

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Alex de Souza Borges**

**POLÍTICAS ÓTIMAS DE ALIMENTAÇÃO DE SUBSTRATO E ENZIMA  
EM REATOR DE HIDRÓLISE OPERADO EM BATELADA  
ALIMENTADA: UMA ABORDAGEM DE CONTROLE ÓTIMO COM  
VALIDAÇÃO AUTOMATIZADA.**

**Dissertação de Mestrado**

**Goiânia  
2019**

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:       Dissertação       Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

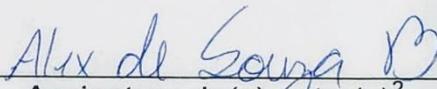
Nome completo do autor: Alex de Souza Borges

Título do trabalho: **POLÍTICAS ÓTIMAS DE ALIMENTAÇÃO DE SUBSTRATO E ENZIMA EM REATOR DE HIDRÓLISE OPERADO EM BATELADA ALIMENTADA: UMA ABORDAGEM DE CONTROLE ÓTIMO COM VALIDAÇÃO AUTOMATIZADA.**

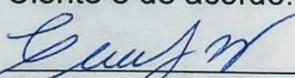
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 07 / 10 / 2019

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

ALEX DE SOUZA BORGES

**POLÍTICAS ÓTIMAS DE ALIMENTAÇÃO DE SUBSTRATO E ENZIMA  
EM REATOR DE HIDRÓLISE OPERADO EM BATELADA  
ALIMENTADA: UMA ABORDAGEM DE CONTROLE ÓTIMO COM  
VALIDAÇÃO AUTOMATIZADA.**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos necessários à qualificação em Engenharia Química, área de concentração em Processos Químicos e Biotecnológicos.

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Galeano Suarez.**

**Coorientadora Inti Doraci Cavalcanti Montaño.: Prof. Dra.**

Goiânia  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

de Souza Borges, Alex  
POLÍTICAS ÓTIMAS DE ALIMENTAÇÃO DE SUBSTRATO E ENZIMA EM REATOR DE HIDRÓLISE OPERADO EM BATELADA ALIMENTADA: UMA ABORDAGEM DE CONTROLE ÓTIMO COM VALIDAÇÃO AUTOMATIZADA [manuscrito] / Alex de Souza Borges. - 2019.  
ix, 75 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Galeano Suarez; co orientadora Dra. Inti Doraci Cavalcanti Montaña.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Química (IQ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Goiânia, 2019.  
Bibliografia. Anexos. Apêndice.

1. Fuzzy. 2. Dosado Automatizado . 3. Controle Ótimo. 4. Biorreator. 5. Hidrólise. I. Alberto Galeano Suarez, Carlos, orient. II. Título.

CDU 66.0

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE QUÍMICA

Ata de Defesa de Dissertação

Ata nº 33 da sessão da Defesa de Dissertação de **Alex de Souza Borges**, que confere o título de **Mestre em Engenharia Química**, na área de concentração em **Desenvolvimento de Processos**.

Ao/s **vinte e nove de agosto de dois mil e dezenove**, a partir da(s) **14h**, na **Sala de reuniões CIAR-UFG, Campus samambaia**, realizou-se a sessão pública da Defesa de Dissertação intitulada "**Políticas Ótimas de Alimentação de Substrato e Enzima em Reator de Hidrólise Operado em Batelada Alimentada: Uma Abordagem de Controle Ótimo com Validação Automatizada**". Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, **Prof. Dr. Carlos Alberto Galeano Suarez (IQ/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Inti Doraci Cavalcanti Montano (IQ/UFG), coorientadora, Prof. Dr. Gabriel Luis Castiglioni (EA - UFG), membro titular interno e Prof. Dr. Edson Romano Nucci (DQBIO-UFSJ), membro titular externo, cuja participação se deu por videoconferência. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Prof. Dr. Carlos Alberto Galeano Suarez (IQ/UFG), Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **vinte e nove de agosto de dois mil e dezenove**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Galeano Suarez, Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2019, às 14:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Edson Romano Nucci, Usuário Externo**, em 30/08/2019, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **ALEX DE SOUZA BORGES, Discente**, em 02/09/2019, às 17:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Luis Castiglioni, Professor do Magistério Superior**, em 03/09/2019, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Inti Doraci Cavalcanti Montano, Professor do Magistério Superior**, em 04/09/2019, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_exter\\_no=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_exter_no=0), informando o código verificador **0854715** e o código CRC **6593235D**.

**Referência:** Processo nº 23070.027397/2019-77

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALEX DE SOUZA BORGES, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA UNVERSIDADE FEDERAL DE GOIAS EM 29 DE AGOSTO DE 2019.

BANCA EXAMINADORA:

---

Carlos Alberto Galeano Suarez  
Orientador / UFG

---

Inti Doraci Cavalcanti Montaña,  
Coorientadora / UFG

---

Gabriel Luis Castiglioni  
UFG

---

Edson Romano Nucci  
UFSJ

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, principalmente meus pais Miraci e Marcos por me apoiar incondicionalmente, e creditar nos meus sonhos. Minha irmã que mesmo com tantos desafios para superar, buscava me ajudar. Agradeço minha namorada Luciana por aturar minhas faltas e estar sempre ao meu lado me apoiando.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Carlos por acreditar neste trabalho e pela confiança de me deixar criar, e por estar presente, respondendo minhas mensagens nos momentos mais inoportunos.

À minha coorientadora Prof. Dra. Inti que colaborou para o desenvolvimento deste trabalho, seu conhecimento foi de inteira importância para conclusão da pesquisa.

Agradeço aos meus amigos de jornada com os quais foi partilhado os desafios de seguir por este caminho, Elizabeth, Felipe, Carol.

Por fim, a CAPES e a FAPEG que apoiou financeiramente e valorizou esta pesquisa.

Muito obrigado!

## RESUMO

A utilização de combustíveis fósseis contribui para o aumento da quantidade de carbono livre na atmosfera, devido a maior parte do carbono liberado não retornar a superfície terrestre, impulsionando o aumento da temperatura global. Em contrapartida os biocombustíveis, em razão do ciclo de captura e liberação de carbono, são uma alternativa renovável, sua produção depende da captura do carbono presente na atmosfera através da fotossíntese o que possibilita o ciclo. A utilização de resíduos celulósicos é uma alternativa bastante promissora para a produção de biocombustíveis, como por exemplo o do etanol de segunda geração (2G). A principal razão é o fato de que esses resíduos não entram na competição “alimentos vs combustíveis” como é o caso do etanol 1G. Para a consolidação da produção industrial do etanol 2G é necessário a melhoria econômica e tecnológica do processo. De forma que há várias pesquisas que buscam viabilizar a produção etanol a partir da biomassa lignocelulósica, neste projeto é apresentado um aprimoramento no modo em que é conduzida a alimentação de biorreatores de hidrólise. A utilização de reatores em batelada alimentada proporciona redução dos custos de produção e aumentam a produtividade, tirando proveito de políticas de alimentação racionais de substratos e biocatalisadores. Sendo o objetivo do trabalho traçar por meio de um estudo computacional, os perfis de alimentação otimizados para o substrato bagaço de malte, e para os biocatalisadores utilizados na hidrólise do material lignocelulósico. Para validação dos perfis de alimentação foram projetados e construídos dispositivos, capaz de automatizar a alimentação de biorreatores. Os protótipos permitem realizar a alimentação de substrato e de enzima conforme perfis desejados. Os protótipos foram desenvolvidos utilizando tecnologia de impressão 3D para fabricação de dispositivos mecânicos, enquanto o controle foi realizado por dois microcontroladores em rede *half duplex*, encarregados de atuar sobre um transportador helicoidal para o transportador de sólidos. Devido a capacidade de atuar sobre sistemas não lineares a lógica nebulosa foi estabelecida como base do sistema, sendo encarregada de fazer as operações necessárias para manter em pleno funcionamento os alimentadores. Os dispositivos se mostraram capazes de aplicar de formar inexorável os perfis propostos, atuando a cada quatro segundo sobre o reator, dosando mg por mg durante 150 horas, algo impossível de ser feito manualmente.

Palavras-Chave: Fuzzy, Dosador, Controle Ótimo, Biorreator, Hidrólise.

## ABSTRACT

The use of fossil fuels contributes to the increase in the amount of free carbon in the atmosphere, because most of the released carbon does not return to the Earth's surface, boosting the global temperature increase. Biofuels are a renewable and environmentally safe alternative, inasmuch as in its production depends that the carbon present in the atmosphere be captured through photosynthesis forming a cycle of production and consumption of carbon. The use of cellulosic leavings is a Muito promising alternative for the production of biofuels as 2G ethanol. The main reason is the fact that these leavings do not enter the competition "food vs fuels " what happens with 1G ethanol. For the consolidation of the industrial production of 2G bioethanol, the economic improvement of the process is necessary. For this reason, there are several researches that seek to make feasible the technique, in this project, a way is presented to improve the feeding of bioreactors, in order to increase the efficiency of cellulose hydrolysis by releasing reducing sugars, which could be converted into second generation alcohol. The use of fed-batch reactors reduces production costs and increases yields, enjoying of rational feed policies of substrates and biocatalysts. Then, this project intends to determine by means of a computational study, the optimized feeding profiles of cellulosic substrate and fed batch enzyme. For this, a semi-mechanistic model is developed, and the optimal control theory for the development of feed profiles is used. For the application of the feed profiles, a system was designed and built, able to automate the feed for both bioreactors and reactors, which alBaixo s to operate with different feeding profiles. The prototype used 3D printing technology to manufacture the mechanical devices, the entire control is done by two microcontrollers in half duplex network, in charge of acting on a helical conveyor. Due to the ability to work with nonlinear systems, the fuzzy nebulous logic was established as the base of the system, being responsible for carrying out the operations necessary to keep the feeder fully operational.

