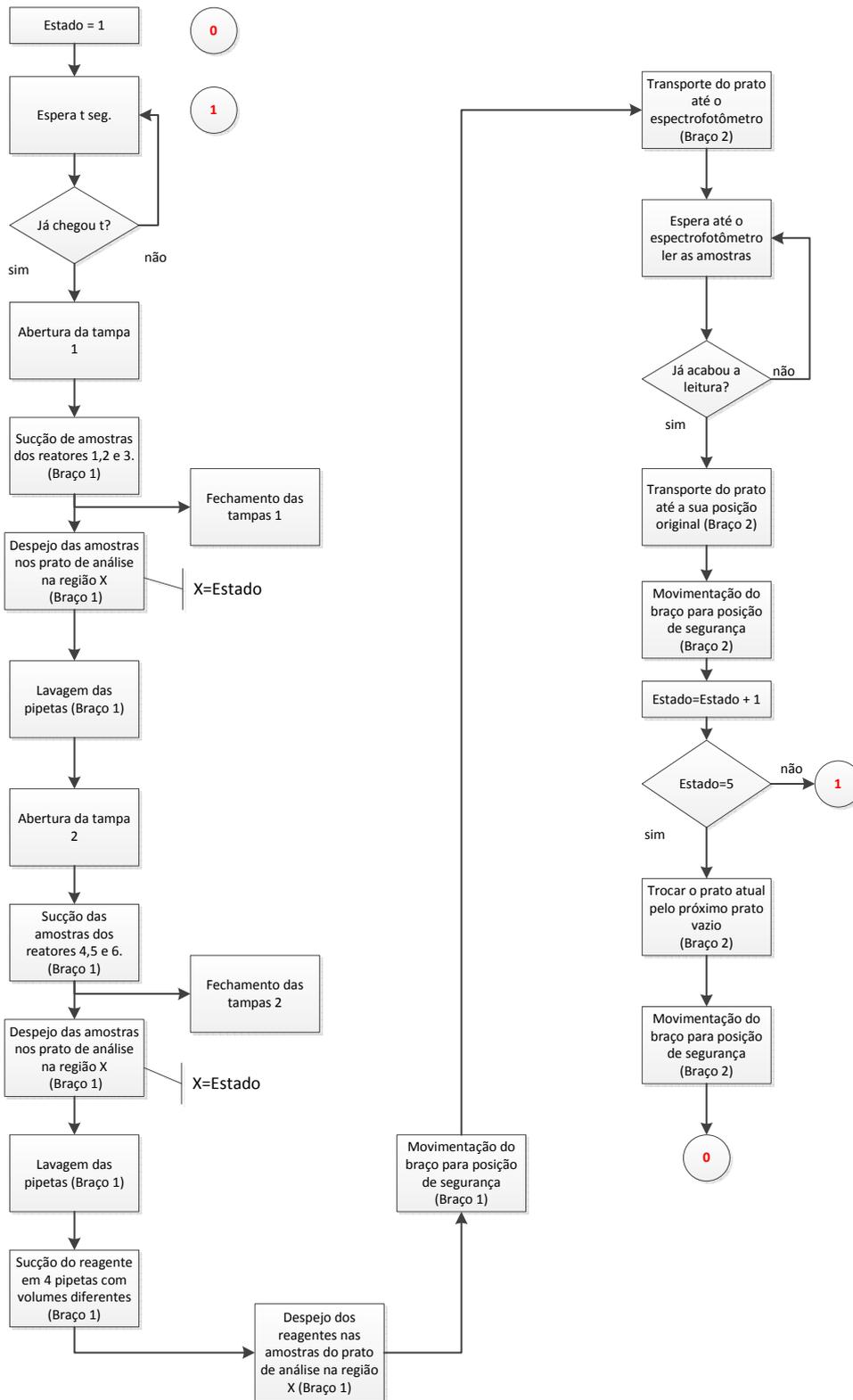


Figura 4.1: Fluxograma da movimentação do manipulador.

- 2) Espera de tempo  $t$ ;
- 3) Coleta de 4 amostras de cada reator e colocação delas no prato para análise;
- 4) Colocação de volumes diferentes de soluções de reagente no prato;
- 5) Colocação do prato no espectrofotômetro;
- 6) Análise do espectrofotômetro;
- 7) Retirada do prato de dentro do espectrofotômetro e colocação dele na posição inicial.

8) Fim Ciclo

- 9) Troca de prato por um novo;

10) Reinício do processo->1;

Como temos uma microplaca para análise no espectrofotômetro constituída de 96 lugares (12x8), então foi projetado uma solução na qual aproveite todos os lugares do prato, depois é realizado a troca deste prato por outro novo, dessa forma 6 reatores atendem as especificações laboratoriais e ao mesmo tempo otimiza o aproveitamento do espaço do prato de análise pois se torna um bom divisor de 96. A Figura 4.2 mostra as quatro regiões da microplaca no qual ocorrerá o despejo das amostras que está relacionada com qual ciclo que está sendo executado, em cada região está 4 locais reservados para a colocação das amostras de cada reator, como são 6 reatores então são totalizados 24 lugares em cada região que deverá ser preenchido em cada loop, depois dos quatro loops ocorrerem todos os lugares dos pratos estarão preenchidos, então posteriormente é realizado a troca deste prato por outro limpo.

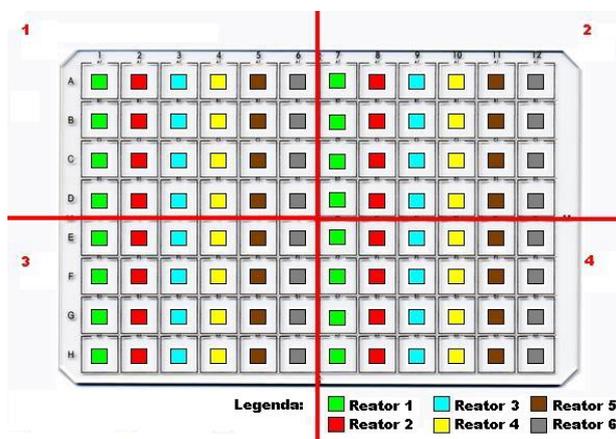


Figura 4.2: Microplaca dividida.

Após a criação do fluxograma, foi realizado uma modelagem de Rede de Petri que pode ser visualizado com todos os detalhes na Figura III.5 do anexo III. As tabelas III.1 e III.2 do mesmo anexo relacionam e explicam as atividades e transições da Figura III.5. A partir disto foi finalizado uma solução que possui a configuração da Figura 4.3, utilizando o software Freedom EVOsim.

O *washer* (lavador) é o local onde contém um líquido para a lavagem das pipetas, como não há material corrosivo ou ácido este líquido pode ser água mesmo. O reagente é onde fica o líquido que reage com

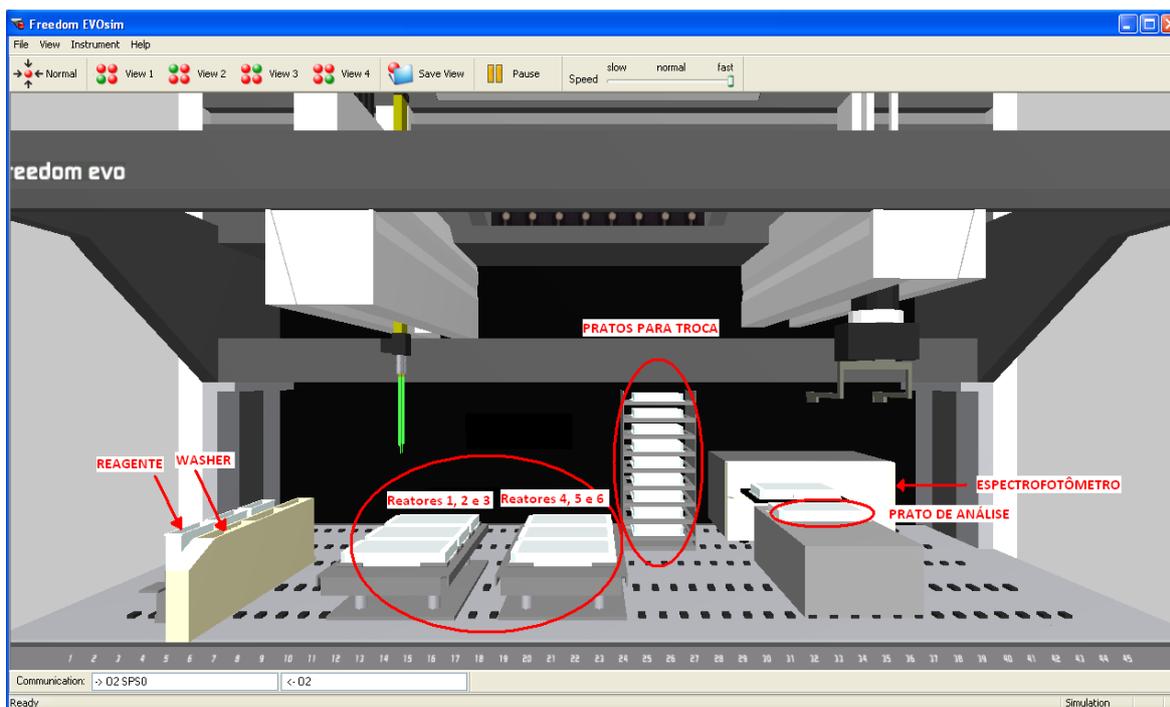


Figura 4.3: Bancada explicada.

a glicose ganhando uma coloração rósea para ser analisado pelo espectrofotômetro, o pratos para troca são pratos vazios que serão utilizados para troca quando o prato usado estiver preenchido com amostras já analisadas. Como os reatores ainda não foram projetados nesta etapa do processo, teve-se que deixar os locais reservados onde eles ficarão. O sistema também é composto por dois braços robóticos, um para pipetagem e outro para carregamento dos pratos para as posições onde há execução de ações.

Para análise da quantidade de glicose, **utilizou-se o leitor de absorvância já comentado na seção 3.2** (espectrofotômetro). Para que haja um controle das ações do espectrofotômetro que **atue em conjunto** com as ações dos manipuladores robóticos, o equipamento tem que ser compatível com a plataforma Freedom EVO<sup>®</sup>. Portanto, para efeitos de simulação foi utilizado o espectrofotômetro SUNRISE<sup>™</sup>, ele é um leitor de microplacas que pode ser integrado com sistemas de manipulação de líquidos como o Freedom EVO<sup>®</sup>. A desvantagem é que não podemos simular as ações dele de modo *offline*, a única opção é programar diretamente o espectrofotômetro adquirindo o equipamento. A Figura 4.3 mostra o equipamento posicionado na bancada, porém não é possível fazer controle sobre ele, como por exemplo, abrir e fechar a gaveta da microplaca, ou realizar leituras em ambiente de simulação.

## 4.4 Projeto do reator

O projeto do reator onde ocorre a reação enzimática é a parte mais crítica do projeto inteiro de automação, pois, após ter decidido como seria o sequenciamento dos braços robóticos agora temos que integrar um reator no lugar adequado da programação. Infelizmente não foi possível encontrar nenhum reator que contemplasse nossos requisitos, então foi decidido pelo projeto do reator inteiro, visto que os controles dele eram mais simples. A seguir são apresentados alguns requisitos que o reator deve satisfazer:

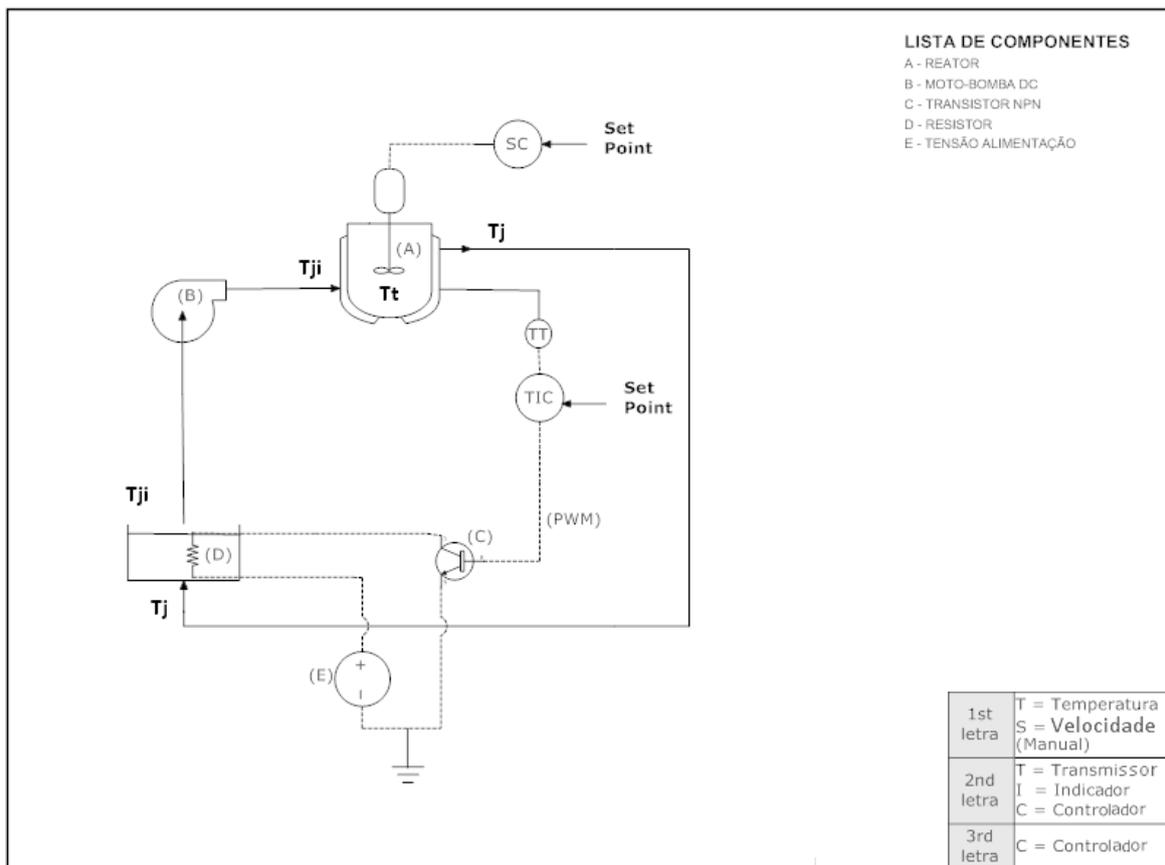


Figura 4.4: Projeto do reator.

- Os reatores devem possuir controle de temperatura, pois, como é um laboratório de pesquisa os estudos sobre influência da temperatura no processo de reação enzimática ainda estão sendo desenvolvidos;
- Os reatores devem possuir opção de variar a velocidade da agitação da reação, pois da mesma forma, pesquisas sobre a influência da velocidade de agitação no processo ainda estão sendo desenvolvidas;
- Os reatores precisam ser vedados, pois, o processo é muito lento e conseqüentemente poderá ocorrer evaporação de água;
- Os reatores precisam ter uma fácil opção de abertura da tampa de vedamento, pois, pode ocorrer a necessidade de troca da mistura ou qualquer tipo de manutenção no reator;
- Os reatores precisam ter fácil manuseabilidade, alta confiabilidade, tem que ser de fácil aprendizado, o espaço físico precisa ser compatível com o espaço disponível, além de ter que ser modular e flexível;

A Figura 4.4 mostra um esquemático geral do projeto do reator, neste figura o reator é aquecido através de uma jaqueta onde circula um líquido aquecido por uma resistência, enquanto o motor da agitação tem um controle direto, o da temperatura precisa de uma malha de realimentação que é feita pelo sensor de

temperatura que transmite um sinal para o controlador e este envia um sinal PWM (modulador por largura de pulso) para um transistor e dessa forma controla a potência empregada ao sistema.

#### 4.4.1 Modelagem da temperatura do reator

Reescrevendo as equações (2.10) e adicionando a equação da Lei de Resfriamento de Newton [3] em (2.11) temos:

$$\frac{dT_j}{dt} = K_1(T_{ji} - T_j) - K_2(T_j - T_t) \quad (4.1)$$

$$\frac{dT_t}{dt} = K_3(T_j - T_t) - K(T_t - T_a) \quad (4.2)$$

sendo

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{\dot{V}_j}{V_j}; \\ K_2 &= \frac{UA}{\rho_j V_j C_{pj}}; \\ K_3 &= \frac{UA}{\rho_t V_t C_{pt}}; \end{aligned}$$

e  $K$  representa um coeficiente de resfriamento, que dependerá da superfície exposta, do calor específico do corpo e também é função de características do meio ambiente e  $T_a$  é a temperatura ambiente.