Key-Words: Fuzzy, Feeder, Optimal Control, Bioreactor, Hydrolysis

## Lista de figuras

<i>Figura 1 - Esquema estrutural da biomassa lignocelulósica e composição química da lignina e da celulose, partindo da folha da planta e chegando até as unidade poliméricas formados da celulose hemicelulose e lignina .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2 – Moléculas de glicose, que unidades através das ligações <math>\beta</math>- 1,4 dão origem as unidades poliméricas da celulose .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3 - Etapas da produção de bioetanol a partir da celulose e da hemicelulose o foco do trabalho está na etapa de hidrólise.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4 - Ligação glicosídica <math>\beta</math>-1,4 fundamental para existência do biopolímero constituinte da celulose. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5 - Transportador helicoidal.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6 - Parafusos helicoidais .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7 Deformação sofrir pela estrutura da célula de carga quando uma massa sobre ela é depositada. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8 - Ponte de Whetstone.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9 - Strain Gauges .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10 - Diagrama do controlador PID na qual o erro <math>e(t)</math> é resultado da diferença entre a saída <math>x(t)</math> e o setpoint <math>x^*(t)</math> A variável erro é aplicada ao controlador que produz a função <math>u(t)</math> que tem como objetivo agir sobre o sistema com o objetivo de reduzir a diferença entre <math>x(t)</math> e <math>x^*(t)</math>.(SILVA et al., 2013) .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 11 - Função pertinência Clássica .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 12 - Função de pertinência fuzzy .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13 - Função de Pertinência da estatura .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 14 - Funções de pertinência de conjuntos nebulosos (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) singleton.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 15 - Operações com conjuntos nebulosos: (a) conjuntos A e B, (b) união; (c) interseção; (d) complemento.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16 - Sensor de peso utilizado no projeto no qual estão aderidas quatro strain gauges - resistências variáveis encapsuladas em um polímero -, responsáveis por detectar a deformação da célula de carga que através do microcontrolador é relacionada com a massa depositada sobre o sensor. ....</i>	<i>48</i>

<i>Figura 17- Imagem em perfil do dispositivo de alimentação desenvolvido 1) tanque de armazenamento, 2) bocal de saída de substrato, 3) motores de passo, 4) arduino nano, 5) células de carga, 6) conversor analógico digital, 7) driver motor de passo, 8) arduino Mega. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 18 - Representação do dispositivo de alimentação: na parte superior estão o microcontrolador o motor de passo os botões e os leds. Um parafuso acoplado ao motor ao girar, movimenta a base na qual está encaixado o embolo da seringa, permitindo encher e esvaziar a seringa.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 19 - Diagrama Simplificado da atuação do sistema de alimentação operado em malha fechada.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 20 - Funções de pertinência para que determinam o grau de pertinência da variavel desvio de em massa. Cada centro corresponde ao grau máximo de adesão (=1) . As funções são representadas por : DN: <math>D_{Nulo}</math>, DVN: <math>D_{Muito Baixo}</math>, DL: <math>D_{Baixo}</math>, DM1: <math>D_{Médio 1}</math>, DM2: <math>D_{Médio 2}</math>, DM3: <math>D_{Médio 3}</math>, DM4: <math>D_{Médio 4}</math>, DH: <math>D_{Alto}</math>, DVH: <math>D_{Muito Alto}</math>. Fonte: Autor.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21 - Funções de pertinência para que determinam o grau de correlação da variavel velocidade do motor. Cada centro corresponde ao grau máximo de adesão (=1) . As funções são representadas por : SN: <math>S_{Nulo}</math>, SVL: <math>S_{Muito Lento}</math>, SS: <math>S_{Nulo}</math>, SI1: <math>S_{Intermediária 1}</math>, SI2: <math>S_{Intermediária 2}</math>, SI3: <math>S_{Intermediária 3}</math>, SI4: <math>S_{Intermediária 4}</math>, SF: <math>S_{rápido}</math>, SVF: <math>S_{Muito rápido}</math>.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 22 - Relação do fluxo de massa do material sólido em função da velocidade de rotação do alimentador.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23 - Perfis de alimentação para o bagaço de malte a) Perfil logarítmico utilizando controle Fuzzy. b) Perfil logarítmico utilizando controle On-Off. c) Perfil exponencial utilizando Controle Fuzzy. d) Perfil exponencial utilizando controle On-Off. e) Perfil linear utilizando controle Fuzzy. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24 - Perfis alimentam o papel de filtro: a) Perfil logarítmico utilizando o controlo Fuzzy. b) Perfil logarítmico utilizando o controlo ON-OFF. c) Perfil exponencial utilizando o controlo Fuzzy. d) Perfil exponencial utilizando o controlo ON-OFF. e) Perfil linear utilizando o controlo Fuzzy. f) Perfil linear utilizando o controlo Fuzzy. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25 - Representada pelos triângulos em azul, a batelada simples do bagaço sem pré-tratamento, executada em triplicata, teve menor conversão que a que</i>	

ocorreu com o mesmo bagaço pré-tratado, representada pelos círculos vermelhos. No primeiro caso obteve-se a concentração final de glicose de 10,93 g/l; no segundo de 16,27 g/l. de modo que é possível constar a eficiência do pré tratamento. As condições de operação foram 50°C, pH 4.8, concentração inicial de enzima  $e(0) = 16,8 \text{ g.L}^{-1} \equiv 285 \text{ FPU.Lsolução}^{-1}$  e concentração inicial de glicose potencial de 15,6  $\text{g}_{\text{glicose\_potencial.Lsolução}}^{-1}$  ..... 63

Figura 26 - Hidrólise enzimática do bagaço de malte em batelada simples (dados simulados e experimentais). Parâmetros cinéticos do modelo de Michaelis-Menten com inibição:  $k.e = 0,1008 \text{ g.L}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ,  $k_m = 13,0 \text{ g.L}^{-1}$  e  $k_i = 3,1 \text{ g.L}^{-1}$ . As condições de operação são 50°C, pH 4.8, concentração inicial de enzima  $e(0) = 16,8 \text{ g.L}^{-1} \equiv 285 \text{ FPU.Lsolução}^{-1}$  e concentração inicial de glicose potencial de 15,6

$\text{g}_{\text{glicose\_potencial.Lsolução}}^{-1}$  ..... 64

Figura 27 - Simulações da política de alimentação para limite mínimo da taxa de reação variando de 35 a 85% da taxa inicial (a) velocidade de reação, (b) enzima total utilizada, (c) concentração de produto..... 67

Figura 28 - , a) pode se observar que a solução do problema do controle ótimo é do tipo bang-bang, onde a variável de controle vai do valor máximo ao mínimo, (b) Perfil de alimentação de bagaço pré-tratado, (c) Concentração de substrato, (d) Concentração de produto..... 74

Figura 29 - Execução da hidrólise de malte pré tratado em batelada alimentada, a esquerda o dosador de sólido no centro o reator encamisado e a direitas o dosador de líquido,..... 68

Figura 30 - Resultados simulados e experimentais para a política de alimentação de enzima e substrato. (a) Enzima alimentada, (b) alimentação de bagaço pré-tratado seco, (c) concentração de produto. As condições de operação são 50°C, pH 4,8, concentração inicial de enzima  $e(0) = 16,8 \text{ g.L}^{-1} \equiv 285 \text{ FPU.Lsolução}^{-1}$  e concentração inicial de glicose potencial de 12,2  $\text{g}_{\text{glicose\_potencial.Lsolução}}^{-1}$ ..... 69

## Lista de abreviações e siglas

$L$	Comprimento do fio condutor
$\Delta L$	Deformação elástica sofrida por um fio condutor
$R$	Resistencia do fio condutor
$\Delta R$	Varição da resistência do fio condutor
$K$	Fator de sensibilidade do extensômetro
$GF$	Gage Factor
$\rho$	Resistividade
$A$	Área transversal do fio condutor
$D$	Diâmetro do fio condutor
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\varepsilon$	Varição de Comprimento do fio condutor em função do comprimento do fio condutor
R1	Resistor um
R2	Resistor dois
R3	Resistor três
R4	Resistor quatro
$V_{abc}$	Divisor de tensão que passa pelos resistores a, b e c
$V_{adc}$	Divisor de tensão que passa pelos resistores a, d e c
$V_i$	Tensão de alimentação da ponte de Wheststone
$V_0$	Tensão de saída da ponte de Wheststone
$I_{abc}$	Corrente que passa pelos resistores a, d e c
PID	Proporcional Integral Derivativo
$K_p$	Ganho proporcional
$T_i(s)$	Tempo para que a saída do termo integrador chegue ao valor de ajuste
$T_d(s)$	Intervalo de tempo que a ação de controle derivativo antecede a ação de controle proporcional.
$x(t)$	Valor do sinal de saída do controlador PID em dado momento
$x'(t)$	Valor de referência do sinal do controlador PID
$e(t)$	Diferença entre entrada é saía do controlador PID

$u(t)$	Função PID que atua sobre o sistema controlado
$\mu_A(x), \rho_A(x)$	Função de Pertinência
$\wedge$	Operador minimum
$\vee$	Operador maximum
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
FPU	Atividade enzimática medida em papel filtro.
D <sub>Nulo</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de $-\infty$ a 0,05 g
D <sub>Muito Baixo</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,00 a 0,15 g
D <sub>Baixo&gt;</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,05 a 0,25 g
D <sub>Médio 1</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,15 a 0,30 g
D <sub>Médio 2</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,25 a 0,45 g
D <sub>Médio 3</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,30 a 0,75 g
D <sub>Médio 4</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,45 a 1,00 g
D <sub>Alto</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 0,75 a 3,00 g
D <sub>Muito Alto</sub>	Função de pertinência do desvio mássico de 1,00 a $+\infty$ g
S <sub>Nulo</sub>	Função de pertinência da velocidade de -0,10 a 0,11 rad/s
D <sub>Muito Baixo</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,00 a 0,16 rad/s
S <sub>Nulo</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,11 a 0,21 rad/s
S <sub>Intermediário 1</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,16 a 0,26 rad/s
S <sub>Intermediário 2</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,26 a 0,37 rad/s
S <sub>Intermediário 3</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,26 a 0,55 rad/s
S <sub>Intermediário 4</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,36 a 0,67 rad/s
S <sub>Rápido</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,52 a 0,94 rad/s
S <sub>Muito Rápido</sub>	Função de pertinência da velocidade de 0,68 a 1,20 rad/s