Precisamos também modelar a temperatura do líquido que aquece o tanque, isto pode ser feito da mesma forma que foi encontrada as equações (4.1) e (4.2), desta forma:

$$\frac{dT_{ji}}{dt} = K_4(T_j - T_{ji}) + \frac{\dot{Q}}{K_5} \quad (4.3)$$

sendo

$$\begin{aligned} K_4 &= \frac{\dot{V}_j}{V_r}; \\ K_5 &= \rho_j V_r C_{pj}; \end{aligned}$$

e  $V_r$  é o volume do recipiente que armazena o líquido de aquecimento e  $\dot{Q}$  é a potência entregue pela resistência no aquecimento deste líquido. Desta maneira temos o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{dT_j}{dt} = K_1(T_{ji} - T_j) - K_2(T_j - T_t) \\ \frac{dT_t}{dt} = K_3(T_j - T_t) - K(T_t - T_a) \\ \frac{dT_{ji}}{dt} = K_4(T_j - T_{ji}) + \frac{\dot{Q}}{K_5} \end{cases} \quad (4.4)$$

Assumindo as condições iniciais iguais a zero e aplicando a transformada de Laplace nestas equações e resolvendo para  $T_t(s)$ , temos:

$$T_t(s) = \frac{K_3 \cdot K_1 \cdot \dot{Q}(s)}{K_5 s^3 + A_3 s^2 + A_4 s + A_5} + \frac{K \cdot T_a(s) \cdot (s^2 + A_1 s + A_2)}{K_5 s^3 + A_3 s^2 + A_4 s + A_5} \quad (4.5)$$

sendo

$$\begin{aligned} A_1 &= K_1 + K_2 + K_4; \\ A_2 &= (K_1 + K_2) \cdot K_4 - K_4 \cdot K_1; \\ A_3 &= K_5 \cdot (A_1 + K_3 + K); \\ A_4 &= K_5 \cdot (A_2 + A_1 \cdot (K_3 + K)) - K_3 \cdot K_5 \cdot K_2; \\ A_5 &= K_5 \cdot A_2 \cdot (K_3 + K) - K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5; \end{aligned}$$

#### 4.4.2 Resposta em malha aberta da temperatura do reator

```

1 - rho_cp_t=3;%J/cm³.°C
2 - rho_cp_j=4.18;%J/cm³.°C
3 - V_t=100;%cm³=ml
4 - V_j=50; %cm³=ml
5 - V_r=500;%cm³=ml
6 - dQdt=500;%W=J/s
7 - f=40;%cm³/s
8 - U_A=200;%hA=J/s.°C
9 - K=0.01;
10 - K1=f/V_j;
11 - K2=U_A/(rho_cp_j*V_j);
12 - K3=U_A/(rho_cp_t*V_t);
13 - K4=f/V_r;
14 - K5=(rho_cp_j*V_r);
15
16 - Ta=25;
17 - Tt0=25;
18 - Tj0=28;
19 - Tji0=28;
20

```

Figura 4.5: Valores da simulação.

Após a modelagem matemática da temperatura dentro do reator, podemos agora simular a resposta da temperatura dentro do tanque em função da quantidade de calor injetada no sistema. Para isto foi utilizada a ferramenta Simulink do software MATLAB. Os valores utilizados para a simulação são mostrados na Figura 4.5, enquanto o código do Simulink pode ser visualizado no anexo III na Figura III.2.

Para estes valores tivemos que escolher valores iguais ou próximos aos que vamos trabalhar, para outros valores mais específicos que só poderiam ser obtidos experimentalmente como por exemplo  $\rho$  e  $C_p$  tivemos que colocar valores plausíveis e não discrepantes com valores previamente aguardados. Os valores  $T_{t0}$ ,  $T_{j0}$  e  $T_{ji0}$  são os valores de temperaturas iniciais do tanque, da jaqueta e da entrada da jaqueta no tanque respectivamente. O resultado desta simulação pode ser visualizado no gráfico mostrado na Figura 4.6, enquanto na Figura 4.7 podemos ver a resposta da temperatura em malha aberta em regime permanente.

Pela análise destes gráficos podemos assumir que a resposta da temperatura do reator aumenta de uma maneira aproximadamente linear ao longo do tempo, e depois de algumas simulações podemos perceber

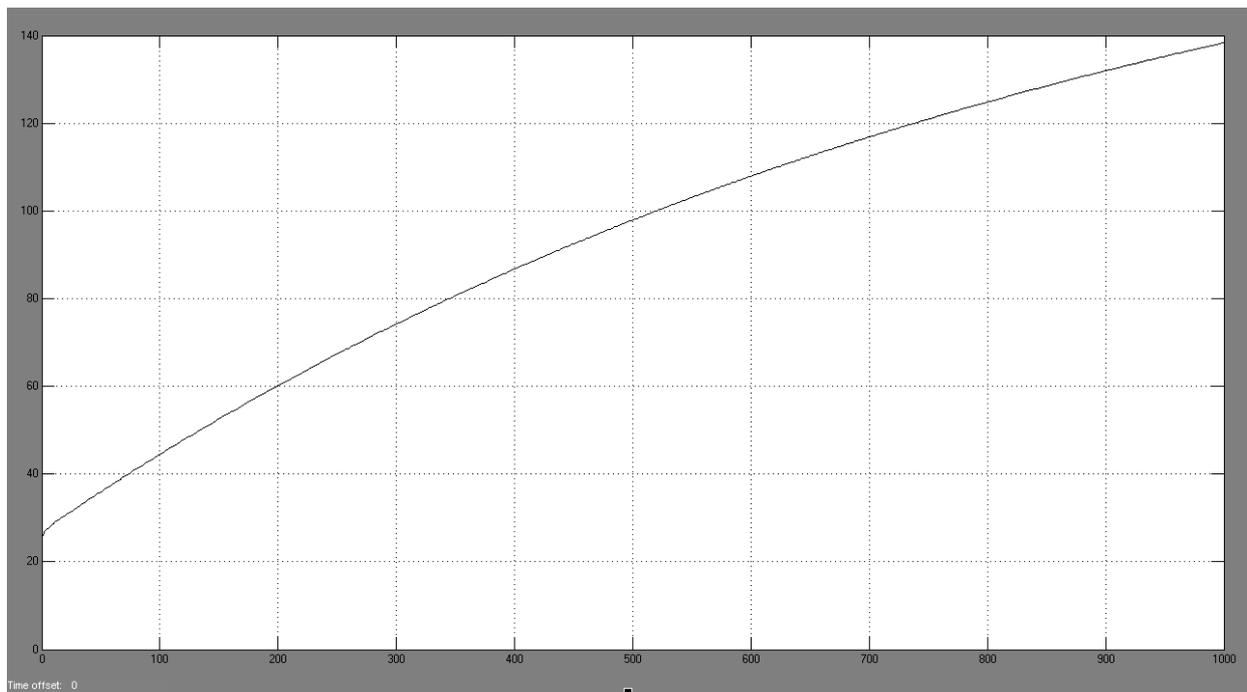


Figura 4.6: Temperatura do reator em malha aberta com aquecimento de 500W de potência.

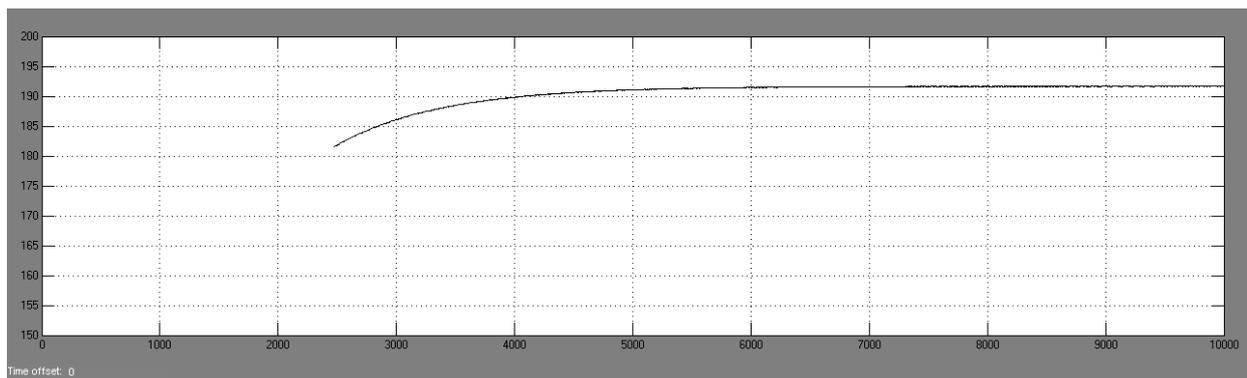


Figura 4.7: Temperatura do reator em malha aberta em regime permanente.

que aumentando a quantidade de calor no sistema, a temperatura é aumentada mais rapidamente também, o que já era esperado. O tempo de aquecimento de quase 9 minutos para chegar aos 100C° é aceitável para os nossos requisitos, caso na implementação do reator isto não for o suficiente basta ajustar o valor da potência empregada no sistema. Em regime permanente chegamos a aproximadamente 192C° para os valores da simulação.

#### 4.4.3 Projeto do Controle de temperatura

A partir da equação (4.5) nós podemos projetar nosso controlador de temperatura. Para o projeto a temperatura ambiente  $T_a$ , foi considerada um distúrbio do sistema, desta forma, projetamos o controlador com foco na variável de controle, que é a temperatura de *set-point*, assim temos o seguinte modelo em malha fechada

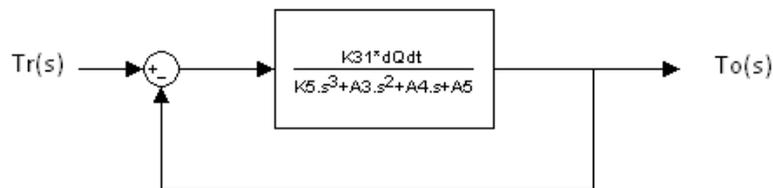


Figura 4.8: Modelo em malha fechada.

Sendo que  $Tr(s)$  é a temperatura de referência, ou temperatura de *set-point*, e  $To$  é a temperatura de saída do sistema. Simulando em MATLAB os valores da Figura 4.5 temos o seguinte lugar geométrico das raízes ilustrado na Figura 4.11, a temperatura de referência escolhida foi de  $60C^\circ$ . A partir deste LGR podemos visualizar que o sistema realimentado negativamente com ganho unitário será estável até o valor de ganho de aproximadamente igual a 14, além de ter um erro em regime estacionário no valor de  $0.2C^\circ$  que pode ser visualizado na Figura 4.10, erro este que se for implementado no sistema real pode vir a aumentar. Pelo LGR podemos projetar nosso controlador para melhorar o erro em regime estacionário e ao mesmo tempo deixar o sistema estável para valores de ganho maiores. Adicionando um controlador no sistema, obtemos o diagrama da Figura 4.9.

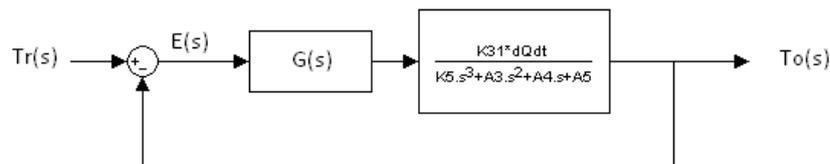


Figura 4.9: Modelo em malha fechada com controlador.

O controlador escolhido foi o PID, cuja função de transferência é

$$G_c(s) = G_1 + \frac{G_2}{s} + G_3s \quad (4.6)$$

Onde  $G_c$  é a função de transferência do controlador,  $G_1$  é o ganho proporcional,  $G_2$  é o ganho integral e  $G_3$  é o ganho derivativo. O PID foi escolhido em virtude de podermos obter um erro nulo no regime estacionário e simultaneamente uma atuação eficaz nos momentos em que o erro varia rapidamente. Os parâmetros do controlador foram selecionado com o objetivo de colocar um zero em -1 com a ação derivativa e deixar o zero da ação integral perto do valor 0, neste caso escolhemos -0.001. O LGR modificado pode ser visualizado na Figura 4.12

Os parâmetros do controlador ficaram assim:

$$G_c(s) = 30 + \frac{0.03}{s} + 30s \quad (4.7)$$

O ganho proporcional poderia ser escolhido dentre diversos valores que o sistema continuaria respondendo de forma adequada, porém, para valores de ganho demasiadamente grande o sistema costuma oscilar

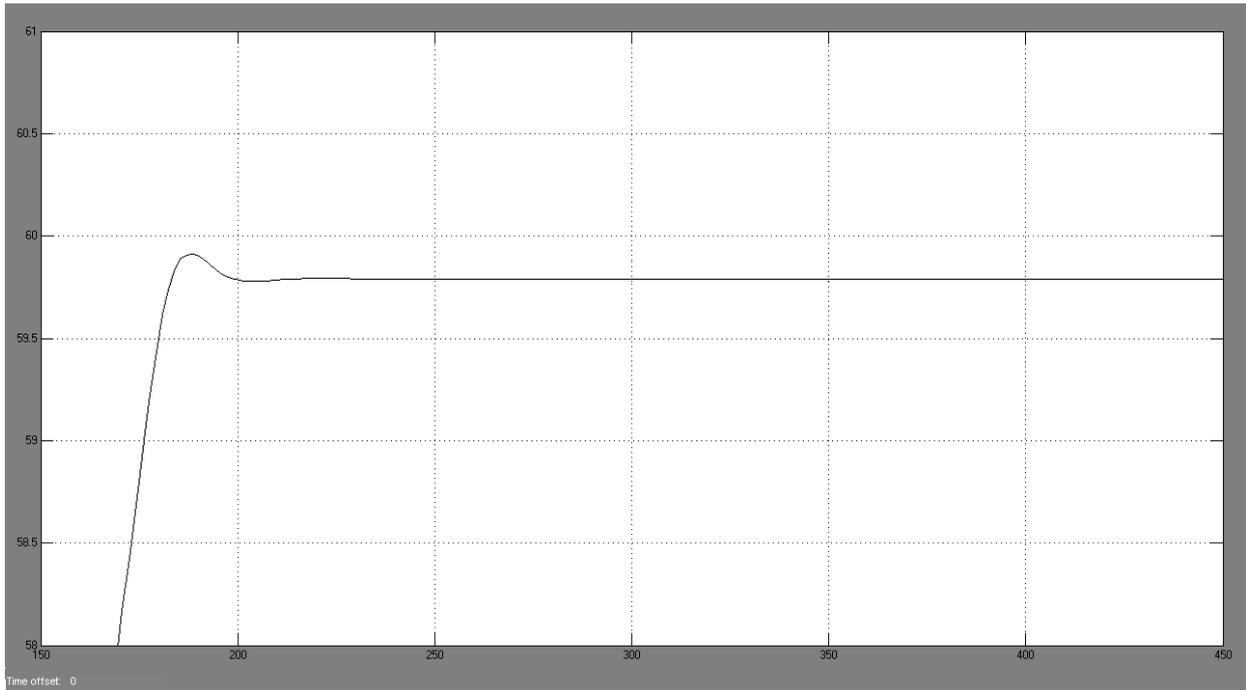


Figura 4.10: Erro no regime estacionário no sistema realimentado com ganho unitário.

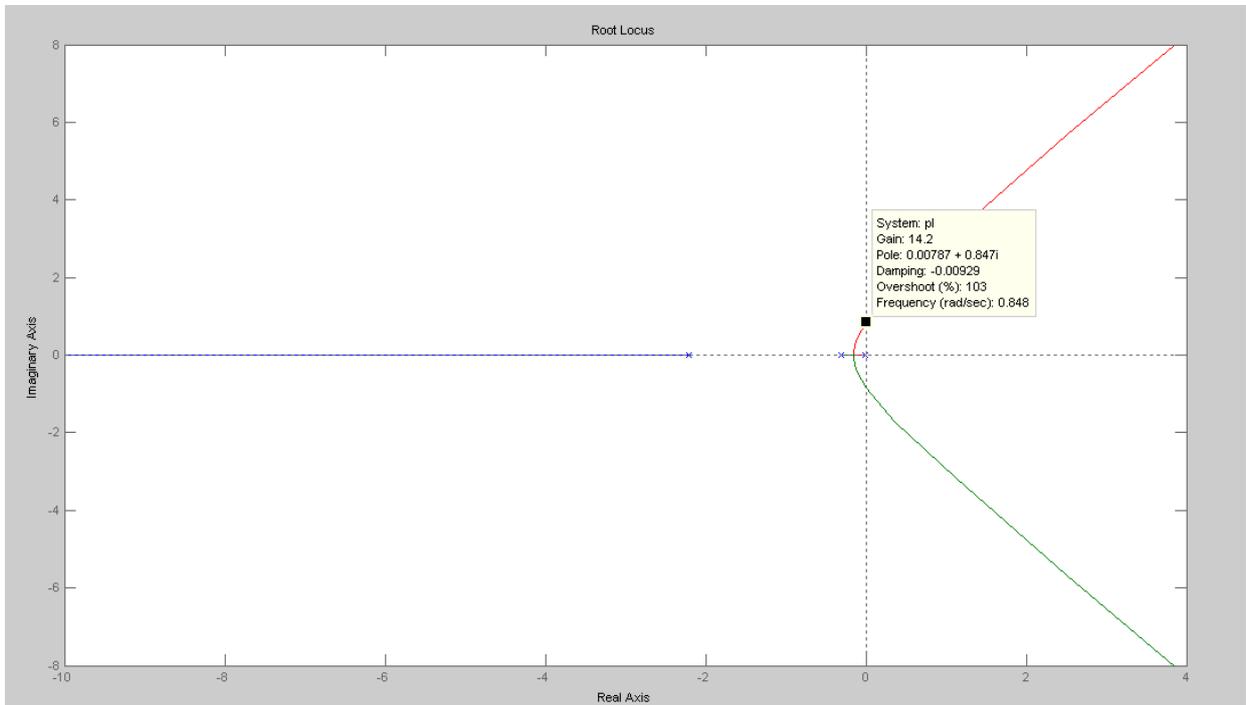


Figura 4.11: Lugar geométrico das raízes para o sistema realimentado com ganho unitário.

bastante, o valor de 30 pois escolhido pois o sistema responde adequadamente para este valor, o ganhos proporcional e integral foram determinados a partir das especificações do projeto do LGR.

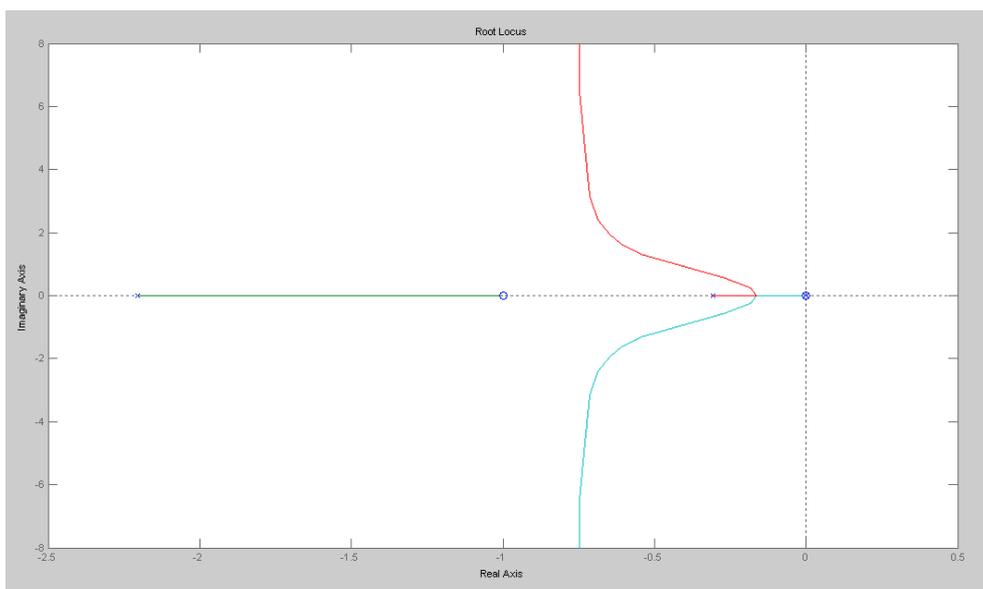


Figura 4.12: Lugar geométrico das raízes para o sistema compensado com PID.

#### 4.4.4 Eletrônica do Controle de temperatura

O circuito da Figura 4.14 implementa através do amplificador de instrumentação INA126 um comparador simples entre a temperatura medida e a temperatura que se deseja através de uma termoresistência do tipo PTC, o sinal dessa comparação é levado para o controlador PID projetado através de amplificadores operacionais e a partir do resultado deste controlador é gerado um sinal PWM para o transistor que está conectado na resistência de aquecimento do líquido. Sabendo que a faixa de temperatura de trabalho do reator varia entre 30 e 100 C° então o PTC pode ser um pt100 cujo gráfico da variação da resistência pela temperatura pode ser encontrada na Figura 4.13. Este gráfico foi retirado do *datasheet* do sensor [4].

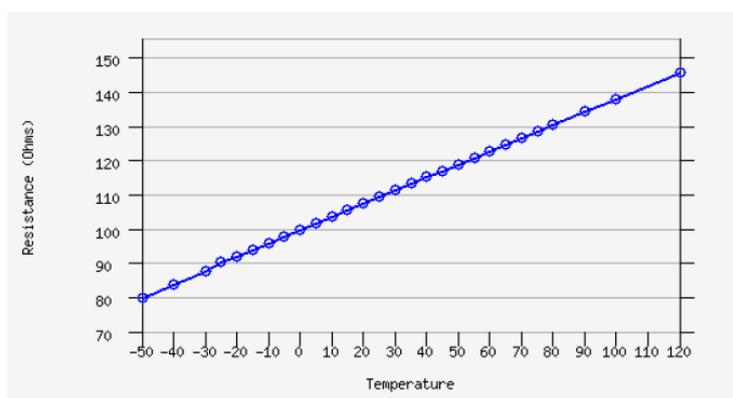


Figura 4.13: Relação entre resistência e temperatura de um sensor pt100.

Para a variação de temperatura entre 30-100 C°, a resistência do pt100 varia entre 110Ω e 140Ω, desta forma o potenciômetro (P) terá que ser 30Ω e  $R_9=110\Omega$  para que o ajuste da zona de trabalho do

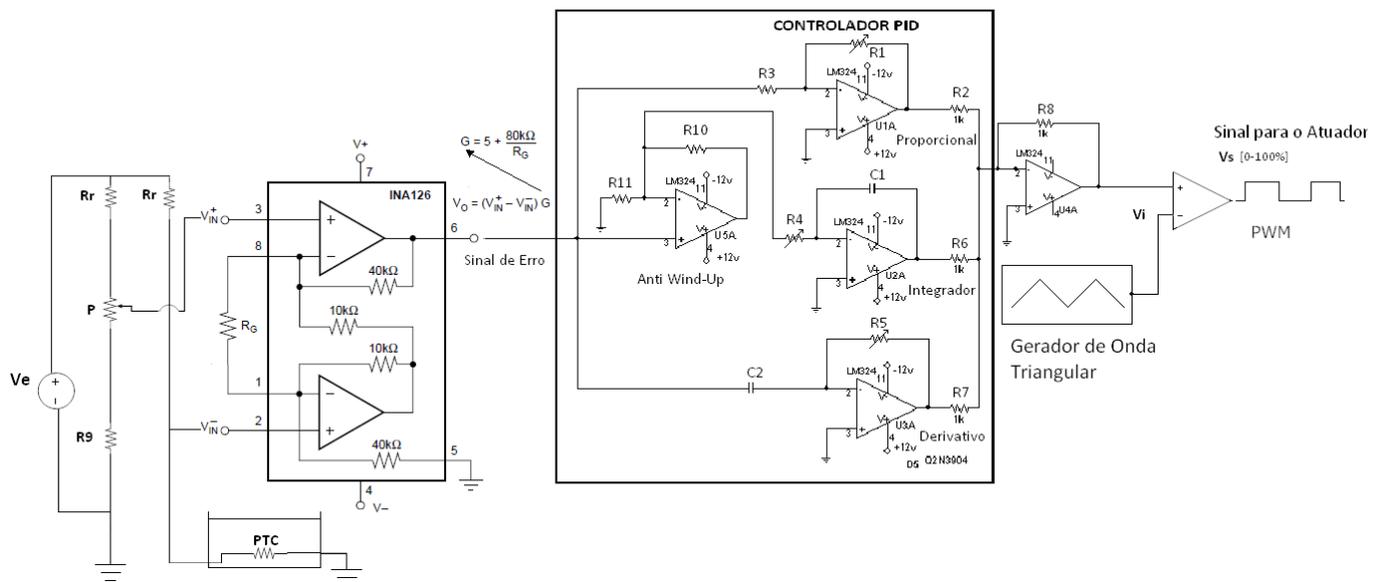


Figura 4.14: Controlador de temperatura.

potenciômetro se encaixe na faixa de temperatura controlada. Escolhendo o valor de  $R_r$  como sendo  $110\Omega$ ,  $V_e = 12V$  e o ganho  $G$  do INA126 igual a 10 através da escolha de  $R_g$ , temos uma escala de aproximadamente  $103\text{ mV}/C^\circ$  na saída  $V_o$  do INA126 que varia entre  $-7.2V$  e  $+7.2V$ . Para uma escala de  $103\text{ mV}/C^\circ$ , escolheu-se uma onda triangular para gerar o PWM que fique na faixa de  $0-250\text{mV}$ .

Os valores dos elementos do controlador PID foram escolhidos de acordo com o projeto definido pelo LGR, sendo que estes valores devem fazer com que a função de transferência deste controlador sejam equivalentes aos valores da equação (4.7), eliminando desta equação o fato de que o INA126 fornece um ganho de 10. O anti *wind-up* colocado antes do integrador é implementado com o intuito de evitar o efeito *wind-up* provocado pela saturação do integrador, este circuito faz com que o integrador atue somente próximo do regime estacionário, quando o erro é normalmente pequeno, o limite projetado para este corte é de 1% do erro, como o erro varia de  $\pm 7.2V$  e a alimentação é de  $\pm 12V$ , então chegamos ao valor de  $R_{10}=150k\Omega$  e  $R_{11}=1k\Omega$ . A tabela 4.1 mostra os valores dos elementos do controlador PID.

Tabela 4.1: Parâmetros da eletrônica do PID.

Elemento	Valor	Unidade
R1	3K	$\Omega$
R2	1K	$\Omega$
R3	1K	$\Omega$
R4	5M	$\Omega$
R5	44.2K	$\Omega$
R6	1K	$\Omega$
R7	1K	$\Omega$
R10	150K	$\Omega$
R11	1K	$\Omega$
C1	$68\mu$	F
C2	$68\mu$	F

#### 4.4.5 Gerador de onda triangular

A faixa da onda triangular deve estar entre 0-250mV, desta forma precisamos gerar uma onda triangular primeiramente, depois de gerar a onda triangular precisamos retificá-la para a variação ocorrer sempre em valor maior que zero, e depois limitá-la para o máximo de 250mV.

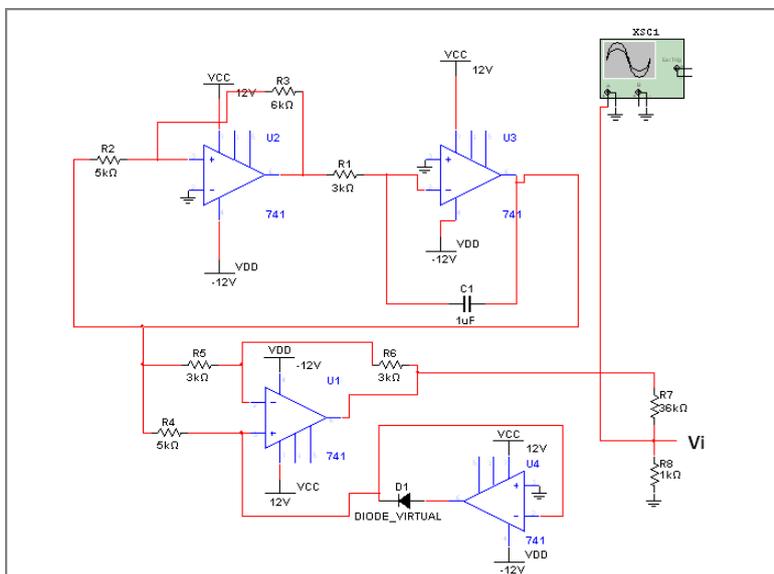


Figura 4.15: Circuito gerador de onda triangular.

A Figura 4.15 é mostra o circuito gerador de onda triangular realizado pelos amplificadores U2 e U3, além de um circuito retificador composto pela configuração dos amplificadores U1 e U4 e também uma limitação de tensão realizada pelo divisor de tensão dos resistores R7 e R8.

O gráfico da Figura 4.16 mostra o gráfico resultante da simulação, este circuito foi projetado e simulado no software Multisim da National Instruments. A escala da onda triangular na simulação está configurada para 100mV/Div, nesta figura dá pra ver também a variação máxima da onda chegar a 251mV, um valor aceitável para nossa especificação de 250mV.

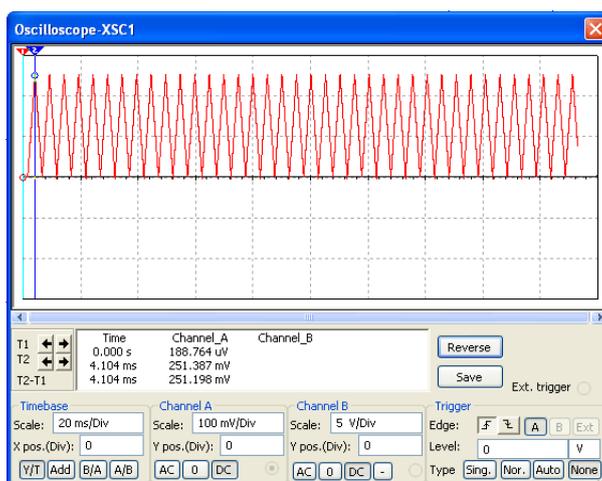


Figura 4.16: Gráfico de onda triangular.

#### 4.4.6 Circuito para aquecimento da resistência

Através das simulações do modelo matemático percebeu-se que a potência entregue a resistência para o aquecimento do reator em um tempo viável era em torno dos 500W, uma resistência que entrega esta potência precisa ser alimentada por 110V ou mais para poder ter o aquecimento esperado. A Figura 4.17 mostra o circuito de alimentação da resistência sendo controlada por um PWM. O bloco denominado AC to DC é um retificador de onda completa com filtro capacitivo que transforma a entrada AC de 115V em uma tensão DC de 163V ( $115\sqrt{2}$ ).

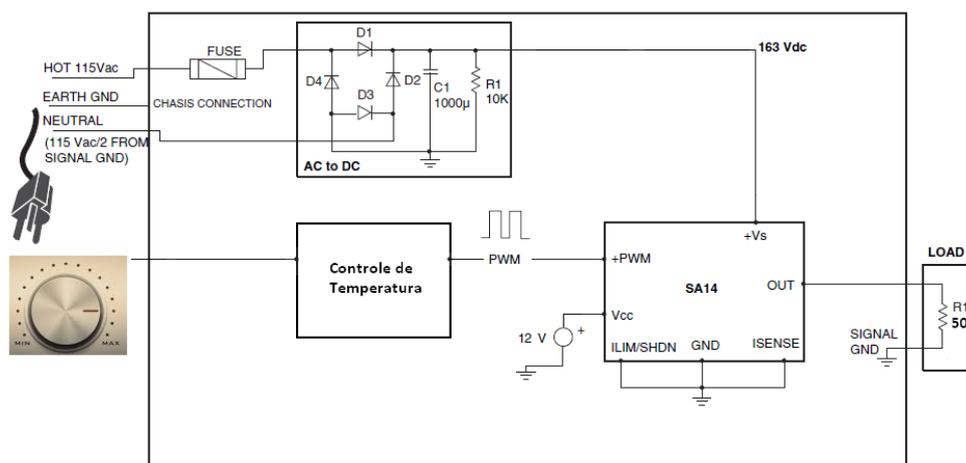


Figura 4.17: Esquemático do circuito de potência da resistência de aquecimento.

O Circuito Integrado mostrado na figura nomeado de SA14 é um circuito amplificador de PWM, ele pode suportar 4000W na carga, tem capacidade de até 200V de fornecimento de tensão e 20A de corrente, além de possuir um circuito de proteção. A Figura 4.18 mostra uma parte do *datasheet* e as dimensões do SA14.

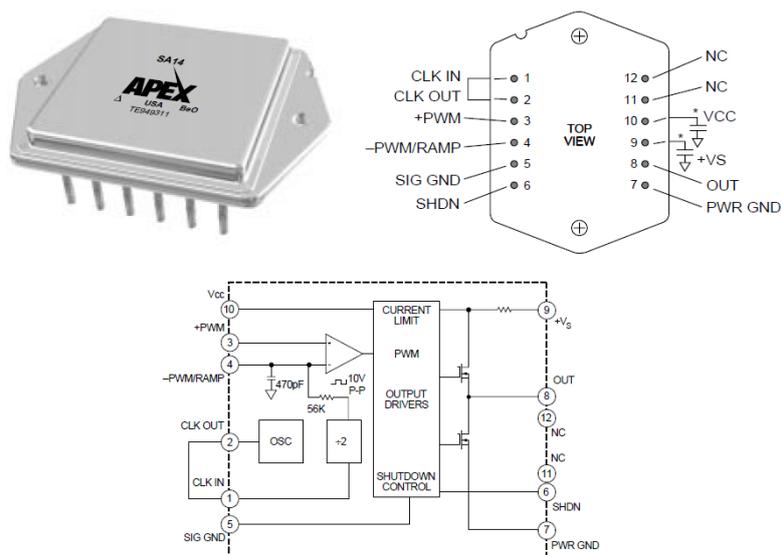


Figura 4.18: Datasheet do SA14.