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA .....	20
2.1.1 Celulose.....	21
2.1.2 Hemicelulose.....	22
2.1.3 Lignina.....	22
2.2 HIDRÓLISE DE MATERIAL LIGNOCELULOSICO.....	23
2.2.1 Hidrólise enzimática .....	24
2.2.2 Modelagem da hidrólise da celulose .....	25
2.3 MOTIVAÇÃO DA HIDRÓLISE.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
2.3.1 Produção de etanol. ....	27
2.3.2 Etanol de segunda geração .....	27
2.4 TRANSPORTE DE SÓLIDOS .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
2.5 CÉLULAS DE CARGA.....	30
2.5.1 Princípios de funcionamento .....	30
2.5.2 Ponte de Wheatstone.....	33
2.5.3 Extensômetro de resistência elétrica.....	35
2.6 MÉTODOS DE CONTROLE .....	35
2.6.1 Controlador proporcional, integrativo derivativo (PID).....	36
2.6.2 Introdução a logica fuzzy.....	38
2.7 O PROBLEMA DO CONTROLE ÓTIMO .....	44
<b>3 MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>46</b>
3.1 SUBSTRATO.....	46
3.2 MICROCONTROLADOR.....	46
3.3 ENZIMA.....	46
3.4 SENSORES.....	46
3.5 MOTORES DE PASSO.....	50
3.6 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL.....	50
3.7 IMPRESSORA 3D .....	50
3.8 SOFTWARES .....	51

3.9 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE TOTAL DAS CELULASES .....	46
3.10 MODELAGEM DA HIDRÓLISE .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
3.11 CONTROLE FUZZY DESING .....	51
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1 PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO DE SÓLIDO .....	52
4.2 PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO DE LÍQUIDO .....	53
4.3 CONTROLADOR FUZZY .....	55
4.4 AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO.....	58
4.5 PRIMEIRA ESTRATÉGIA DE ALIMENTAÇÃO. ....	63
4.6 SEGUNDA POLÍTICA DE ALIMENTAÇÃO O CONTROLE ÓTIMO .....	67
4.7 ENSAIO BATELADA ALIMENTADA: PRIMEIRA ESTRATÉGIA .....	67
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>74</b>
APÊNDICE A SKETCH MASTER DOSADOR DE SÓLIDOS .....	67
APÊNDICE B SKETCH SLAVE DOSADOR DE SÓLIDOS .....	74
APÊNDICE C SKETCH DOSADOR DE ENZIMAS .....	77

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação ambiental por parte da população mundial trouxe à tona discussões a respeito do intenso uso de combustíveis fósseis, o que impulsionou o desenvolvimento dos biocombustíveis como o etanol. Entretanto, para a produção dos combustíveis de fontes renováveis, é necessário o plantio de grandes áreas com culturas específicas para estes fins, o que acarreta no problema da competição entre alimentos e combustíveis. Um dos caminhos para contornar esta questão é o uso de resíduos lignocelulósicos para a produção dos biocombustíveis, tal como ocorre na produção do etanol de segunda geração. Porém, para a plena utilização desta rota de produção ainda são necessários avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de perfis otimizados de alimentação de substratos e dispositivos capazes de colocar em prática estes perfis (CARVALHO, 2011).

A produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa lignocelulósica pode ser dividida em duas etapas: a final, já consolidada, a qual consiste na fermentação dos açúcares redutores produzindo o etanol; e a etapa inicial, quando ocorre a hidrólise da celulose podendo esta ser ácida ou enzimática. Apesar da hidrólise ácida ser mais rápida, ela gera componentes tóxicos para os microrganismos produtores de etanol, de tal modo que embora mais cara, a rota enzimática apresenta maior potencial para ser aplicada em escala industrial, por ser conduzida sob condições mais brandas e não gerar subprodutos tóxicos a etapa de fermentação (RABELO, 2010).

Em seu trabalho, Chang et al. (2012) comparou o desempenho de reatores em batelada simples e alimentada, no processo de sacarificação da celulose seguida da fermentação dos açúcares redutores. Nas mesmas condições de experimentais, foi constatado um rendimento 23% maior na produção de etanol nos reatores operados em batelada alimentada. Deste modo, conduzir a hidrólise da celulose nessa configuração de reatores pode vir a ser um bom ponto de partida, em busca da viabilidade técnica para a produção de etanol de segunda geração em escala industrial.

Neste trabalho desenvolveram-se perfis ótimos de alimentação de bagaço de malte e biocatalizadores, para hidrólise enzimática conduzida em batelada alimentada. As validações destes perfis foram feitas através do dispositivo de

alimentação apresentado em desenvolvido no projeto. O dispositivo de alimentação foi modelado no *SolidWorks* e impresso em 3D, usando a tecnologia *Fused Deposition Modeling*, sendo a interface computacional feita por dois microcontroladores em rede, e a lógica de controle baseada na teoria *fuzzy*. Assim, esta configuração possibilitou que o dispositivo fosse capaz de inferir ações no processo a cada quatro segundos. Este trabalho se faz importante por desenvolver ferramentas que possibilitam a aplicação de perfis de alimentação de forma precisa, com ações de controle sendo tomadas em um curto intervalo de tempo.

Conforme foi apresentado no trabalho Carvalho, (2011), há uma intensa lista de modelos desenvolvidos com o intuito de descrever a hidrólise da celulose, que em sua maioria partem dos modelos de Michaelis-Menten e Lineweaver Burk, e posteriormente são realizadas algumas modificações com o intuito de justificar fenômenos não descritos nos modelos iniciais.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Primordialmente levantou se dados a respeito do processo de hidrólise o que, fundamentou a escolha da configuração dos reatores usados neste trabalho e a forma como foi desenvolvida a modelagem do perfil de alimentação. Em seguida foram levantados quesitos pertinentes a construção do protótipo do dispositivo de alimentação e da lógica por traz do sistema de controle.

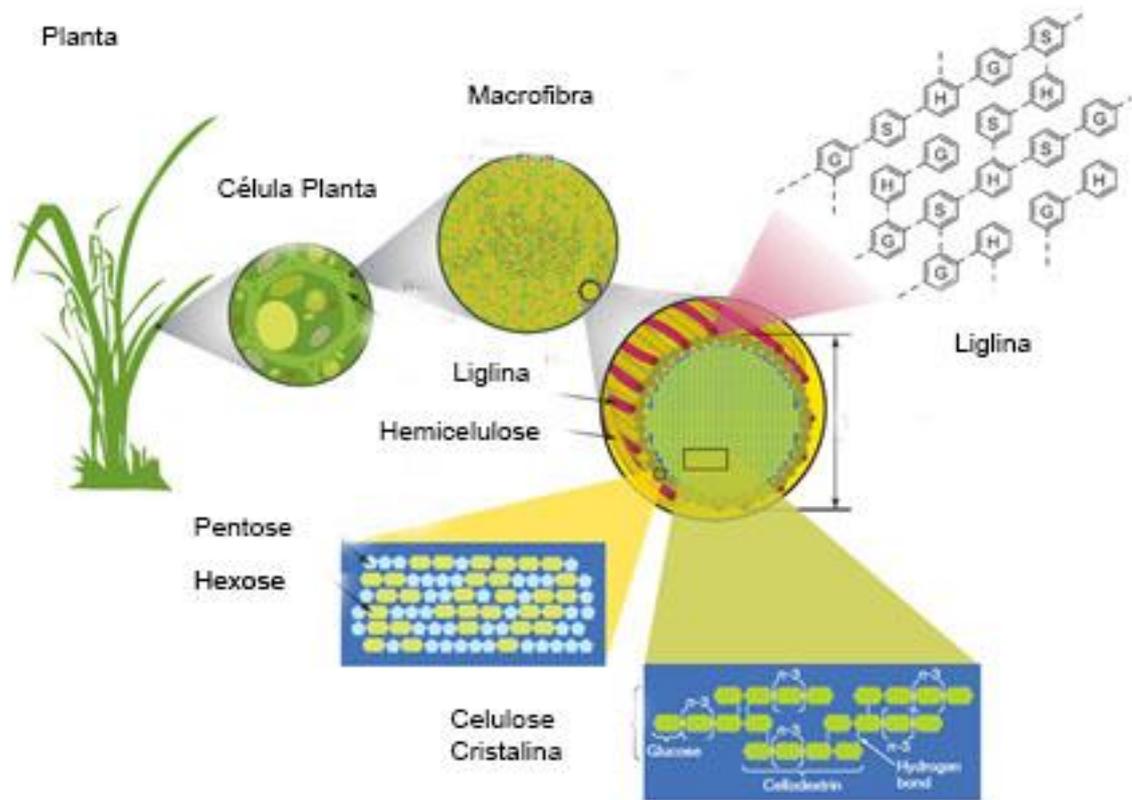
### 2.1. BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Constituída por fibras de celulose envolvidas em uma matriz amorfa de polioses e lignina, a biomassa lignocelulósica também é caracterizada por sua forma matricial amorfa o que dá a estrutura resistência natural contra o ataque de microrganismo e enzimas, tal estrutura ainda apresenta elevada rigidez e pouca reatividade. (WOJTUSIK et al., 2017)

A geração de biomassa lignocelulósica ocorre nos mais diversos processos produtivos, só a partir de cascas de milho, na China são produzidas 350 milhões de toneladas por ano.(ZHANG et al., 2018)

A biomassa lignocelulósica é um subproduto em diversos processos produtivos, e carece de valor comercial em muitos casos, o que a torna uma excelente fonte de substrato para o desenvolvimento de produtos com maior valor agregado, como é o caso do etanol de segunda geração (2G), permitindo um maior aproveitamento dos recursos e evitado a competitividade do etanol com culturas voltadas para produção de alimentos. (WANG; UNREAN; FRANZÉN, 2016) A Figura 1 ilustra a estrutura da biomassa lignocelulósica, permite observar que na parede celular vegetal encontra-se a microfibrila responsável pela característica cristalina estrutural. Nessa estrutura estão presentes a lignina a hemicelulose e a celulose.