#### 4.4.7 Controle de RPM do agitador

O controle do motor como é uma malha aberta temos apenas que entregar uma referência e o motor deve atingir a rotação equivalente à esta referência. Para isto o circuito da Figura 4.19 foi modelado e simulado.

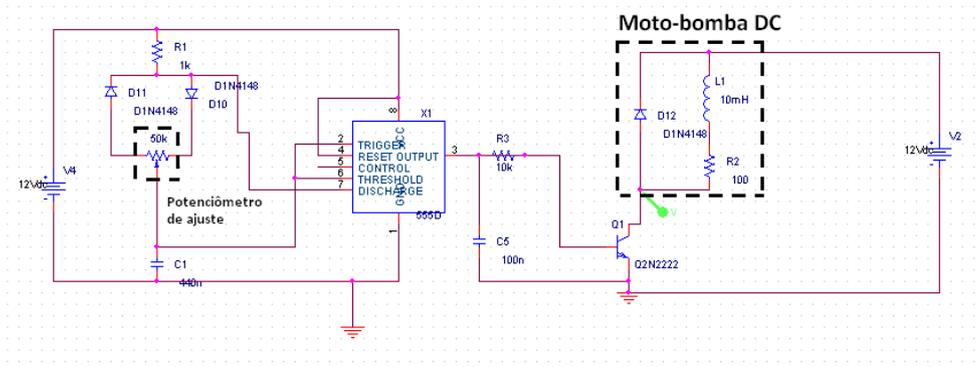


Figura 4.19: Circuito de controle da velocidade do motor.

O potenciômetro do lado esquerdo é a referência ajustável pelo manipulador, o CI (Circuito Integrado) 555 é um circuito temporizador capaz de produzir atrasos de tempos e oscilações com bastante acurácia, o datasheet do circuito é mostrado na Figura 4.20, a frequência de chaveamento é ajustável pela constante de tempo que é influenciada por C1 e pelo valor do potenciômetro, a saída PWM do 555 controla um transistor que enfim controla a velocidade do motor, de 0 a 100% da rotação do mesmo. Para simular o motor colocou-se um indutor e uma resistência em série, um diodo em paralelo ao motor é colocado para proteger o circuito durante o chaveamento.

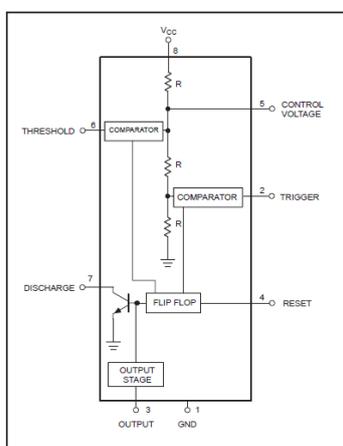


Figura 4.20: Datasheet do CI 555.

#### 4.4.8 Controle da bomba

O controle para ligar e desligar a bomba que circula o líquido através da jaqueta é simplesmente uma chave liga-desliga conforme pode ser visualizado na Figura 4.21. O diodo colocado em paralelo á bomba é para proteger o circuito de correntes elevadas durante o desligamento da mesma.

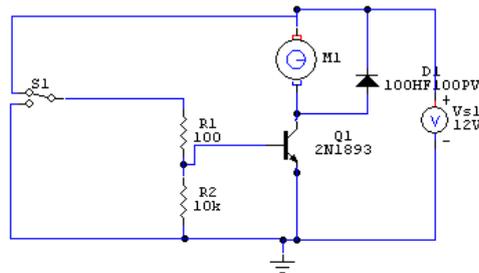


Figura 4.21: Circuito elétrico da bomba que circula o líquido aquecido.

#### 4.4.9 Controle da abertura e fechamento da tampa

O controle da abertura e fechamento da tampa do reator leva em conta o sinal lido por um sensor de proximidade indutivo S1, além de utilização de um relé temporizador do tipo on-delay, que quando está ativo por um tempo maior que o mínimo selecionado a tampa deve abrir, e quando estiver desativado a tampa deverá fechar. Para isto é necessário projetar uma ponte H para controlar o motor que abre e fecha a tampa com sensores de curso S2 e S3 para controlar o posicionamento.

A Figura 4.22 mostra uma visão superior do mecanismo de abertura da tampa, a parte rachurada é a tampa propriamente dita, a tabela 4.2 mostra as ações que são tomadas quando cada sensor é acionado e a Figura 4.23 mostra a ponte H que controla o motor.

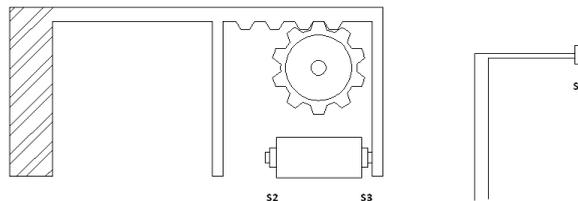


Figura 4.22: Vista superior do posicionamento dos sensores para abertura da tampa.

Tabela 4.2: Tabela das ações.

S1	S2	S3	Movimento	Estado
1	1	0	liga motor sentido 1	abertura da tampa
1	0	0	liga motor sentido 1	abertura da tampa
1	0	1	desliga motor	tampa aberta
0	0	1	liga motor sentido 2	fechamento da tampa
0	0	0	liga motor sentido 2	fechamento da tampa
0	1	0	desliga motor	tampa fechada

A Figura 4.24 mostra a localização onde o sensor indutivo S1 será fixado na bancada. Este sensor detectará a passagem do braço robótico de pipetagem, como o relé é do tipo on-delay, ele terá um atraso de tempo para ficar ativo, somente quando o sensor ficar ativo por mais que um tempo pré-determinado é que a tampa irá abrir, esta estratégia elimina a falha da tampa abrir quando o braço estiver se movimentando ao longo da bancada e conseqüentemente passar pelo sensor.

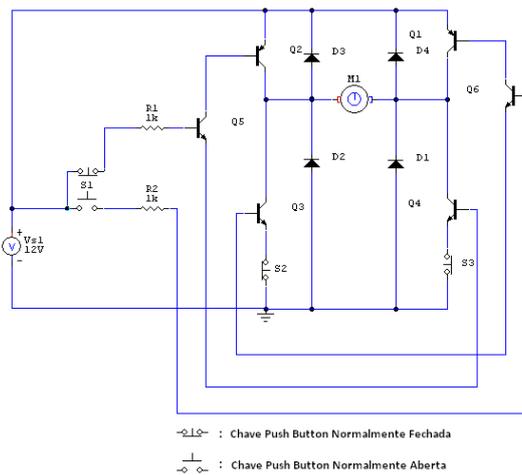


Figura 4.23: Esquemático elétrico do acionamento do motor para abertura da tampa.

O sensor indutivo escolhido foi o da Siemens Bero<sup>®</sup> 3RG4014-0CD00 cuja distância de sensoria-mento é de 0-10mm e tensão de alimentação de 10 a 30 volts, este sensor possui duas saídas PNP no qual uma é normalmente fechada e a outra é normalmente aberta, além de utilização de um relé temporizador do tipo on-delay da Siemens Sirius 3RP1576-2NP30, este relé possui intervalos de temporização de 3 a 60 segundos que é suficientemente necessário para nossa aplicação. Já os sensores S2 e S3, por serem de tamanho reduzido, utiliza-se uma chave *push button* normalmente fechada que é facilmente encontrada no mercado.

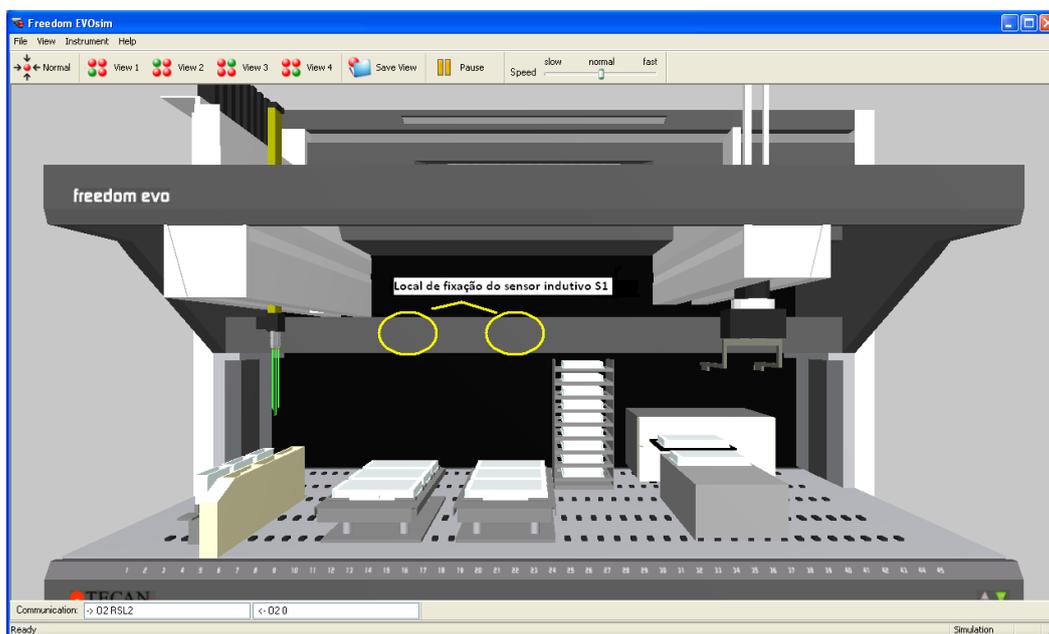


Figura 4.24: Local de fixação do sensor de curso S1.

#### 4.4.10 Dimensionamento do reator

Para projetar as dimensões do reator que estejam corretas para a integração com o módulo Tecan Evoware para a coleta de amostras do reator, precisamos saber as dimensões do equipamento que está colocado no lugar do reator, e somente depois fazer um projeto de um reator que se encaixe nessas dimensões.

No anexo II podem ser visualizados os desenhos do reator, a partir do tamanho da microplaca mostrado na Figura II.1 e com as dimensões dos componentes da Tecan adquiridas através de ferramentas disponíveis no software de simulação, conseguimos obter as dimensões apresentadas na Figura II.2, os lugares marcados em amarelos são os lugares onde na simulação o braço robótico coletou as amostras. Sendo assim, foi feito a Figura II.3(a) onde mostra o espaço disponível para três reatores colocados um ao lado do outro cada um com a configuração da Figura II.3(b). Na Fi.II.4 podemos visualizar o reator com a tampa com a visão superior e na Figura II.5 a vista lateral do reator. Todas as figuras ilustradas com o tamanho de cada parte do reator.

#### 4.5 Especificações técnicas do reator

As principais informações técnicas sobre o reator são descritas aqui, na tabela 4.3 são especificadas alguns valores requisitados pelo reator. Para o valor de RPM do motor foi utilizado como referência trabalhos sobre hidrólise enzimática, e notou-se que valores de RPM muito grandes não seriam utilizados.

Tabela 4.3: Tabela de especificações.

Equipamento	Variável	Especificação de trabalho	Unidade
Motor do agitador	Rotações	0-500	RPM
Motor da tampa	Torque	0-1	Kg.cm
Moto-Bomba DC	Vazão	0-50	$cm^3/s$
Resistor	Potência	0-500	W

Dessa forma, podemos selecionar os componentes mais detalhadamente. O motor DC escolhido para o agitador e para a tampa foi o da fabricante Shenzhen Chang Jin Cheng Electrical Appliances, pois, atende aos requisitos de RPM do agitador e de torque da abertura da tampa, a tabela 4.4 nos mostra algumas especificações técnicas do motor e a Figura 4.25 mostra as dimensões do motor.

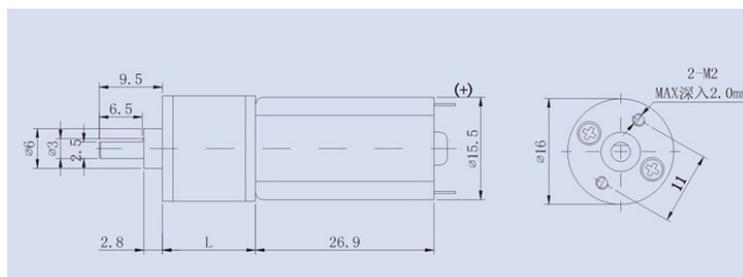


Figura 4.25: Dimensões do motor.

Tabela 4.4: Especificações do motor DC.

Modelo	Tensão	Sem carga		Eficiência máxima		
		Speed	Current	Speed	Current	Torque
CJC-20A130-31	12V	490 RPM	0.04 A	420 RPM	0.12 A	0.22 Kg.cm

A moto-bomba DC da Figura 4.26 que faz o líquido circular entre a jaqueta tem vazão especificada pelo fabricante de 2300ml/min, ou 38ml/s, e tensão de funcionamento de 12V, essa bomba é utilizada para limpar pára-brisas de carros e podem ser encontradas facilmente no mercado.



Figura 4.26: Moto-Bomba DC.

A resistência para fornecer 500W de potência calorífica pode ser uma resistência de um ferro de solda simples, para gerar os 500W ela precisa ser alimentada por 127V, a Figura 4.27 mostra uma resistência de 500W encontrada no mercado.



Figura 4.27: Resistência de 500W.

## 4.6 Esquemático geral da eletrônica do reator

A Figura 4.28 mostra o esquemático geral da eletrônica do reator químico. No anexo III, na Figura III.1, é mostrado o projeto da placa de circuito impresso da eletrônica do reator químico, esta placa foi projetada de acordo com a funcionalidade dos circuitos projetados nas simulações e com as dimensões compatíveis com o espaço físico disponível no reator projetado, as dimensões foram 100mmx140mm.

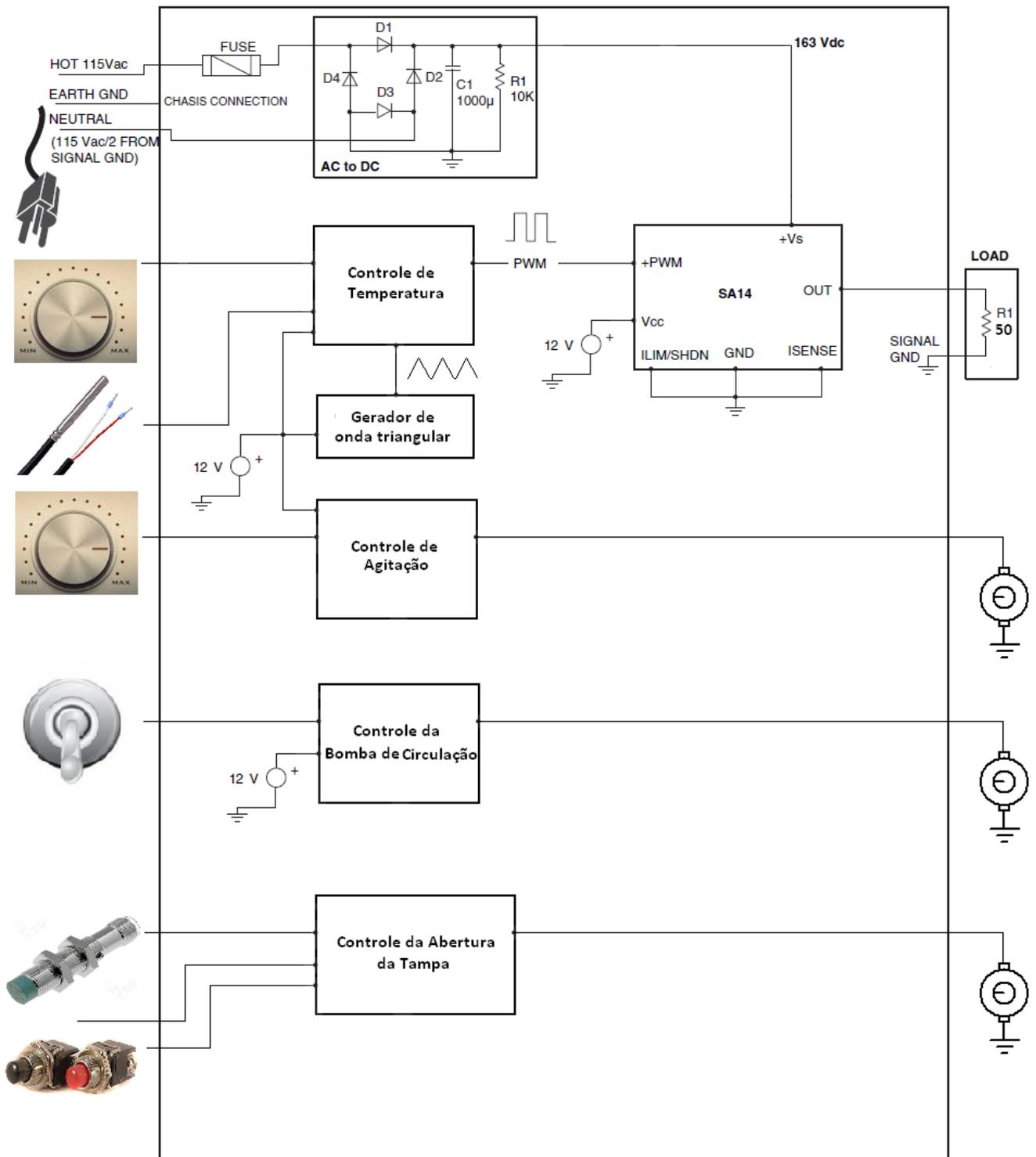


Figura 4.28: Esquemático geral da eletrônica do reator.

## Capítulo 5

# Simulação Computacional

*Neste capítulo, é apresentado alguns resultados de simulações computacionais dos movimentos robóticos e dos circuitos eletrônicos que controlam as variáveis do reator químico.*

### 5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o resultado de algumas simulações computacionais dos circuitos eletrônicos que controlam o reator químico e também o resultado com algumas imagens da simulação dos movimentos dos braços robóticos. Os módulos eletrônicos, apesar de não terem sido implementados, foram todos projetados para um funcionamento real, e suas simulações mostram o resultado dos projetos. Os movimentos dos manipuladores robóticos foram simulados com o software Tecan EVOware, e a visualização em 3D dos movimentos foram obtidas pelo software Tecan EVOSim.

O único módulo que não foi possível obter uma simulação foi os comandos do espectrofotômetro, pois, o software Tecan EVOware não possui opção de emular os movimentos de leitura do espectrofotômetro em ambiente virtual. O único método para programar o espectrofotômetro é adquirindo o equipamento, ligando ele ao computador com o software imbutido, e rodando o programa. Apesar disto, durante a simulação foi programada um delay de tempo simulando a execução da análise das amostras.

### 5.2 Simulação do PWM para controle de RPM do agitador

A simulação do circuito da Figura 4.19 nos fornece os gráficos da Figura 5.1 para ilustrar o funcionamento da saída PWM em função do ajuste do potenciômetro. Os gráficos mostram a relação entre o ajuste do potenciômetro de controle e a saída correspondente do duty cycle do sinal PWM.

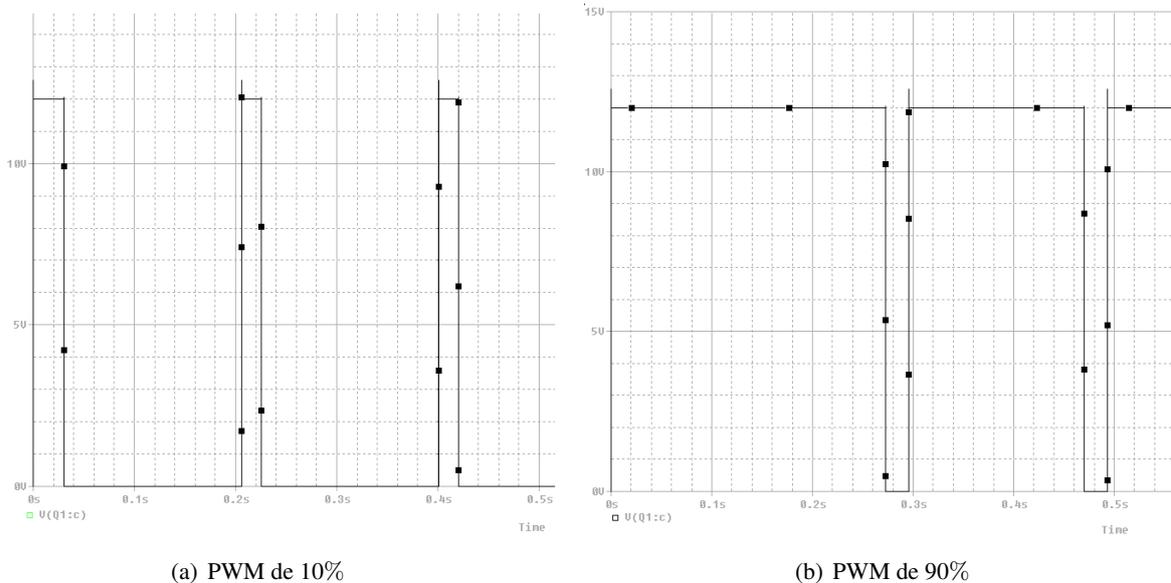


Figura 5.1: Gráficos da saída PWM do circuito de controle de velocidade do agitador.

### 5.3 Simulação da temperatura do reator

A simulação da temperatura em malha fechada do sistema com o controlador PID foi realizada utilizando os mesmo valores apresentados na Figura 4.5 enquanto o código do Simulink pode ser visualizado no anexo III na Figura III.3, o bloco Celsius-to-Volts é colocado para transformar a diferença entre a temperatura medida e a temperatura de referência para tensão, que neste caso é  $103 \text{ mV}/\text{C}^\circ$ . O bloco onda-triangular faz a simulação da saída do PID ser limitada pela onda triangular de 250mV. O resultado da simulação é mostrado na Figura 5.2. A temperatura de referência utilizada na simulação foi de  $60\text{C}^\circ$ .

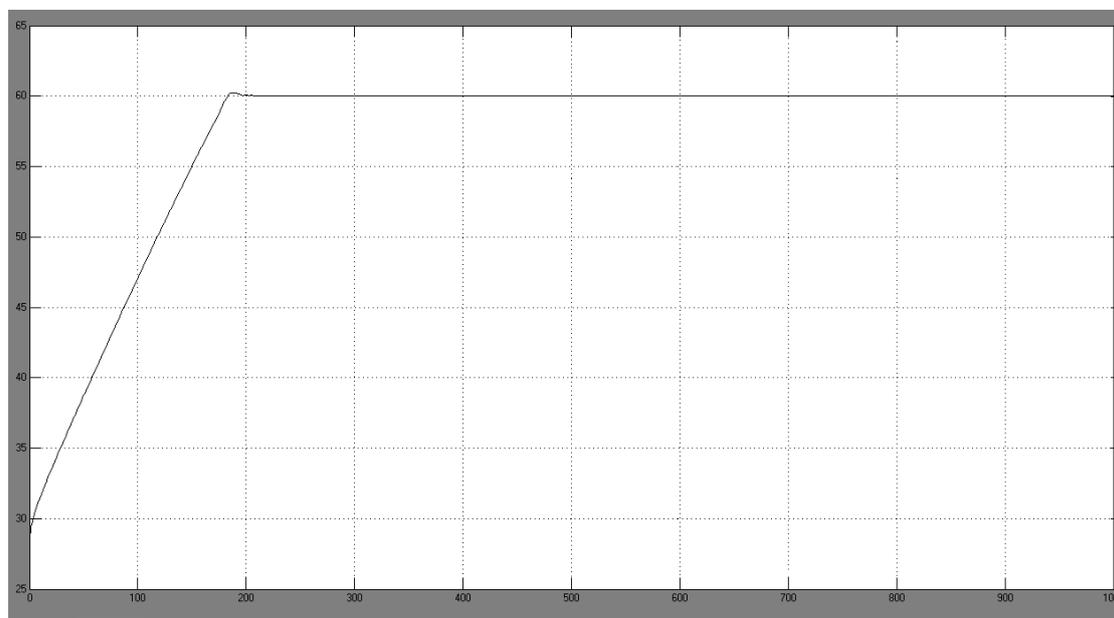


Figura 5.2: Gráfico da resposta da temperatura do reator em malha fechada.

A Figura 5.2 mostra o erro em regime estacionário do sistema compensado tendendo a zero ao longo do tempo, isso deve-se ao fator integrador do PID, o integrador soma o erro ao longo do tempo e a sua saída vai aumentando até que tenha efeito significativo no atuador. Dessa maneira elimina-se o erro de 0.2 C°. Foi utilizado um ganho proporcional  $G=30$  no controlador PID, este ganho na realidade é fornecido em parte pelo INA126 e outra parte pela ação proporcional do PID.

Para simular a influência do sinal modulado PWM na potência entregue ao sistema através do resistor foi utilizada como base o resultado da equação (2.16), ou seja, apenas foi multiplicado o *duty cycle* do PWM pela quantidade de calor injetada pela resistência  $\dot{Q}$ .

A Figura 5.3 mostra a resposta do sistema para um distúrbio do tipo degrau em  $t=500s$  com amplitude de 3 C°, este distúrbio simula uma mudança na temperatura ambiente  $T_a$ . Percebe-se que o sistema sofre poucas alterações quando submetido a um distúrbio na temperatura ambiente além da resposta ter ocorrido de forma bastante rápida.

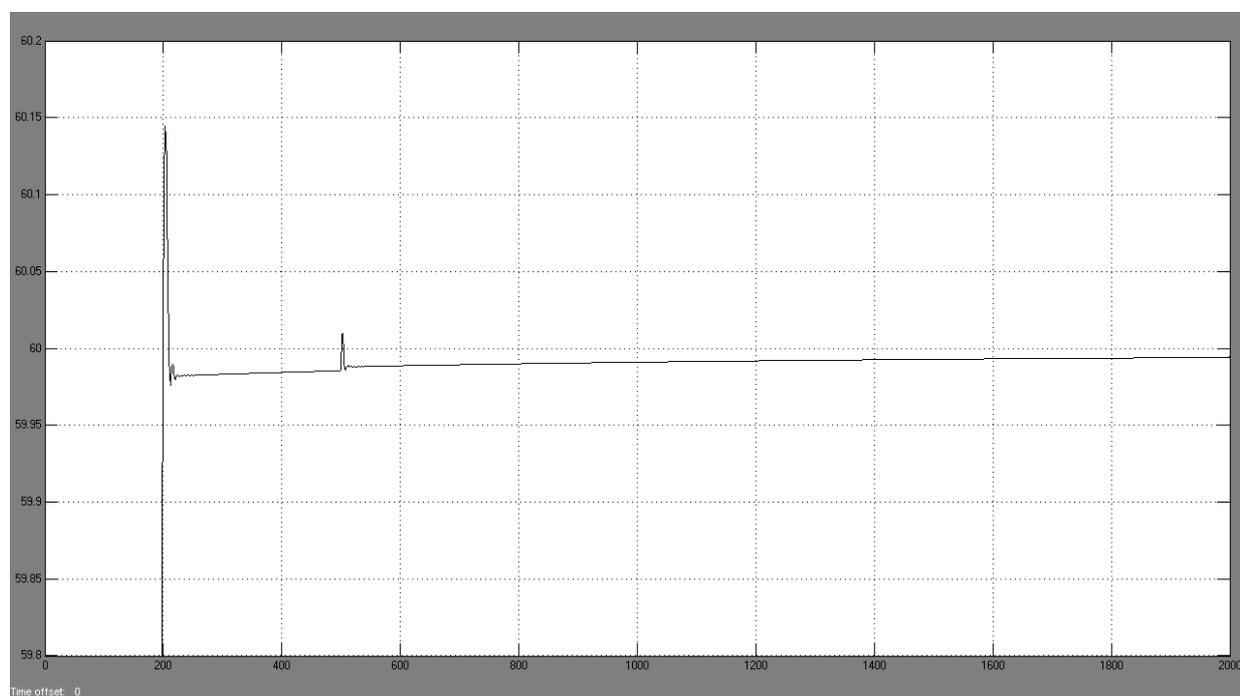


Figura 5.3: Resposta da temperatura do reator quando submetido a um distúrbio do tipo degrau em  $T_a$ .

Para simular o comportamento real do controle de temperatura precisamos colocar uma saturação na saída do controlador PID, isso deve ser feito, pois, na prática o controlador tem uma saída PWM na faixa de 0-100%, ou seja de 0 a 1. A colocação do bloco de saturação após o PID ocasiona o efeito *wind-up* do integrador, na Figura 5.4 podemos ver a diferença entre o sistema com anti *wind-up* e sem o anti *wind-up*.

A Figura III.4 do anexo III mostra o bloco do PID com o anti *wind-up* utilizado na simulação. Neste bloco podemos ver uma saturação implementada na saída de cada parte do PID, uma no integrador, uma no derivativo e outra no proporcional, esta saturação foi colocada em virtude de simular o comportamento real da limitação do fornecimento de tensão do AmpOp, que neste caso é de 90% da alimentação do

amplificador +12V e -12V, ou seja, +10,8 e -10,8.

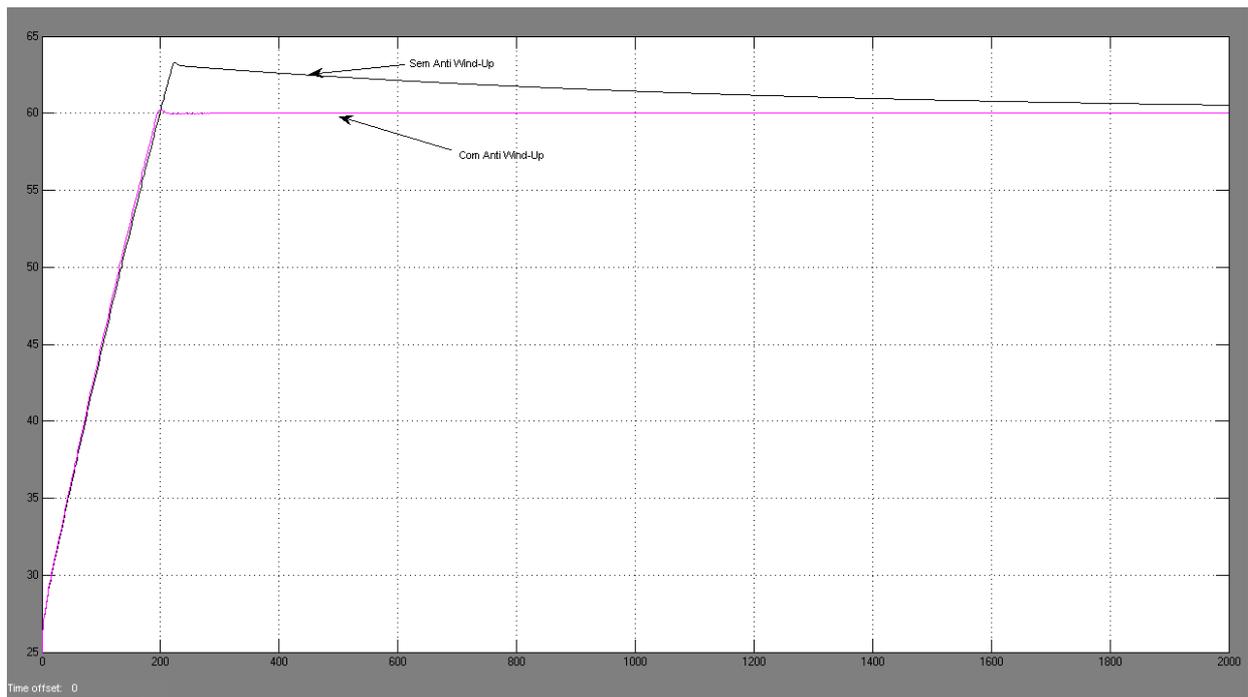


Figura 5.4: Gráfico da diferença entre o sistema com anti wind-up e sem anti wind-up.

A Figura 5.5 mostra a diferença entre o sistema compensado com o controlador PID e o sistema compensado com ganho unitário. Pelo fato de termos uma saturação no atuador do sistema de 0 a 1, não percebemos uma melhora significativa no tempo de resposta proporcionada pela ação derivativa, o parâmetro que mais se destaca é a melhora do erro em regime estacionário, que com o integrador do PID faz o erro tender a zero.