Figura 1 - Esquema estrutural da biomassa lignocelulósica e composição química da lignina e da celulose, partindo da folha da planta e chegando até as unidade poliméricas formados da celulose hemicelulose e lignina



Fonte: (RUBIN, 2008)

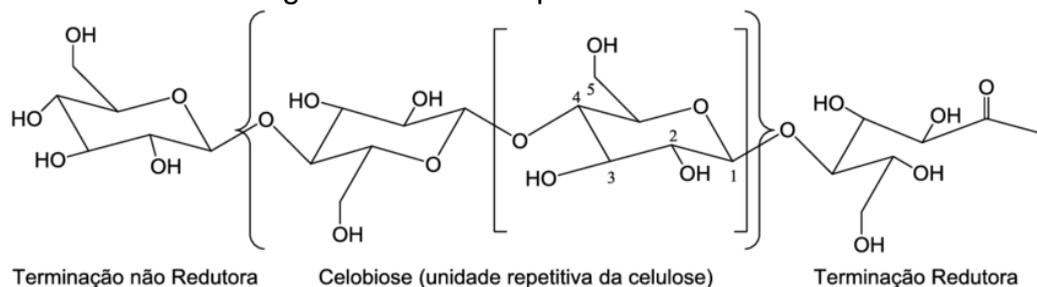
A biomassa lignocelulósica é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, estes três componentes são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores, com variações na sua composição. A celulose é um polímero de cadeia longa, formado pela associação de moléculas de glicose; a hemicelulose, uma mistura de polímeros de hexoses, pentoses e ácidos urônicos, que podem ser lineares ou ramificados; a lignina, um polímero orgânico complexo que une as fibras celulósicas, aumentando a rigidez da parede celular vegetal (ANDRADE, 2014).

### 2.1.1. CELULOSE

A celulose é o biopolímero mais abundante no mundo, estruturalmente é formada pela união de moléculas de  $\beta$ -glicose (hexosana) através de ligações  $\beta$  1-4 glicosídicas. Devido à forte tendência de ligação de hidrogênio inter e intramolecular presentes na celulose, são estruturas altamente ordenadas na forma cristalina e menos ordenadas nas regiões amorfas. As ligações dão a celulose elevada

resistência à tração e insolubilidade na maioria dos solventes. Entretanto as ligações glicosídicas são facilmente hidrolisadas por ácidos fortes ou por enzimas, tendo como resultado a formação da glicose. A forma polimérica da celulose pode ser observada na Figura 2 (YANG; JAAKKOLA, 2011).

Figura 2 - Moléculas de glicose, que unidades através das ligações  $\beta$ - 1,4 dão origem as unidades poliméricas da celulose



Fonte: (CORDEIRO et al., 2017)

### 2.1.2. HEMICELULOSE

Diferente da celulose que possui forma estrutural definida, composta exclusivamente de  $\beta$ -glicose, a hemicelulose é um heteropolissacarídeo constituído xilose, arabinose, galactose, manose e ramnose. Esta ampla diversidade de unidades monoméricas contribui para uma grande gama de ligações e ramificações, elevando a complexidade estrutural da hemicelulose e permitido diferentes conformações estruturais(YANG; JAAKKOLA, 2011).

### 2.1.3. LIGNINA

A lignina é um polímero amorfo irregular, ou seja, os diferentes monômeros do polímero estão ligados de forma não sistêmica. Formada por ácidos e álcoois fenis propílicos (p-cumarílico, coniferílico e sinapílico), que conformam uma matriz complexa nas quais as microfibrilas de celulose são incorporadas (CORDEIRO et al., 2017).

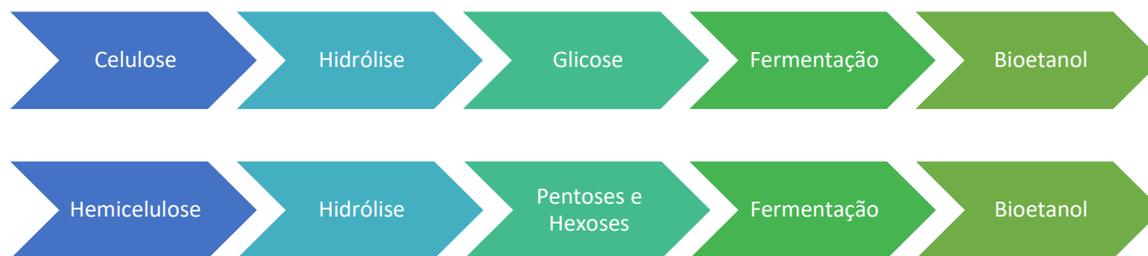
Esta macromolécula, é o principal obstáculo no processo de sacarificação, além de ser altamente resistente à degradação, ela reduz a acessibilidade as microfibrilas de celulose, e também adsorve as enzimas hidrolíticas. Uma alternativa para melhorar o processo, é o uso da rota química, na qual é possível a remoção da

lignina com ácido, mas este procedimento resulta na formação de compostos que podem inibir os processos de sacarificação e fermentação. Essas propriedades da lignina fazem com que sua biossíntese seja a chave na busca da eficiência do uso dos materiais lignocelulósicos em processos fermentativos (WENG et al., 2008).

## 2.2. HIDRÓLISE DE MATERIAL LIGNOCELULOSICO

A biomassa lignocelulósica pode ser utilizada como matéria-prima para fermentação de carboidratos como o etanol, conforme exemplificado na Figura 3. O principal componente presente na biomassa fermentativa é a celulose, a qual é uma excelente fonte de açúcares e apresenta maior facilidade de processamento quando comparada com a lignina e com hemicelulose. A hidrólise de materiais lignocelulósicos é comumente denominada de sacarificação, em razão da liberação de açúcares redutores, e o termo hidrólise faz referência a transferência de grupos funcionais para água durante a reação (NELSON; COX, 2013).

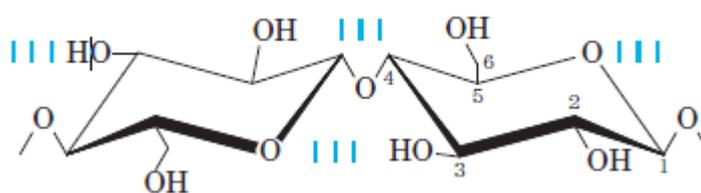
Figura 3 - Etapas da produção de bioetanol a partir da celulose e da hemicelulose o foco do trabalho está na etapa de hidrólise.



Fonte: Autor

A hidrólise da celulose ocorre através da quebra das ligações glicosídicas  $\beta$ - 1,4, que podem ser observada na Figura 4, a quebra libera os monômeros de glicose, que poderão utilizados posteriormente no processo de fermentação caso se vise a produção do etanol. Sendo que este último processo, pode ser influenciado, em razão dos produtos formados de acordo com o tipo de hidrólise à qual será submetido o substrato. Atualmente existem duas rotas que permitem realizar a hidrólise deste polissacárido, elas são a rota química através da hidrólise ácida e a rota bioquímica que utiliza um coquetel enzimático. (SUAREZ et al., 2014)

Figura 4 - Ligação glicosídica  $\beta$ -1,4 fundamental para existência do biopolímero constituinte da celulose.



Fonte:(NELSON; COX, 2013)

### 2.2.1. HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

A principal barreira da ampla produção de etanol 2G é a etapa de hidrólise enzimática, mais especificamente o alto custo da enzima e a eficiência do processo de agitação. Novos complexos enzimáticos e novas técnicas de produção são propostos frequentemente, em busca de viabilizar a produção industrial. A alta especificidade da enzima, e a não formação de subprodutos como é o caso do furfural

que dificulta a etapa de fermentação, justificam a escolha da hidrólise enzimática frente a ácida.

O pré-tratamento da massa lignocelulósica, etapa inicial da sacarificação da celulose, deve ser realizado antes da etapa de hidrólise. O pré-tratamento permite aumentar a acessibilidade ao ataque enzimático, expondo as cadeias de celulose através da alteração da parede celular vegetal. Por se tratar de uma reação enzimática, as condições do processo: proporção sólido-líquido, temperatura, concentração enzimática e pH, são de extrema importância para a hidrólise, e de acordo com o do substrato selecionado e das particularidades do complexo enzimático, estas condições de operação devem ser otimizadas. (CORDEIRO et al., 2017; RABELO, 2010).

Existem várias maneiras de conduzir o processo de hidrólise, entre as possibilidades estão os sistemas operados em reatores contínuo, semicontínuos e descontínuo, além disso, as hidrólises também podem ser realizadas com o uso de enzimas livres ou imobilizadas. Na pesquisa realizada por Chang (2012), ele avaliou as diferentes configurações de reatores, com o intuito de determinar qual delas apresentaria uma maior produção de etanol nas mesmas condições de temperatura, pH e concentração de enzimas. No processo de sacarificação seguido da fermentação, foram usadas cascas de milho como substrato durante 48 horas de experimento. No trabalho foi constatado, que reatores em batelada alimentada apresentaram um rendimento de até 23% maior na produção de álcool, quando comparado com o rendimento em batelada simples.

### 2.2.2. MODELAGEM DA HIDRÓLISE DA CELULOSE

Os modelos matemáticos são classificados de acordo com a forma na qual suas equações são desenvolvidas. Os modelos não-mecanísticos comumente chamados de empíricos, se baseiam simplesmente na relação quantitativa das variáveis analisadas, são funções escolhidas arbitrariamente para correlação de dados, não contemplando o entendimento científico ou fenomenológico do sistema. Já os modelos mecánicos presam por descrever os mecanismos do sistema através de uma base física ou fenomenológica, são mais complexos e não apresentam restrição a extrapolação (CARVALHO, 2011).

A união dos dois modelos descritos anteriormente resulta nos modelos semi-mecanísticos, que levam em consideração o entendimento científico e possui a simplificação necessária para tornar viável sua aplicação em processos ainda não bem conhecidos, o que torna este tipo de modelos ideais para o estudo da hidrólise enzimática (OGATA, 2010).

No trabalho de Angarita et al. (2015) foi proposto um modelo semi-mecanístico multi-reação capaz de descrever a hidrólise enzimática de palha de cana pré-tratada em alta concentração de sólidos, fermentada em batelada. Foi levado em consideração a adsorção enzimática, formação de xilose, inibição do produto final e reatividade do substrato. Apesar de algumas limitações o modelo conseguiu prever as concentrações de glicose a partir de 20% p/v com razoável precisão.

Modelos cinéticos desenvolvidos para interpretar hidrólises enzimáticas operadas em batelada alimentada, foram descritos por Zhang et al. (2009), tais modelos conseguiram prever o andamento da reação para concentrações de 62,4 g/L de substrato, entretanto não obtiveram resultados satisfatórios para concentrações de 82,0 g/L, o que foi justificado pela não adequação do modelo a limitação da transferência de massa em sistemas concentrados.

Durante o processo de hidrólise da celulose é comum que ocorra a diminuição da taxa de reação com o aumento da conversão, vários fenômenos têm sido propostos para justificar este fato. Tervasmäki et al. (2017) propôs avaliar tais fenômenos através de batelada alimentada, discretizando o substrato com base no tempo de alimentação. O modelo desenvolvido usou uma isoterma de absorção da Langmuir, e os fenômenos da diminuição da capacidade de adsorção da enzimática com o aumento da conversão, a inibição competitiva devido ao acúmulo de glicose e a diminuição da atividade da enzima adsorvida com o aumento da conversão. O modelo foi adequado para uma ampla gama de cenários, possibilitando avaliar a importância dos fenômenos de redução da taxa de reação. O uso de variáveis de controle não constantes é uma abordagem com potencial para aumentar o conteúdo informativo dos experimentos e a confiabilidade dos modelos (TERVASMÄKI et al., 2017).

### 2.3. PRODUÇÃO DE ETANOL

Os açúcares redutores oriundos do processo de hidrólise podem ser utilizados dentre outras maneiras na geração de etanol 2G, quando esse processo ocorre em conjunto com a produção de etanol de primeira geração os custos operacionais são reduzidos em razão do compartilhamento das rotas de produção. Há potencial para que seja dobrado o rendimento de etanol produzido a partir da cana de açúcar, sendo necessário para que isso ocorra a fermentação dos açúcares redutores presentes na hemicelulose e na celulose contidos na palha e no bagaço da cana (SANTOS et al., 2012).

### 2.3.1. PRODUÇÃO DE ETANOL.

Por ser um combustível de origem renovável, o etanol é considerado uma alternativa a futura escassez dos combustíveis de origem fóssil. Apresentado uma crescente competitividade comercial e menores impactos ambientais, que impulsionaram a produção mundial, chegando em 2007 a escala de 55,7 bilhões de litros. No Brasil a produção passou de 22 bilhões de litros em 2011/2012 para 27,7 bilhões em 2016/2017 (MAPA, 2018).

Em 1970 com implementação do Proálcool, como resposta do governo a crise mundial do petróleo, possibilitou o início da produção em larga escala do etanol no Brasil. Entretanto em 1980 a alta no preço do açúcar forçou a diminuição da produção de etanol, levando a falta no mercado nacional, e por consequência a perda da confiabilidade do consumidor. Todavia em 2000 como a alta do preço do petróleo e a implementação da “tecnologia” flexfuel em conjunto com o advento do aumento das preocupações ambientais elevaram o consumo e produção nacional de etanol (ALBARELLI, 2013).

A produção se mantém crescente desde 2000, por fatores políticos econômicos como a lei nº 13.033 de março de 2015 e que estabeleceu mistura obrigatória de 27,5 % de etanol à gasolina (BRITO, 2015).

### 2.3.2. ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Em março de 2018 o presidente-executivo da Raízen, Marcos Lutz afirmou, após participação no Cosan Day, evento anual da empresa com analistas e investidores, em São Paulo, – que a planta de etanol 2G, a Costa Pinto em Piracicaba

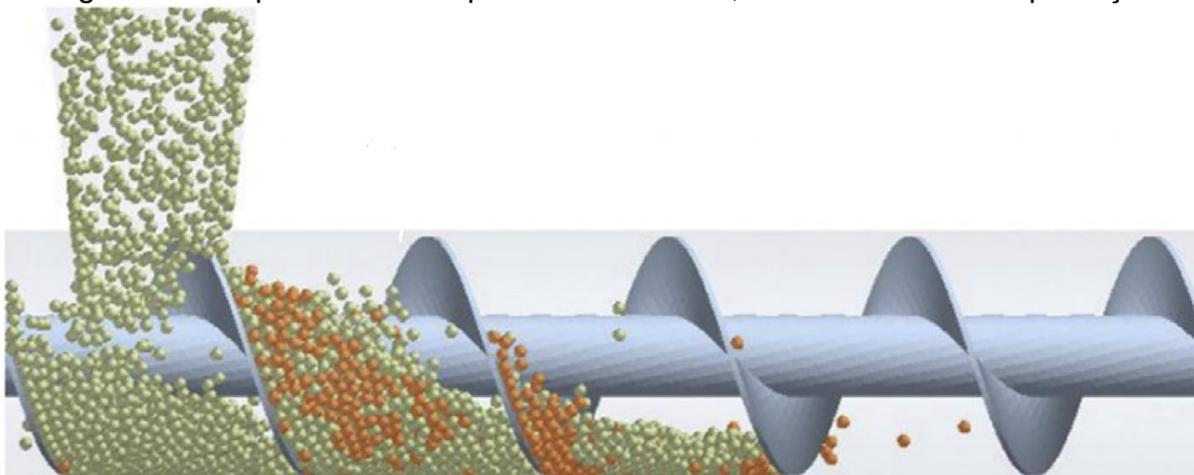
(SP), deve atingir a capacidade máxima de produção, de 40 milhões de litros, na temporada 2019/20. No ano de 2018 a mesma planta produziu 7 milhões de litros de etanol de 2G confirmando assim que esta tecnologia emergente avança a passos largos (GOMES, 2018).

A produção de etanol de segunda geração passa pela etapa de pré-tratamento, etapa essa que reflete diretamente nos custos de produção, pois a eficiência do processo reflete na quantidade de enzima necessária para realizar a hidrólise. Durante o pré-tratamento a celulose nativa que se encontra muito protegida pela matriz lignina-carboidrato é exposta, tornando-se mais acessível aos agentes hidrolíticos, o pré-tratamento pode ser de naturezas química, física e biológica (MOSIER et al., 1999).

#### 2.4. MECANISMOS DE TRANSPORTADORES DE SÓLIDOS

A aplicação dos perfis de alimentação se dará através de transportadores helicoidais. O transporte de sólido está presente em muitos processos industriais, o uso de transportadores helicoidais são um dos meios mais eficientes de conduzir partículas sólidas, por este motivo são amplamente empregados em diversos dispositivos de alimentação, presentes em indústrias farmacêuticas, no processamento mineral, de grãos e de fertilizantes. Os transportadores helicoidais, utilizam componentes relativamente simples sendo compostos por um cilindro externo e uma parafuso interno exemplificado na Figura 5 (KELEB et al., 2004; LEE; INGRAM; ROWSON, 2013).

Figura 5 - Esquema de transportador helicoidal, como efeito de compactação.



Fonte: (WANG et al., 2018)

A dosagem em transportadores helicoidais é comumente realizada por gravimetria, usando sensores denominados células de carga, ou por volumetria com base no volume transportado por revolução do parafuso. Durante o processo de transporte é comum que ocorra a compactação do sólido transportado, em função da velocidade de rotação do parafuso, de tal modo que a densidade do material é duvidosa. Esse fenômeno gera uma perda da precisão do controle por volumetria, entretanto não influencia o controle por gravimetria, pois o peso do material não depende do grau de compactação, fazendo com que a segunda opção seja mais indicada quando é necessária uma elevada precisão (WANG et al., 2018).

A impressão 3D torna possível a impressão de geometrias complexas de transportadores helicoidais, de forma rápida e precisa, algo que não era possível há pouco tempo, permitindo assim avaliar diferentes protótipos, identificando o que ajusta melhor a cada sistema em questão. A Figura 6 apresenta um exemplo de três modelos de parafusos presentes em transportadores helicoidais impressos em 3D.

Figura 6 - Exemplos de parafusos helicoidais impressos em 3D.