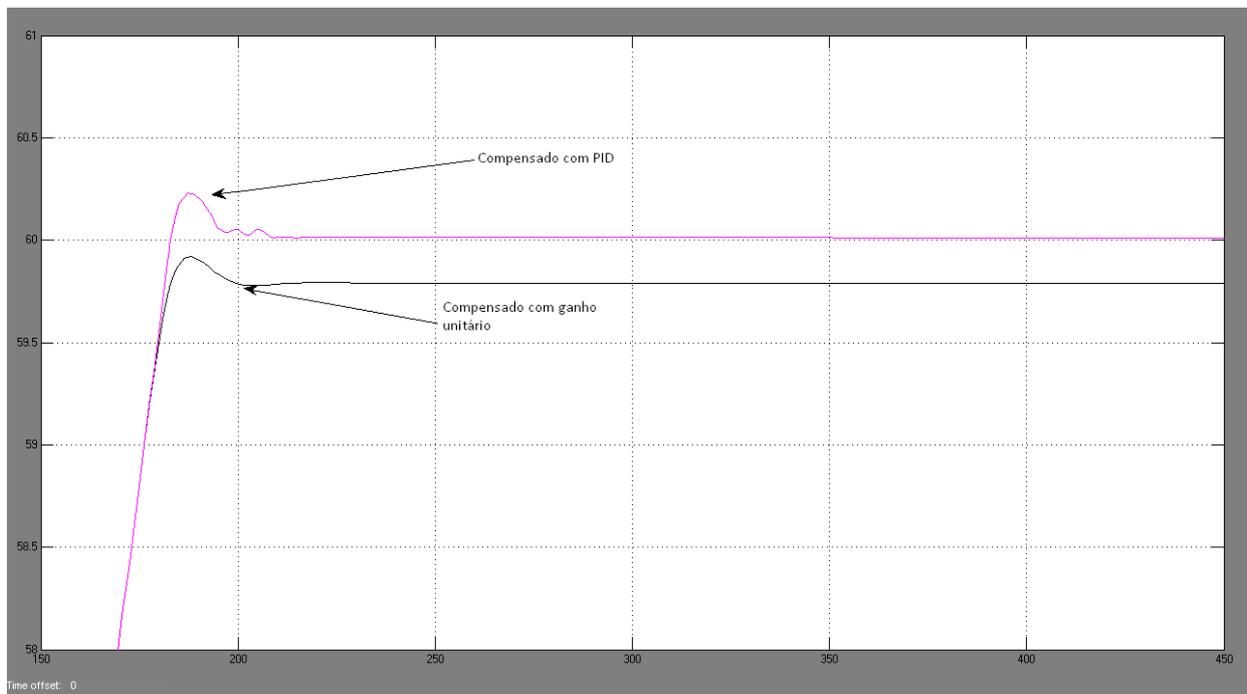


Figura 5.5: Comparação entre o sistema compensado e o sistema não compensado.

## 5.4 Simulação do controle da bomba de circulação do líquido aquecido

O controle para ligar e desligar a bomba que circula o líquido através da jaqueta é simplesmente uma chave liga-desliga, a tensão no transistor de controle pode ser visualizado a seguir:

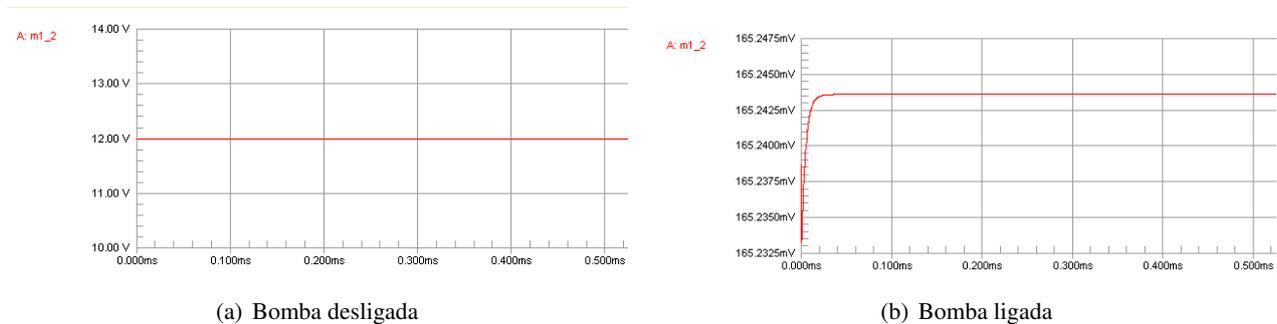


Figura 5.6: Circuito de ligamento e desligamento da bomba que circula o líquido aquecido.

Os gráficos da figura mostram a simulação do funcionamento da chave, na Figura 5.6(a) está a bomba desligada e assim a tensão no transistor equivale a 12 Volts. A Figura 5.6(b) apresenta a bomba ligada e dessa maneira a tensão equivale a aproximadamente 165 mV, que é a queda de tensão do próprio transistor.

## 5.5 Simulação do sequenciamento do manipulador robótico

A implementação e simulação computacional da estratégia de automação foi realizado utilizando o software Tecan Freedom EVOware, a simulação foi baseada com os resultados obtidos pela rede de Petri

mostrada no anexo III na seção III.3 e pelo fluxograma das etapas da automação da Figura 4.1. No anexo I foi colocado o código fonte que comanda os movimentos dos braços robóticos da bancada e a sincronização da abertura e fechamento da porta do espectrofotômetro e sua consequente leitura. O código manda o braço da pipeta parar alguns segundos antes de aspirar uma amostra do reator, para desta forma poder ocorrer a abertura da tampa do reator através de um sensor de curso. A Figura 5.7 mostra alguns passos da simulação realizada.

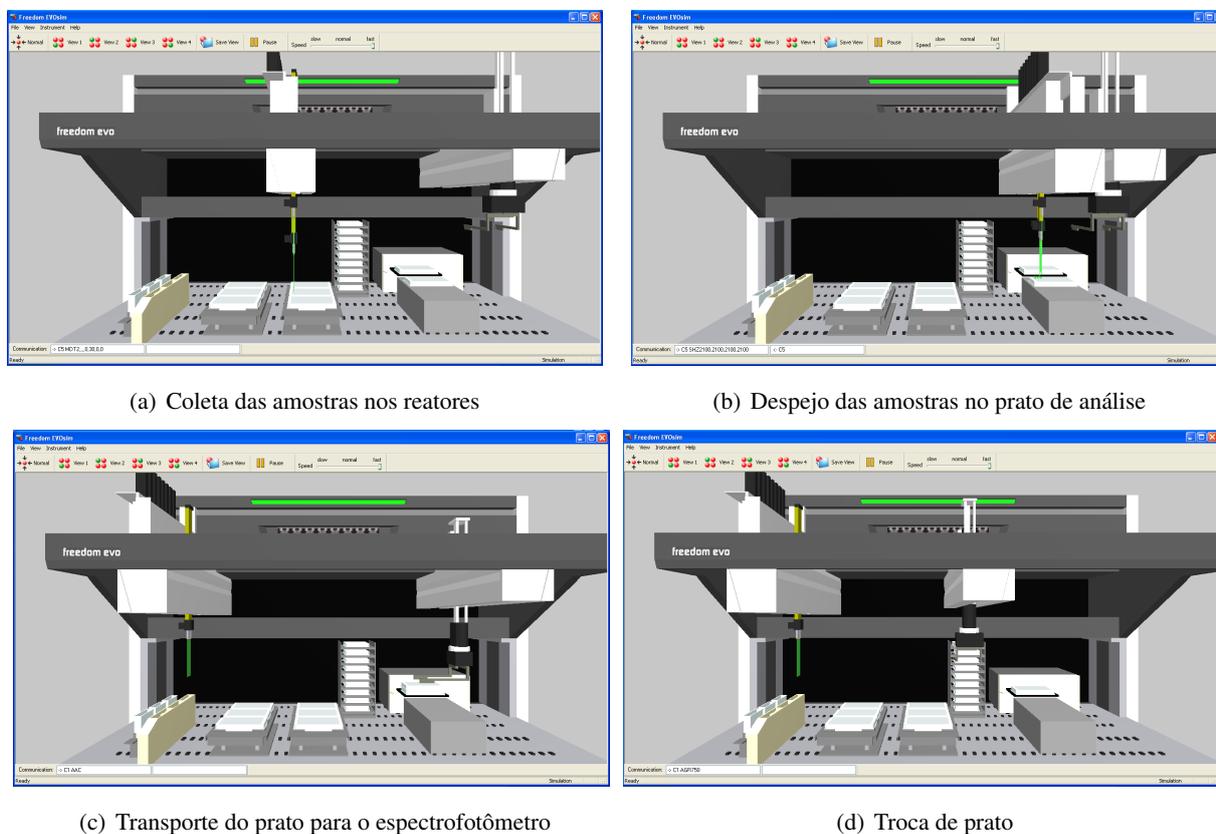


Figura 5.7: Imagens da simulação.

A coleta de amostras é feita a cada 30 minutos, este tempo pode ser aumentado de acordo com a programação realizada, esta opção oferece mais flexibilidade e modularidade para a solução de automação. Com o tempo de coleta de amostras de 30 minutos, um local no qual existem 9 pratos novos para realização de troca e a cada amostra é coletada 10 ul da reação, podemos estimar então que o tempo de autonomia do sistema é de cerca de 18 horas, visto que cada prato pode ser utilizado 4 vezes antes de ser realizada a troca. Novamente este tempo pode ser aumentado apenas aumentando o intervalo de análise ou colocando outro hotel com 9 pratos limpos.

Algumas etapas de manutenção precisam de interferência humana entre elas:

1. Preparação da solução tampão da reação;
2. Lavagem dos pratos já utilizados;
3. Troca das pipetas em intervalo de tempo regular;

4. Troca da água que é utilizada para limpeza das pipetas;
5. Reposição do líquido reagente;
6. Processo de lavagem da mistura;

Algumas destas etapas podem ser automatizadas como a lavagem dos pratos já utilizados, neste caso um módulo plate washer pode ser implantado ao sistema, este módulo não foi acrescentado primeiramente por ter sido analisado que o processo que ele iria automatizar é um processo não crítico, podendo ser realizado por um ser humano sem perdas na reprodutibilidade do processo nem perdas na robustez do sistema, resumindo teria um alto grau de investimento e esforço para obtenção de um benefício pequeno. Em contrapartida a adição deste módulo aumentaria o tempo de autonomia do sistema visto que não teria um limite de troca de pratos, já que um único prato poderia ser utilizado indefinidamente.

Outra etapa que pode ser automatizada é a troca de pipetas em intervalos de tempos regulares, uma manutenção preventiva do processo, as pipetas naturalmente sofrem desgaste enquanto são utilizadas, esta etapa não foi implementada pela falta de conhecimento sobre o desgaste das pipetas, precisamos saber na prática de quanto em quanto tempo em média é necessária a realização da troca das pipetas para poder programar o computador para a realização da troca.

As outras etapas de manutenção não foram encontradas soluções imediatas para os problemas, estas etapas de manutenção podem ocorrer durante os intervalos de 30 minutos entre as análises das amostras, intervalo de espera do sistema, uma desvantagem disso é a perda em flexibilidade do sistema, visto que se ocorrer alguma mudança na demanda do laboratório esta seria comprometida pois o sistema não se adaptaria tão eficientemente por causa dessas etapas manuais.

## Capítulo 6

# Conclusões

Este trabalho se propôs a elaborar um projeto de um sistema reacional para hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar automatizado em escala de bancada. Todas as funções do sistema e seus circuitos eletrônicos foram projetados e simulados em softwares que possibilitaram a validação da solução de maneira confiável e eficiente.

O sistema compreende na criação de 6 reatores químicos, todos contando com controle de agitação e temperatura, além de mecanismos de retirada de amostras realizada por braços robóticos em intervalos de tempo pré-determinados e as amostras sendo analisadas pelo próprio sistema através de um espectrofotômetro. Os resultados das análises seriam armazenados e visualizados em um computador utilizado como plataforma de monitoramento.

Sabe que para a construção dos reatores existem fatores no mundo real que não foram abordados no texto, como ruídos elétricos e mecânicos, além de que em projetos de engenharia as vezes não são encontrados no mercado os componentes para a construção do equipamento projetado, tendo neste caso que ser substituídos por componentes similares. Neste caso a construção de um reator químico robusto, resistente, confiável e que atenda os requisitos do projeto seria um trabalho a parte visto a complexidade das variáveis envolvidas.

### 6.1 Trabalhos futuros

Este trabalho espera abrir portas para diversos projetos na área de automação de processos de hidrólise enzimática para obtenção de bioetanol, ou até mesmo em projetos de automação laboratoriais menos específicos, visto que esta é uma área que só tende a crescer devido a grande demanda de pesquisadores e laboratórios em busca de sistemas automatizados. Por isso segue algumas alternativas de trabalhos futuros que complementam este.

- Implementação e construção dos reatores projetados, visando melhorias e realizando exaustivos testes para validar a sua atuação, além de focar no projeto de qual seria o melhor formato de pá para agitação da mistura e quais tipos de componentes mais específicos seriam implementados, tais como o volume dos reatores, estudo do melhor material para os reatores, vedação adequada da tampa,

calibração do sensor, etc.

- Implementação da bancada automatizada, com os equipamentos adquiridos a instalação dos mesmos tem que ser acompanhada de um treinamento dos funcionários que utilizarão o equipamento, além de explicações detalhadas sobre processo de manutenção e usabilidade adequados.
- Programação do espectrofotômetro, o espectrofotômetro precisa ser programado para realizar leituras em comprimentos de ondas específicos, além de ser necessário a programação dos locais que ocorreriam as análises dentro da microplaca, esta programação tem que ser acompanhada de pessoas com conhecimentos mais específicos sobre o processo devido ao alto grau de detalhamento das informações.
- Utilizar um controle digital nos *set-points* do reator para **realização dos experimentos com menor** intervenção humana e com faixas de temperatura e agitação controladas automaticamente.

Para finalizar, soluções de automação nunca são únicas, existem vários caminhos diferentes que atendem os mesmos requisitos do projeto, o que leva-se em conta são outros fatores tais como flexibilidade, confiabilidade, custos, manuseabilidade, velocidade e vários outros. Além disso, inovações tecnológicas em produtos estão ocorrendo de forma muito rápida, portanto, novos produtos e empresas de automação estão surgindo em velocidades difíceis de acompanhar. Este trabalho deixa também uma reflexão para setores acadêmicos investirem e se mobilizarem no sentido de encontrar soluções de automação mais eficazes para este mesmo problema.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ODAC. *The Oil Depletion Analysis Centre*. 2007. Disponível em: <<http://www.odac-info.org/>>.
- [2] SILVA, N. L. C. Produção de bioetanol de segunda geração a partir de biomassa residual da indústria de celulose. *Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro*, 2010.
- [3] UGRAD. *Newton's Law of Cooling*. ago. 2013. Disponível em: <<http://www.ugrad.math.ubc.ca/coursedoc/math100/notes/diffeqs/cool.html>>.
- [4] DATASHEET. Pt100 sensor characteristics curves. SythSense.
- [5] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno, 4a ed.* São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- [6] NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle, 4a ed.* Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [7] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica, 5a ed.* São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [8] RASHID, M. H. *Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações, 2a ed.* São Paulo: Makron Books, 1999.
- [9] SEBORG, D. E. *Process Dynamics and Control*. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [10] CORRIPIO, A. B. *Process Dynamics and Control*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [11] LEE, J. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. *Journal of biotechnology*, v. 56, p. 1–24, 1997.
- [12] BARBEDO, J. G. A. Automação laboratorial. *Embrapa informática agropecuária*, Campinas, v. 21, 2012.
- [13] NAVARRO, D. Automated assay for screening the enzymatic release of reducing sugars from micro-nized biomass. *Microbial Cell Factories*.
- [14] TECAN. Software manual tecan freedom evoware 2.3 (research use only). TECAN.
- [15] DATASHEET. Pulse width modulation amplifier sa14. APEX MICROTECHNOLOGY.
- [16] DATASHEET. Pwm ac-dc power supply design. APEX MICROTECHNOLOGY.
- [17] DATASHEET. Semiconductor timer ne/sa/se555. PHILLIPS.
- [18] CRAIG, K. Stirred tank heater case study. Rensselaer Polytechnic Institute.