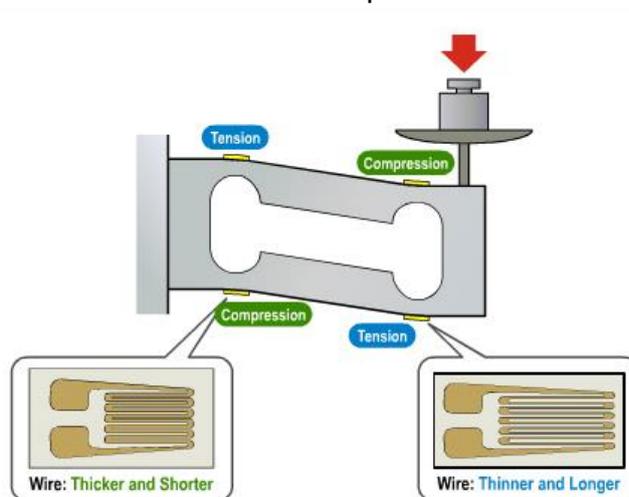


Fonte: (PRADHAN et al., 2018)

## 2.5. CÉLULAS DE CARGA

Comumente empregadas nos transportadores de sólidos, as células de carga relacionam a taxa de deformação elástica de sua estrutura com a massa sobre ela depositada conforme Figura 7.

Figura 7 - Deformação sofrida pela estrutura da célula de carga quando uma massa sobre ela é depositada.



Fonte: (BESTECH, 2018)

### 2.5.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

O extensômetro de resistência elétrica é capaz de medir a deformação mecânica a partir da variação da resistência elétrica, sua aplicação mais ampla é na construção de células de carga. Kelvin comprovou em 1856 que resistência elétrica  $R$  de um fio condutor  $L$ , quando submetido a uma deformação elástica  $\Delta l$ , sofre um acréscimo de intensidade  $\Delta R$  proporcional a deformação, o que pode ser descrito pela Equação (1) onde  $K$  é o fator de sensibilidade do extensômetro ou *Gage Factor* (GF) (BAKSHI, 2009).

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \quad (1)$$

A Equação geral que descreve a resistência do fio em função do comprimento  $L$ , área  $A$ , e resistividade  $\rho$ , diâmetro  $D$ , e coeficiente de Poisson  $\nu$ , é expressa por:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

Substituindo a Área =  $\pi D^2/4$  na Equação (2) temos a Equação (3).

$$R = \frac{4\rho L}{\pi D^2} \quad (3)$$

Quando submetido a Forças, o extensômetro sofre deformações que resultam na alteração da resistência representadas por:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial D} dD + \frac{\partial R}{\partial L} dL \quad (4)$$

Resolvendo as derivadas parciais de R,

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{4}{\pi D^2} L, \quad \frac{\partial R}{\partial D} = \frac{8\rho L}{\pi D} \quad \text{e} \quad \frac{\partial R}{\partial L} = \frac{4\rho}{\pi D^2} \quad (5)$$

Substituindo as equações (5) e (3) na Equação (4) temos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + 2 \frac{dD}{D} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (6)$$

Substituído a Equação (8) que determina deformação transversal de um material homogêneo e isotrópico com base coeficiente de Poisson  $\nu$  na Equação (6) e fazendo uso da Equação (7) e obtido a Equação (9).

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (7)$$

$$\frac{dD}{D} = -g \frac{dL}{L} \quad (8)$$

$$\frac{dR/R}{\varepsilon} = 2g + 1 + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (9)$$

A Equação fundamental para o estudo dos extensômetro Equação (10), expressa que a alteração da resistência  $\rho$  ocorre na proporção da variação do volume do material, sendo  $m$  uma constante do material (SANTOS, 2016).

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V} \quad (10)$$

Abrindo,  $V = AL$  aplicando a derivada e substituindo a taxa de deformação  $\varepsilon = \frac{dL}{L}$  temos;

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} = \frac{dL}{L} + \left( -2g \frac{dL}{L} \right) = (1 - 2g)\varepsilon \quad (11)$$

Substituindo (11) em (10), e em seguida na (9) foi obtido:

$$\frac{dR/R}{\varepsilon} = (2g + 1) + [m(1 - 2g)] = (1 + m) + 2g(1 - m) \quad (12)$$

A constante  $m$  é intrínseca de cada material, porem na construção de extensômetro é usado principalmente ligas níquel e cobre, nas quais  $m$  é admitido igual a uma unidade, simplificando a Equação (12) em :

$$\frac{dR/R}{\varepsilon} \cong 2 \quad (13)$$

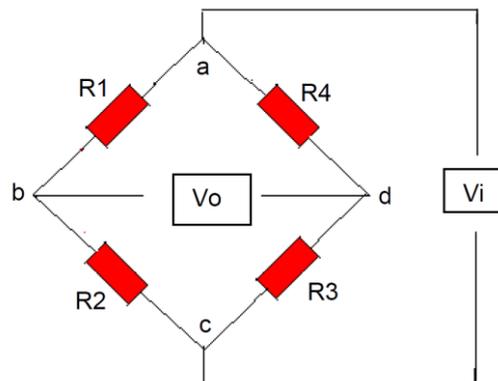
Por meio destes cálculos, foi possível definir a sensibilidade do material a deformação. No qual K é definido de acordo com a liga usada no extensômetro resistivo, de tal maneira que a Equação (13) se torna:

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon \quad (14)$$

### 2.5.2. PONTE DE WHEATSTONE

A ponte de *Wheatstone* é um comparador de resistores que serve para medir variações relativas de resistência elétrica. *Strain gauges* quando colocados em operação com pontes de *Wheatstone* permitem à amplificação dos sinais elétricos resultantes da tensão aplicada nos terminais do circuito.

Figura 8 – Circuito elétrico da ponte de *Wheatstone*



Fonte: (BAKSHI, 2009)

Na Figura 8 – Circuito elétrico da ponte de *Wheatstone* apresenta uma ponte formada pelos resistores R1, R2, R3 e R4 podendo estes serem *strain gauges*, alimentada nos terminais “a” e “c” pela tensão  $V_i$ , sendo o sinal de saída  $V_0$  mensurado nos terminais “b” e “d”, esta configuração *Wheatstone* possui dois pares de divisores independentes  $V_{abc}$  e  $V_{adc}$ .

Para analisar o princípio de funcionamento da ponte, a considere como um circuito de medição, no qual a tensão de saída  $V_0$  determina a deformação do extensômetro,  $V_{abc}$  e  $V_{adc}$  são dados por:

$$V_{abc} = I_{abc} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_i \quad (15)$$

$$V_{adc} = I_{adc} R_4 = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_i \quad (16)$$

Então a tensão de saída  $V_0$  nos terminais  $V_{bd}$  é:

$$V_0 = V_{bd} = V_{abc} - V_{adc} \quad (17)$$

Substituindo (15) e (16) em (17) temos:

$$V_0 = V_i \left( \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_4 + R_3)(R_1 + R_2)} \right) \quad (18)$$

Supondo que o sistema esteja balanceado, que ocorre quando  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ , e num dado instante ocorra variações  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ , tensão de saída seria:

$$V_0 = V_i \left( \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \right) \quad (19)$$

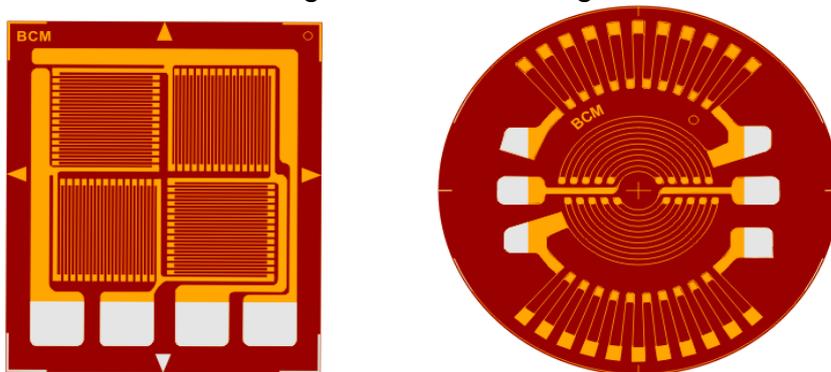
Simplificando a Equação (19) e simultaneamente substituindo nela a Equação (13) temos a Equação (20) da ponte de Whetstone para 4 sensores *strain gauges*, que explicita a sensibilidade da tensão saída em função da tensão de alimentação e do número da extensômetro presentes no sensor, através desta configuração é possível aumentar a sensibilidade das células de carga em até 4 vezes. Justificando o uso da ponte de Whetstone em conjunto com extensômetros, já que estes sensores operam com valores muito baixos de tensão, o que resulta em valores baixíssimos de variação da resistência, necessitando assim de sistema altamente sensíveis (ATAÍDE, 2012; SANTOS, 2016).

$$V_o = \frac{V_i * k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (20)$$

### 2.5.3. EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A Figura 9 apresenta dois modelos de *Strain Gauges* constituídos por uma grade de metal resistivo o substrato polimérico e os terminais de contato.

Figura 9 - *Strain Gauges*



Fonte: (SENSOR, 2018)

Basicamente qualquer metal ou liga pode ser usado como *strain gauges*, porem, ligas e Níquel-cobre são mais indicados para essa aplicação por se adequarem melhor aos seguintes fatores (BAKSHI, 2009):

- Alta sensibilidade **K**
- Alta resistividade  $\rho$
- Baixa sensibilidade à variação com a temperatura
- Alta tensão de escoamento (maior elasticidade)
- Fácil manuseio
- Baixa histerese
- Baixa fem térmica quando ligada a outros materiais
- Boa resistência à corrosão

### 2.6. MÉTODOS DE CONTROLE

A teoria de controle está associada a muitos campos científicos, os sistemas dinâmicos por objeto de estudo da teoria de controle, podem ser de diferentes naturezas: mecânicos, elétricos, eletrônicos, químicos, processos biológicos, econômicos, políticos e sociais. Antes do século XIX os sistemas de

controle eram baseados na intuição, só a partir de 1930 surgiu o fundamento matemático da teoria do controle, baseado nas publicações de (Routh, 1877; Hurwitz, 1895).

A aplicação da teoria de controle a sistemas dinâmicos, permite a construção de controladores que gerenciem o sistema em busca da maior eficiência com a menor interferência humana. A teoria clássica de controle teve como foco inicial o conceito do *feedback*, sustentada por; equações diferenciais de sistemas dinâmicos; teoria da estabilidade; e métodos de análise no domínio da frequência. A teoria clássica apresenta resultados insuficientes na manipulação de objetos não lineares, o que motivou o desenvolvimento de novos métodos de controle (PHU; HUNG, 2018).