# **ANEXOS**

# I. CÓDIGOS

Tabela I.1: Tabela de comentários sobre o código utilizado na programação

Função	Especificação
Begin Loop	Inicialização de um loop
End Loop	Término de um loop
Start Timer	Inicialização de um dos 100 timers internos do controlador
Wait for Timer	Espera um timer interno específico alcançar determinado valor
Move LIHA	Movimento X,Y ou Z do braço robótico LIHA(Liquid Handling Arm)
Aspirate	Aspirar determinado volume de líquido de um determinado local
Dispense	Dispensar determinado volume de líquido em um determinado local
Wash Tips	Lavagem das pipetas em local específico
Transfer Labware	Transporte de um dispositivo de um local para outro
Sunrise Reader Close	Fechamento do leitor de microplaca
Sunrise Reade Open	Abertura do leitor de microplaca

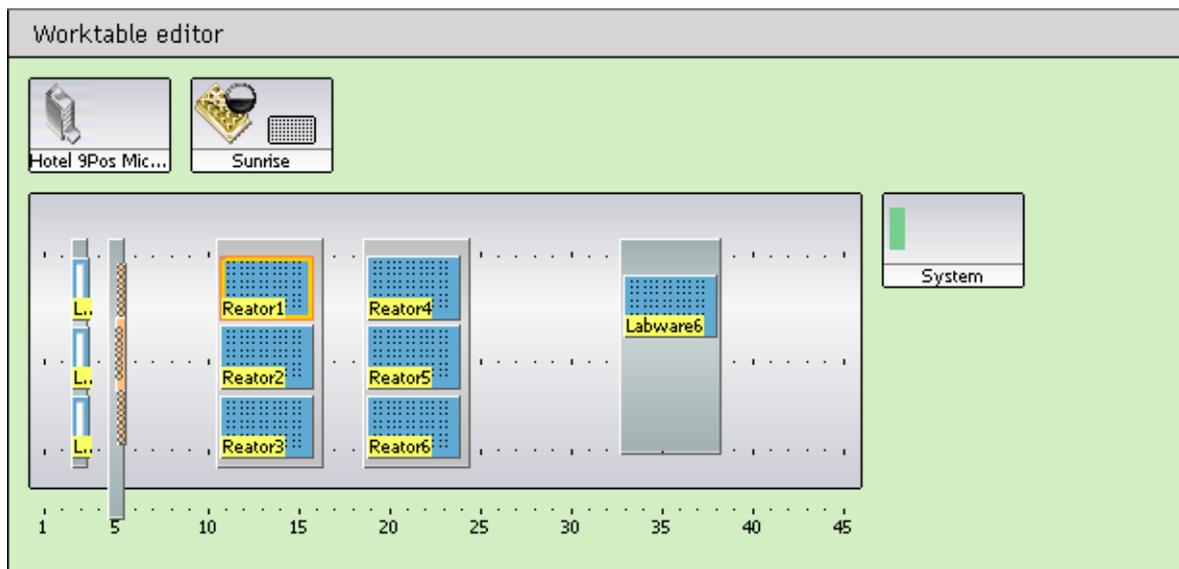


Figura I.1: Bancada vista pela software

Script Editor: NewScript1		
1	Begin Loop	1 times "MAIN"
2	Begin Loop	9 times "TROCA_PRATO"
3	Begin Loop	2 times "SEGUNDO"
4	Begin Loop	2 times "PRIMEIRO"
5	Start Timer	1
6	Wait for Timer	Timer 1 : 2 sec
7	Move LIHA	X-Move "Reator1" (Col. 1, Rows 1-4)
8	Start Timer	1
9	Wait for Timer	Timer 1 : 2 sec
10	Aspirate	40 µl Water free dispense "Reator1" (Col. 1, Row 1)
11	Aspirate	40 µl Water free dispense "Reator2" (Col. 1, Row 5)
12	Aspirate	40 µl Water free dispense "Reator3" (Col. 1, Row 8)
13	Begin Loop	4 times "DISPENSA"
14	Dispense	10 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 1, Row 1) , 3 options
15	Dispense	10 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 2, Row 1) , 3 options
16	Dispense	10 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 3, Row 1) , 3 options
17	End Loop	"DISPENSA"
18	Wash Tips	2.0 + 1.0 ml
19	Start Timer	1
20	Wait for Timer	Timer 1 : 2 sec
21	Aspirate	40 µl Water free dispense "Reator4" (Col. 1, Row 1)
22	Aspirate	40 µl Water free dispense "Reator5" (Col. 1, Row 5)
23	Aspirate	40 µl Water free dispense "Reator6" (Col. 1, Row 8)
24	Begin Loop	4 times "DISPENSA2"
25	Dispense	10 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 4, Row 1) , 3 options
26	Dispense	10 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 5, Row 1) , 3 options
27	Dispense	10 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 6, Row 1) , 3 options
28	End Loop	"DISPENSA2"

Script Editor: NewScript1		
29		Wash Tips 2.0 + 1.0 ml
30		Aspirate 30, 150, 300, 600 µl Water free dispense "Labware8" (Col. 1, Rows 1-4)
31		Begin Loop 3 times "REAGENTE"
32		Dispense 10, 50, 100, 200 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 1, Rows 1-4), 3 options
33		End Loop "REAGENTE"
34		Aspirate 30, 150, 300, 600 µl Water free dispense "Labware8" (Col. 1, Rows 1-4)
35		Begin Loop 3 times "REAGENTE2"
36		Dispense 10, 50, 100, 200 µl Water free dispense "Labware6" (Col. 4, Rows 1-4), 3 options
37		End Loop "REAGENTE2"
38		Wash Tips 2.0 + 1.0 ml
39		Move LIHA Z-Move Wash Station Cleaner shallow (Col. 1, Rows 1-4)
40		Transfer Labware Source: Grid '33,' Site '2'; Destination: Grid '33,' Site '1'; User defined (Narrow) (ROMA 1); Move to home position
41		Sunrise Reader Close()
42		Start Timer 1
43		Wait for Timer Timer 1 : 5 sec
44		Sunrise Reader Open()
45		Transfer Labware Source: Grid '33,' Site '1'; Destination: Grid '33,' Site '2'; User defined (Narrow) (ROMA 1); Move to home position
46		End Loop "PRIMEIRO"
47		End Loop "SEGUNDO"
48		Transfer Labware Source: Grid '33,' Site '2'; Destination: Grid '22,' Site 'LOOP_TROCA_PRATO'; Narrow (ROMA 1)
49		If - Then LOOP_TROCA_PRATO = 9
50		Transfer Labware Source: Grid '22,' Site '1'; Destination: Grid '33,' Site '2'; Narrow (ROMA 1); Move to home position
51		Else
52		Transfer Labware Source: Grid '22,' Site 'LOOP_TROCA_PRATO + 1'; Destination: Grid '33,' Site '2'; Narrow (ROMA 1); Move to home position
53		End If
54		End Loop "TROCA_PRATO"
55		End Loop "MAIN"

Figura I.2: Código da simulação

## II. DESENHOS TÉCNICOS

Todos os desenhos técnicos em unidade de milímetros.

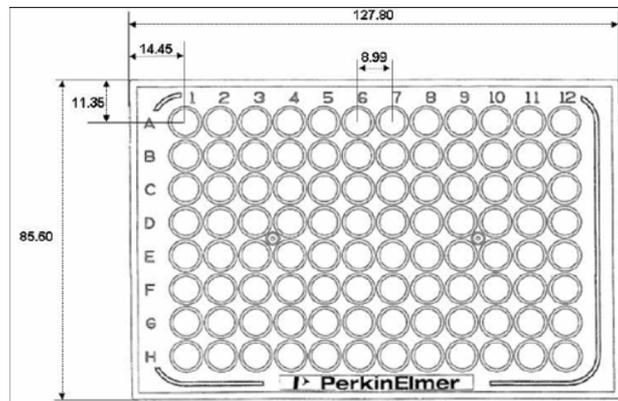


Figura II.1: Dimensões da microplaca

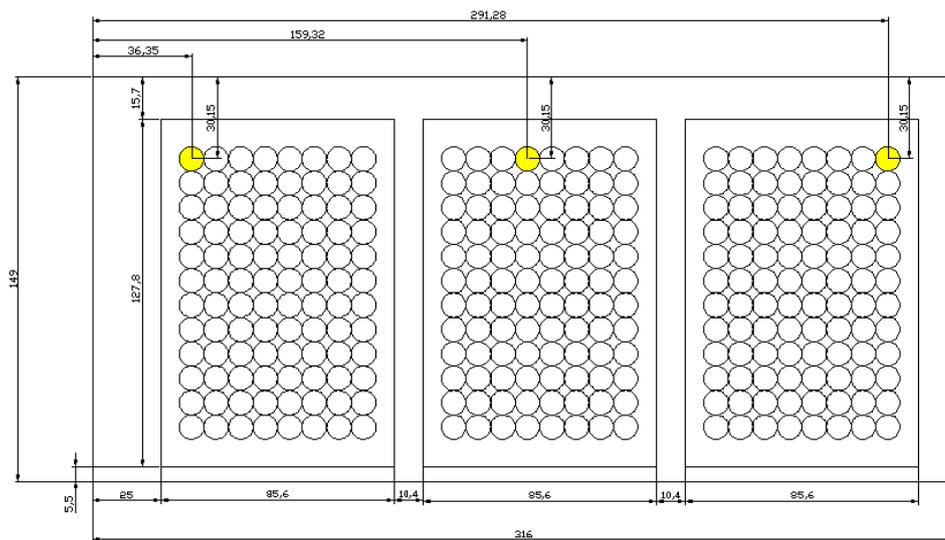
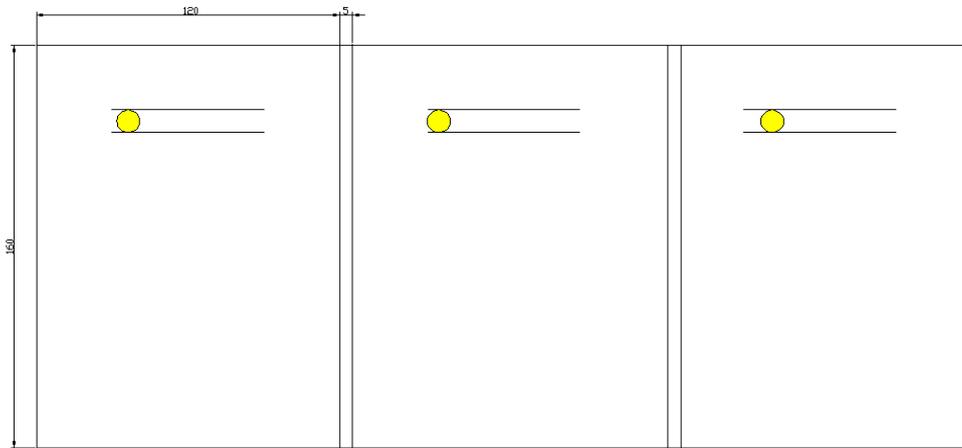
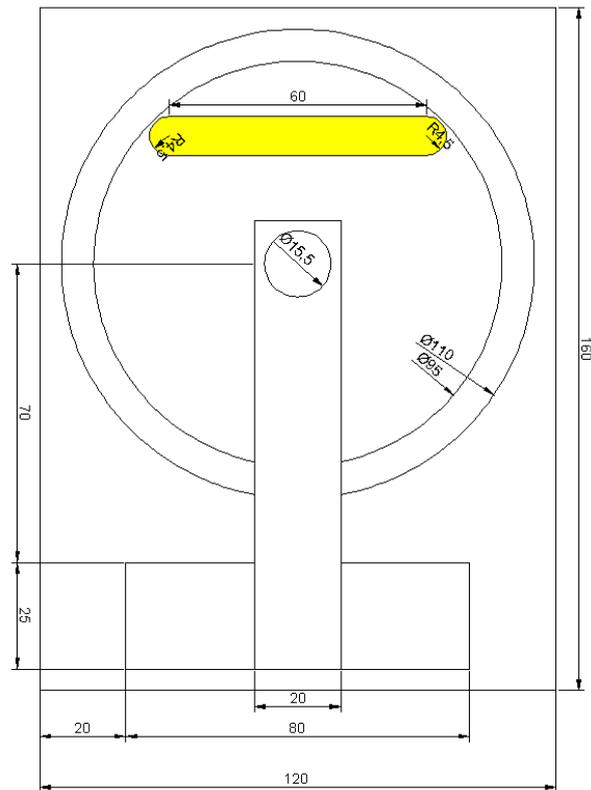


Figura II.2: Dimensões geral do local das microplacas que estão nos lugares dos reatores



(a) Dimensão dos lugares dos reatores (Vista Superior)



(b) Dimensão de cada reator (Vista Superior)

Figura II.3: Dimensões vista de cima

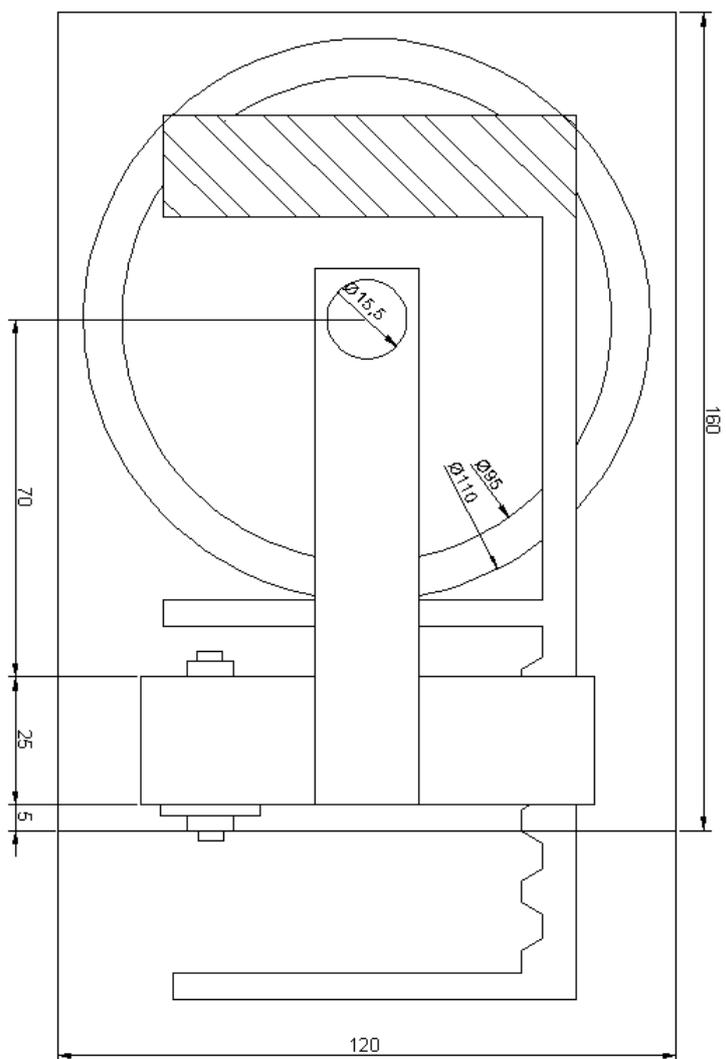


Figura II.4: Vista superior do reator com tampa.

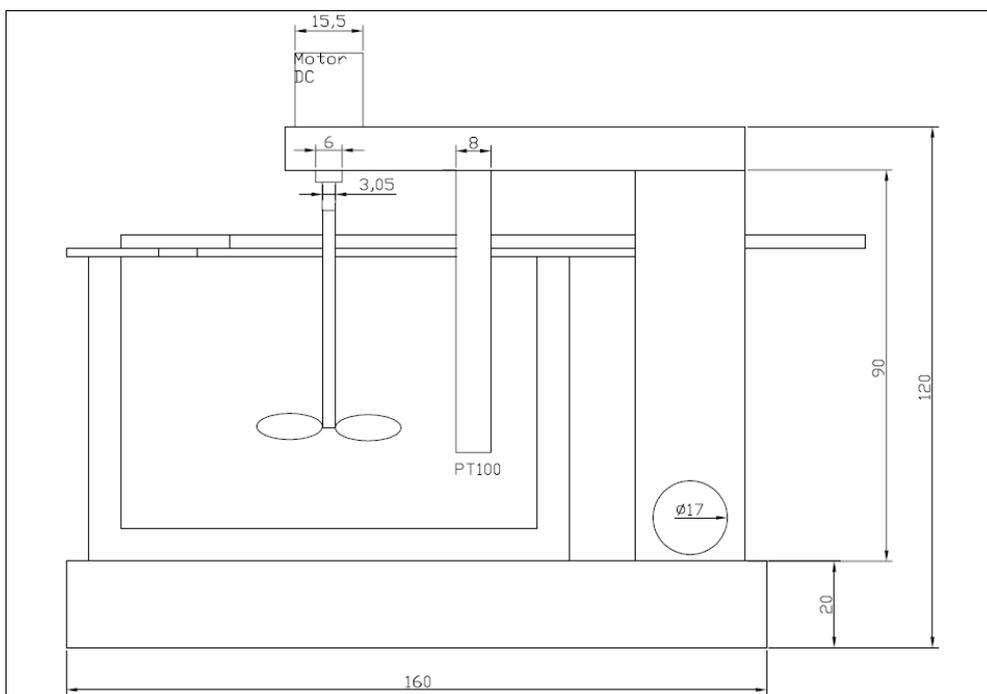


Figura II.5: Vista lateral do reator

### III. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

#### III.1 Placa de Circuito Impresso da Eletrônica do reator

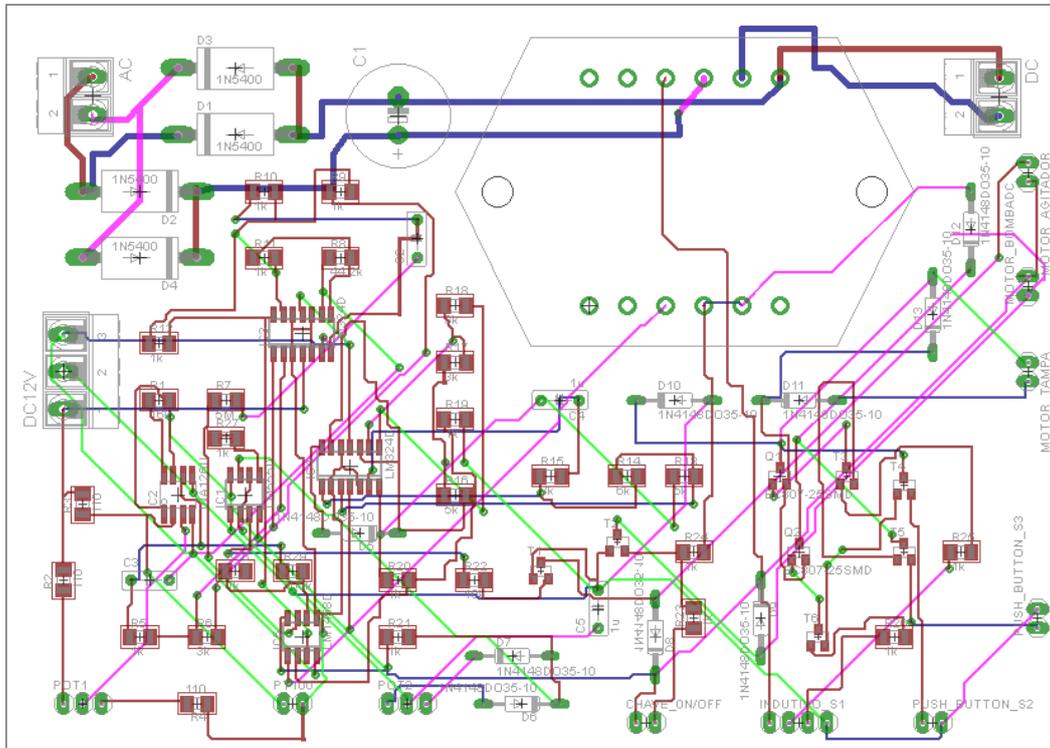


Figura III.1: Projeto da placa de circuito impresso.

#### III.2 Esquemático do Simulink MATLAB

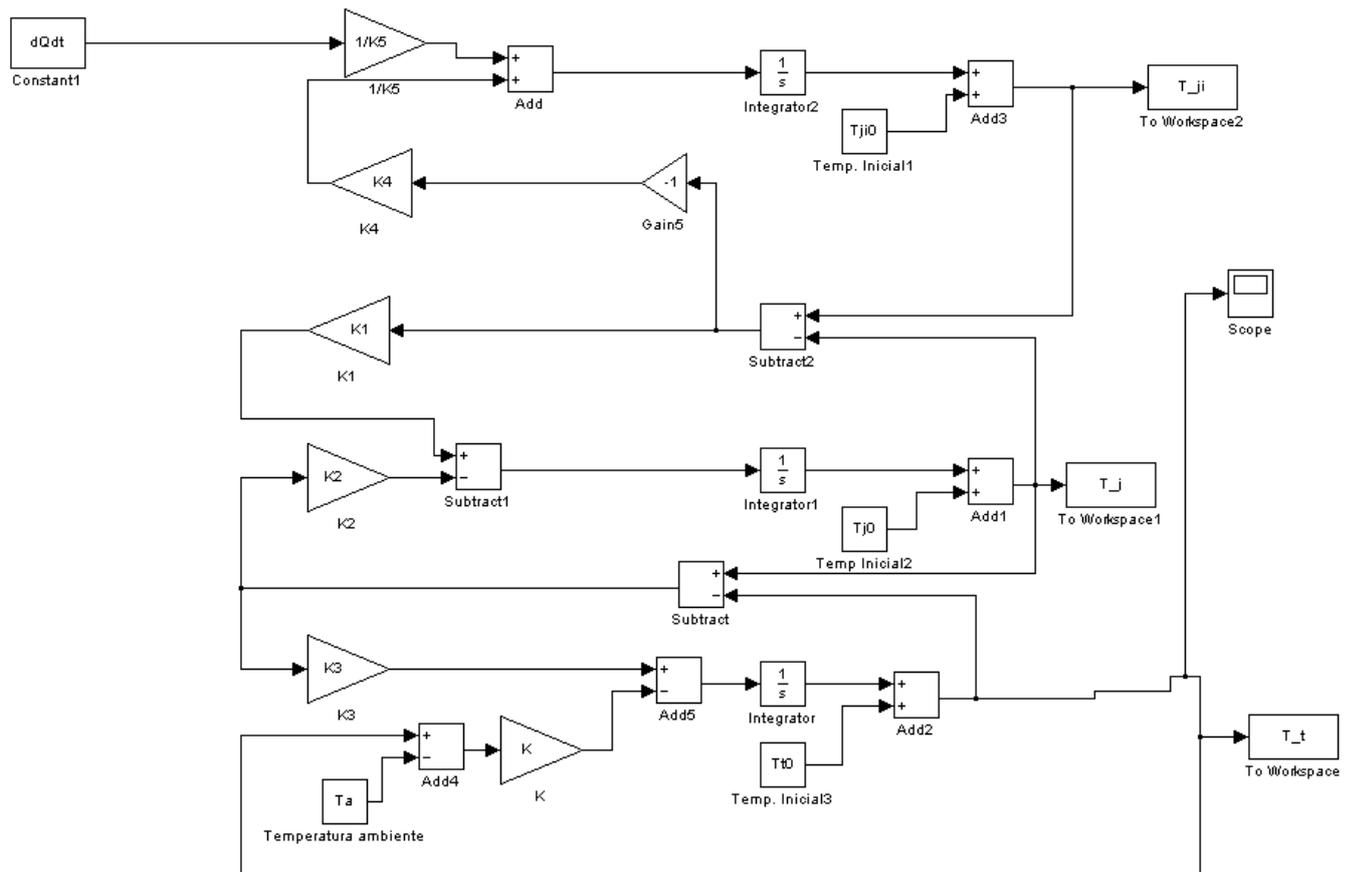


Figura III.2: Código do Simulink para resposta da temperatura em malha aberta.

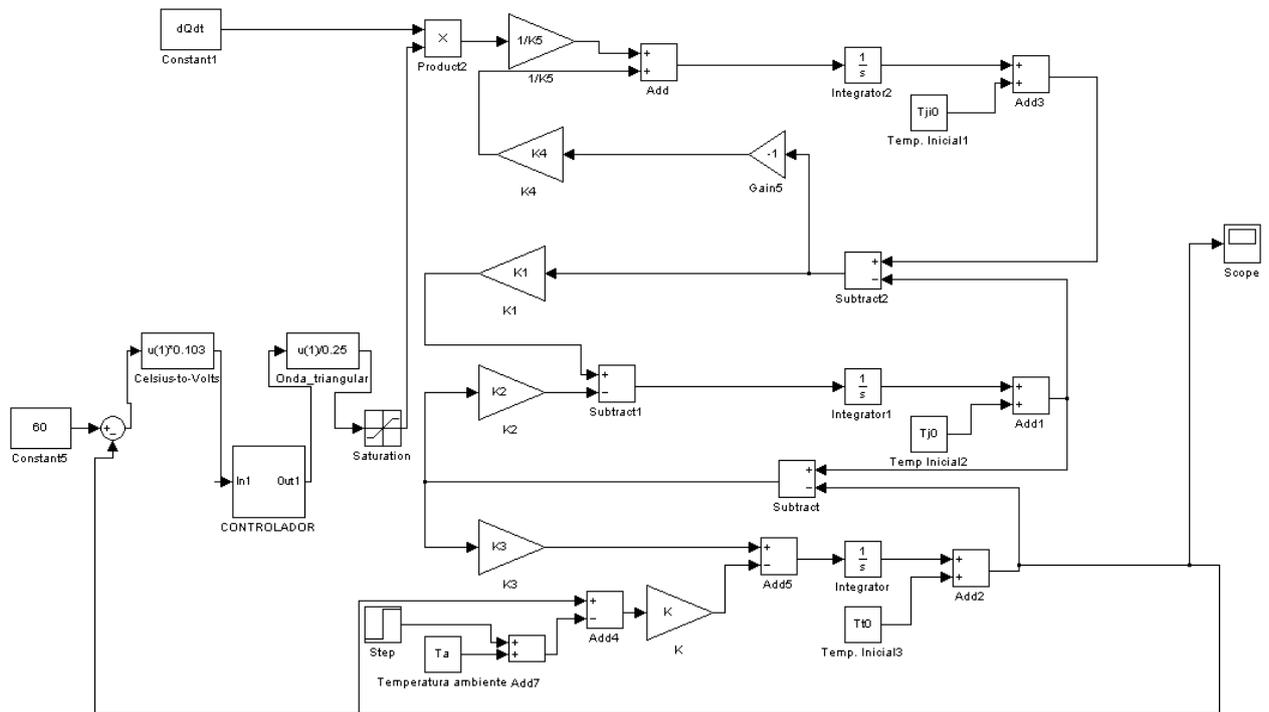


Figura III.3: Código do Simulink para resposta da temperatura em malha fechada.

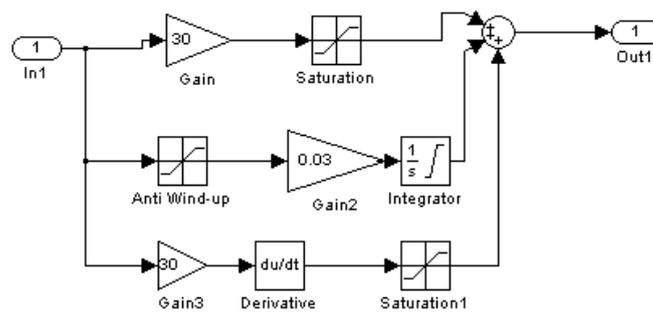


Figura III.4: Bloco do controlador PID no MATLAB.

### III.3 Esquemático da Rede de Petri

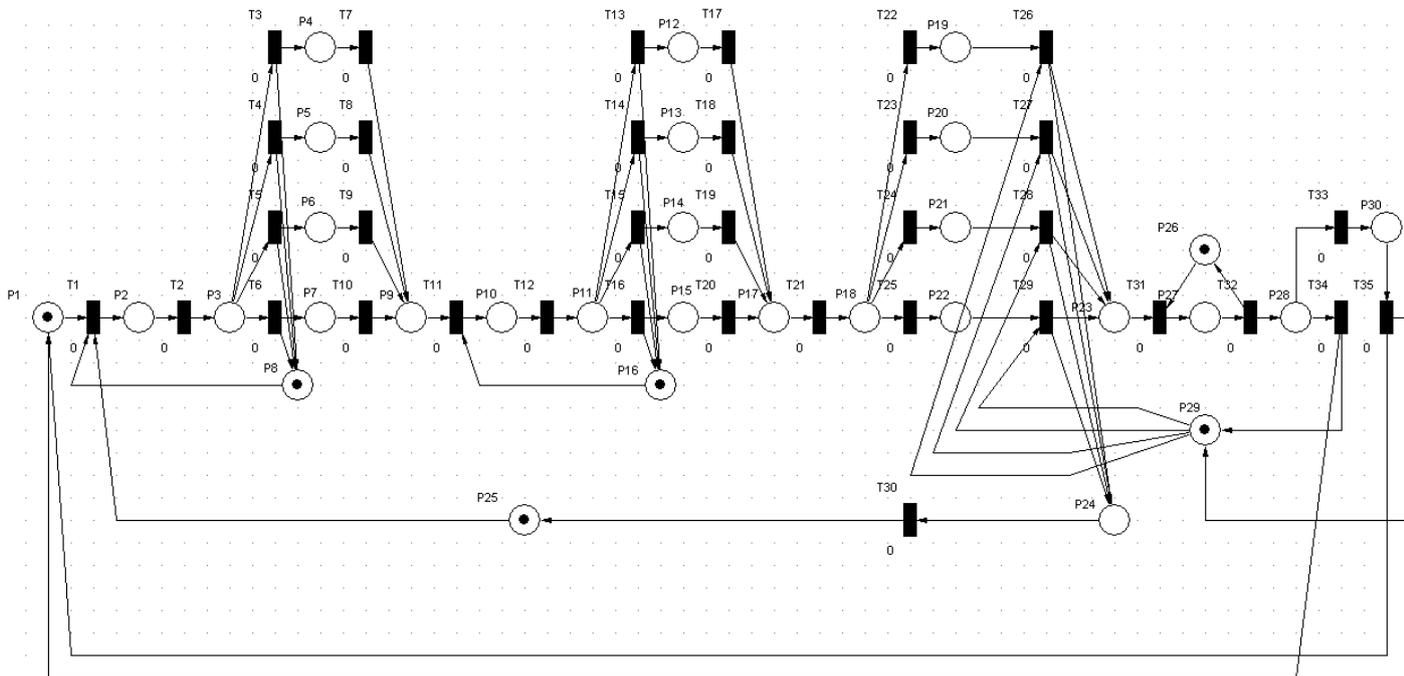


Figura III.5: Rede de Petri.

Obs: Os 0's que aparecem na Figura III.5 ocorrem devido á simulação, são indicadores de que as transições não são temporizadas, ocorrem imediatamente uma após a outra sem espera de tempo. Existem sim transições temporizadas (T1 que ocorre depois de 30 minutos), elas foram colocadas como 0 apenas para facilitar a simulação.

Tabela III.1: Atividades da Rede de Petri.

<b>P</b>	<b>Atividades</b>
<b>P1</b>	<b>Esperando 30min.</b>
<b>P2</b>	<b>Abrindo a tampa</b>
<b>P3</b>	<b>Sucção das amostras</b>
<b>P4,P5,P6 e P7</b>	<b>Despejo das amostras no prato de análise</b>
<b>P8</b>	<b>Fechamento da tampa</b>
<b>P9</b>	<b>Lavagem das pipetas</b>
<b>P10</b>	<b>Abrindo a tampa</b>
<b>P11</b>	<b>Sucção das amostras</b>
<b>P12,P13,P14 e P15</b>	<b>Despejo das amostras no prato de análise</b>
<b>P16</b>	<b>Fechamento da tampa</b>
<b>P17</b>	<b>Lavagem das pipetas</b>
<b>P18</b>	<b>Sucção do reagente</b>
<b>P19,P20,P21 e P22</b>	<b>Despejo do reagente nas amostras do prato de análise</b>
<b>P23</b>	<b>Transporte do prato até o espectrofotômetro</b>
<b>P24</b>	<b>Lavagem das pipetas</b>
<b>P25</b>	<b>Braço 1 livre na posição de segurança</b>
<b>P26</b>	<b>Espectrofotômetro livre</b>
<b>P27</b>	<b>Análise das amostras pelo espectrofotômetro</b>
<b>P28</b>	<b>Transporte do prato para o local inicial</b>
<b>P29</b>	<b>Braço 2 livre na posição de segurança</b>
<b>P30</b>	<b>troca de prato por um novo</b>

Tabela III.2: Transições da Rede de Petri

<b>T</b>	<b>Transições</b>
<b>T1</b>	<b>30 minutos</b>
<b>T2</b>	<b>Tampa aberta</b>
<b>T3,T4,T5 e T6</b>	<b>Um destes 4 eventos irá ocorrer por escolha interna</b>
<b>T7,T8,T9 e T10</b>	<b>Amostras despejadas</b>
<b>T11</b>	<b>Pipetas lavadas</b>
<b>T12</b>	<b>Tampa aberta</b>
<b>T13,T14,T15 e T16</b>	<b>Um destes 4 eventos irá ocorrer por escolha interna</b>
<b>T17,T18,T19 e T20</b>	<b>Amostras despejadas</b>
<b>T21</b>	<b>Pipetas lavadas</b>
<b>T22,T23,T24 e T25</b>	<b>Um destes 4 eventos irá ocorrer por escolha interna</b>
<b>T26,T27,T28 e T29</b>	<b>Reagente despejado</b>
<b>T30</b>	<b>Pipetas lavadas</b>
<b>T31</b>	<b>Prato chegou no espectrofotômetro</b>
<b>T32</b>	<b>Espectrofotômetro ja analisou</b>
<b>T33</b>	<b>Ocorre se Estado = 5</b>
<b>T34</b>	<b>Ocorre se Estado <math>\neq</math> 5</b>
<b>T35</b>	<b>Prato trocado</b>

## **IV. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD**

O conteúdo do CD está distribuído nas seguintes pastas:

### **IV.1 Códigos**

Contém os códigos da programação dos manipuladores robóticos e os códigos para simulação do reator realizado em MATLAB.

### **IV.2 Desenhos Técnicos**

Contém os desenhos técnicos para realização do trabalho.

### **IV.3 Vídeos**

Contém as filmagens das simulações que demonstram o sistema em funcionamento.

### **IV.4 Relatório**

Arquivo PDF do trabalho de graduação.