No ano de 1964 a lógica Fuzzy também conhecida como lógica nebulosa ou difusa, ou ainda como teoria das possibilidades, foi proposta pelo professor Zadeh em seu artigo "Fuzzy Sets". Indo de encontro com a lógica clássica fundamentada por Aristóteles, na qual uma determinada proposição somente pode assumir valores verdadeiro ou falso. A lógica nebulosa permite que uma proposição assumam valores infinitos entre verdadeiro e falso, tais como, meio falso, muito falso, meio verdadeiro, levando em consideração as imprecisões e incertezas contidas no sistema. A teoria da lógica fuzzy absorve o modo como o ser humano realiza inferência, através de regras booleanas de raciocínio e atribuição de valores fuzzy (ZADEH, 1964).

#### 2.6.1. CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRATIVO DERIVATIVO (PID)

O controlador PID opera em malha fechada, sendo assim, para obter um setpoint determinado, o controle, a partir de informações a respeito do desvio da variável controlada frente ao setpoint, produz correções em busca de redução do desvio.

A priori, a não necessidade de conhecer a planta matemática para utilização do PID, o torna um controlador adaptável a sistemas nos quais não é possível fazer o projeto analítico, fazendo que ele seja o sistema de controle mais aplicado industrialmente. (OGATA, 2010)

Seu funcionamento se dá a partir das equações de transferência (21) para o tempo contínuo e (22) para o tempo discreto e de forma geral pela Equação (23) (MATTIELLO, 2015).

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s) \right) \quad (21)$$

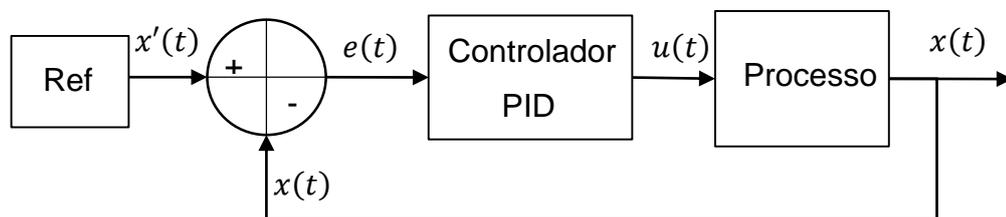
$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + k_i \int e(t) dt \quad (22)$$

$$u(t) = K_p(k) + \frac{K_d}{\partial e(k)} + k_i T_s \sum_{i=0}^t e(i) \quad (23)$$

A ação de controle PID é resultado da combinação de três componentes individuais da função  $G_c(s)$ . Esses três são:

- $K_p$  = Ganho proporcional que visa reduzir o tempo de acomodação.
- $T_i(s)$  = Tempo para que a saída do termo integrador atinja o valor de ajuste.
- $T_d(s)$  = Intervalo de tempo que a ação de controle derivativo antecede a ação de controle proporcional.

Figura 10 - Diagrama do controlador PID na qual o erro  $e(t)$  é resultado da diferença entre a saída  $x(t)$  e o setpoint  $x'(t)$ . A variável erro é aplicada ao controlador que produz a função  $u(t)$  que tem como objetivo agir sobre o sistema com o objetivo de reduzir a diferença entre  $x(t)$  e  $x'(t)$ .



Fonte: Adaptado de (SILVA et al., 2013)

## 2.6.2. INTRODUÇÃO A LOGICA FUZZY

A lógica Fuzzy é fundamentada na teoria dos conjuntos fuzzy, nela o raciocínio exato obedece ao caso limite do raciocínio aproximado, que é interpretado por um processo de relações nebulosas.

Nos sistemas lógicos binários, os predicados são exatos (exemplo; menor que, igual a), distinto do que ocorre na lógica fuzzy, nos quais os predicados são nebulosos (exemplo; pequeno, grande, sujo). Quanto aos modificadores, não seguindo a lógica clássica na qual os mais usuais são os de negação, na nebulosa existe um grande número de modificadores de predicados possíveis (e.g.: muito, mais ou menos,) (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

### 2.6.2.1. Conjuntos Fuzzy

Um conjunto é definido por qualquer número de objetos definidos e distintos agrupados. Na teoria clássica um dado objeto é membro de um conjunto ou completamente excluído do conjunto, o que é representado pelas funções (25) e (26).

Por exemplo, sendo A o conjunto de um universo U, composto por todos os polígonos, e X conjunto dos pentágonos denotado por:

$$X = \{ x \mid \text{possue 5 lados} \} \quad (24)$$

Claramente X é subconjunto de U, já que todo pentágono também é um polígono, e para a um elemento x particular de U existem duas possibilidades, indicadas pela função pertinência que determina o grau de compatibilidade de x com A, sendo 1 (um) para completamente compatível e 0 (zero) para completamente incompatível(ZADEH, 1964).

$$x \in X \rightarrow \mu_A(x) = 1 \quad (25)$$

$$x \notin X \rightarrow \mu_A(x) = 0 \quad (26)$$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (27)$$

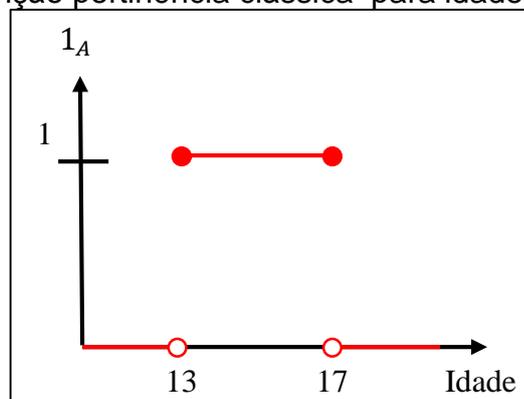
Mesmo que a teoria clássica dos conjuntos seja matematicamente sólida, em muitos casos reais ela não é aplicável. Considere o subconjunto A de U definido por (28), neste caso, jovem é algo abstrato e subjetivo sendo o seu conceito logicamente confuso, definir se um indivíduo é jovem não é tão simples quanto definir que todo pentágono também é um polígono. (KANDEL; SCHNEIDER, 1989)

$$A = \{x \mid x \text{ é jovem}\} \quad (28)$$

Este tipo de problema levou o desenvolvimento da lógica fuzzy por Zadeh em 1964. O conjunto fuzzy X possui valores associados entre 0 e 1 infinitos, o que possibilita determinar o quão jovial o elemento x é, algo que não poderia ser feito através da teoria clássica, que a este questionamento só poderia determinar se x é ou não jovem.

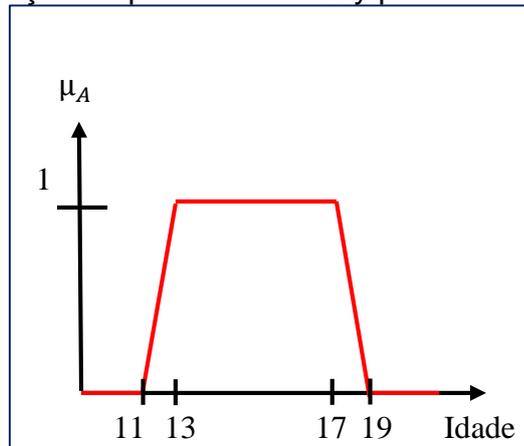
As Figura 11 e Figura 12 apresentam como a lógica fuzzy e a clássica abordam conceitos abstratos de formas diferentes. Enquanto o conjunto “crisp” (conjunto da teoria clássica visto como um conjunto fuzzy) representado graficamente na Figura 11, não consegue caracterizar perfeitamente um adolescente já que uma pessoa com 12 anos e 11 meses seria completamente excluída do conceito de adolescente, visto que para ser adolescente o intervalo da idade é de 13 a 17 anos. O conjunto fuzzy, como pode ser observado na Figura 12, permite expressar através da função de pertinência o grau de compatibilidade de uma pessoa qualquer com o conjunto dos jovens (BRITO, 2015).

Figura 11 - Função pertinência clássica para idade de um indivíduo.



Fonte: Autor

Figura 12 - Função de pertinência fuzzy para idade de um indivíduo

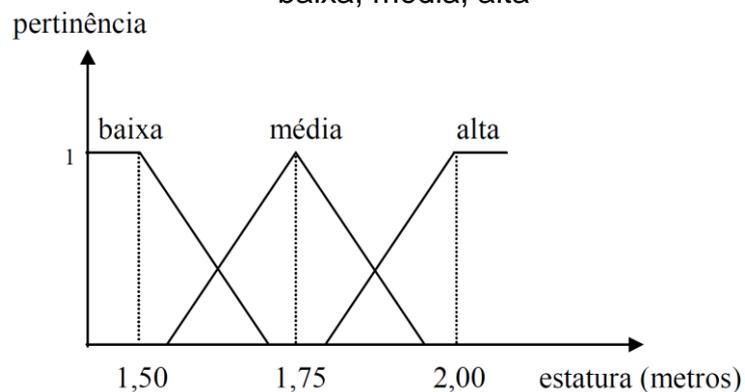


Fonte: Autor

#### 2.6.2.2. Funções de pertinência

A representação do conjunto fuzzy, por meio de graus de pertinência no intervalo  $[0, 1]$  recebe o nome de funções de pertinência, comumente representada por  $\mu_A(x)$  ou  $\rho_A(x)$ . Na Figura 13 podem ser observados os valores linguísticos “fuzzificados”, da variável estatura (de pessoas), resultando em funções de pertinência de conjuntos fuzzy, o que permite interpretar de maneira sistemática fenômenos complexos e incompletamente definidos da descrição linguística utilizada pelo ser humano (SOUSA, 2005).

Figura 13 - Função de Pertinência piramidal para variáveis linguísticas estatura: baixa, média, alta



Fonte: (TANSCHKEIT, 2003)

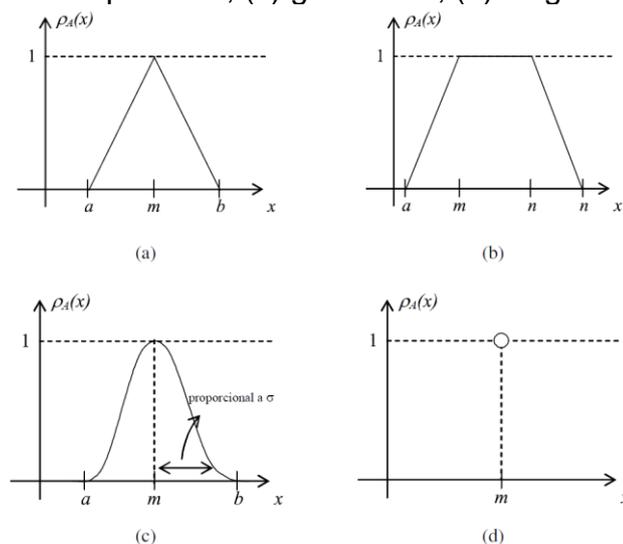
Em 1,5 metros o grau de pertinência do conjunto baixo é igual a um, sendo então totalmente compatível. Com o aumento da estatura ocorre o decréscimo do grau, zerando pouco antes de 1,75, sendo então totalmente incompatível ao grupo médio. Pessoas com 1,75 metros tem grau de pertinência um para o grupo média, e pessoas com mais de 2,00 metros são sem dúvidas altas.

Entretanto existem noções diferentes para estatura de acordo com a cultura, região e descendência na Figura 13 pessoas com 1,74 não são nem um pouco altas tendo grau de pertinência zero para este grupo, mas assim podem ser consideradas em outras situações como exemplo em uma tribo de pigmeus 1,74 pode ser muito alto. Portanto o contexto é essencial importância para construção das funções de pertinência, que são definidas de acordo com as perspectivas e experiência de cada usuário, de forma simples as funções de pertinência podem ser triangular, trapezoidal, gaussiana ou singleton representadas na Figura 14.

As funções de pertinência contínuas ainda podem ser definidas por meio de funções analíticas (29), sendo a, b e c são parâmetros capazes de distinguir as variáveis linguísticas (TANSCHKEIT, 2003).

$$\mu_A(x) = (1 + (a(x - c)))^{b-1} \quad (29)$$

Figura 14 - Funções de pertinência de conjuntos nebulosos (a) triangular, (c) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) singleton.



Fonte: (CALVO, 2007)

### 2.6.2.3. Definições e operações

As funções mais relevantes para a abordagem da lógica fuzzy, foram propostas por Zadeh, podendo ser expressas de maneira algébrica e na forma de gráfica conforme Figura 15 (ZADEH, 1964).

- a) Um conjunto fuzzy  $A$  em  $X$  é vazio se, e somente se sua função de pertinência é igual a zero sobre todo  $X$

$$A = \phi \text{ se e somente se } \rho_A(x) = 0 \forall x \in X \quad (30)$$

- b) O complemento  $A'$  de um conjunto fuzzy  $A$  é normalmente dado por:

$$\rho_{A'}(x) = 1 - \rho_A(x) \forall x \in X \quad (31)$$

- c) Dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  em  $X$  são iguais se suas funções de pertinência forem iguais sobre todo  $X$

$$A = B \text{ se e somente se } \rho_A(x) = \rho_B(x) \forall x \in X \quad (32)$$

- d) Um conjunto fuzzy  $A$  é um subconjunto de  $B$  se sua função de pertinência for menor ou igual à de  $B$  sobre todo  $X$

$$A \subset B \text{ se } \rho_A(x) \leq \rho_B(x) \forall x \in X \quad (33)$$

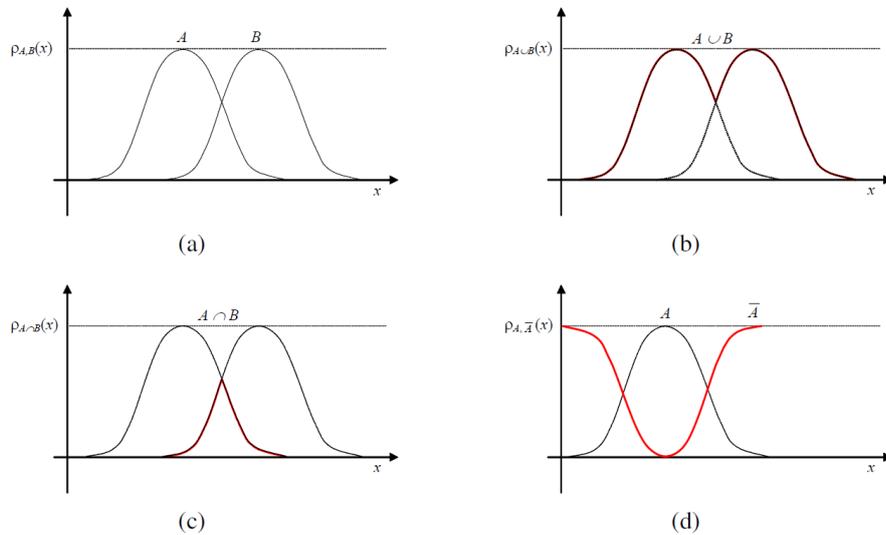
- e) Operador minimum (min ou  $\wedge$ )

$$A \wedge B \text{ se } \rho_{A \wedge B}(x) = \rho_A(x) \wedge \rho_B(x) \forall x \in X \quad (34)$$

- f) Operador maximum (max ou  $\vee$ )

$$\rho_{A \vee B}(x) = \rho_A(x) \vee \rho_B(x) \forall x \in X \quad (35)$$

Figura 15 - Operações com conjuntos nebulosos: (a) conjuntos A e B, (b) união; (c) interseção; (d) complemento



Fonte: (CALVO, 2007)

#### 2.6.2.4. Regras Nebulosas

As regras nebulosas são o ponto crucial da construção de um controlador fuzzy, tais regras armazenam o conhecimento do sistema nebuloso e a maneira que devem ser aplicadas, possibilitando um modo formal de criar estratégias de controle (ALCANTUD; BIONDO; GIARLOTTA, 2018).

Estas regras permitem a criação da lógica adequada para implantação em unidades de processamento, através de regras condicionais do tipo “Se <antecedente> então <consequente>”. Na qual o antecedente (variáveis de entrada) e o consequente (variáveis de saída), são associados aos conjuntos nebulosos (termos linguísticos) que por meio de operados lógicos difusos se integram a todo universo de discurso. São exemplos de regras nebulosas segundo (CALVO, 2007):

- Se a altitude é alta então a temperatura é baixa.
- Se a distância é longe então a visibilidade é baixa
- Se o pulo é alto então a perna é forte.

De uma forma geral as regras podem ser simplificadas por:

$$\text{Se } X \text{ é } A \text{ então } Y \text{ é } B \quad (36)$$

As regras nebulosas podem ser expressas através de relações nebulosas  $R$ , na qual cada elemento pertencente a junção dos universos de discurso, possui seu grau de pertinência incluso no intervalo  $[0,1]$ , sendo  $R$  definido como:

$$R: X \times Y \rightarrow \{0,1\} \quad (37)$$

## 2.7. EMBASAMENTO MATEMÁTICO DO CONTROLE ÓTIMO

O controle ótimo serve para determinar perfis otimizados de alimentação de reagentes, sem precisar informações obtidas em tempo real. A trajetória ótima da variável de controle pode ser obtida mediante a aplicação do Princípio do Mínimo ou Máximo de Pontryagin Ramirez (1994), que transforma o problema de otimização em um problema de valor de contorno em dois pontos.

O primeiro passo para a obtenção dos algoritmos de controle ótimo é obter o modelo matemático da dinâmica do sistema a ser controlado. Posteriormente, deve ser definido o conjunto de condições de contorno e restrições sobre as variáveis de estado, no tempo inicial, final, e ao longo da trajetória. Deve também ser definida a função objetivo que a política de controle que vai maximizar ou minimizar, sujeito a restrições impostas pela natureza física do problema. No caso de função objetivo só no tempo final, pode ser expressada da seguinte forma:

$$J = h(\underline{x}(t_f), t_f) \quad (38)$$

$h$  é a contribuição do estado final ( $t_f$ ) para a função objetivo, ao mesmo tempo que é função de  $\underline{x}(t)$ , vetor de variáveis de estado.

### 2.7.1. PRINCÍPIO DO MÁXIMO OU MÍNIMO DE PONTRYAGIN

O Princípio do Máximo ou Mínimo de Pontryagin, permitiu a inclusão de restrições sobre as variáveis de controle. Este problema pode ser transformado em um problema de dois pontos de valores de contorno através da introdução de um vetor das variáveis adjuntas ( $\underline{\lambda}(t)$ ). O problema então, consiste em dois conjuntos de equações diferenciais, as equações dinâmicas do modelo matemático e as equações diferenciais das variáveis adjuntas, unidas por uma condição de otimização. Para as

equações do modelo matemático são conhecidas somente as condições iniciais e para as equações das variáveis adjuntas somente condições finais. Uma dedução detalhada do equacionamento resultante pode ser encontrada em Raimirez (1994). Aqui, reportam-se apenas as equações resultantes.

As condições necessárias para a otimização, na presença restrições sobre a variável de controle  $\underline{u}(t)$ , são convenientemente expressadas em termos do “Hamiltoniano” ( $H$ ), o índice de desempenho é maximizado/minimizado, maximizando-se/minimizando  $H$ :

$$\max_{\underline{u}(t), t_f} H = \underline{\lambda}^T \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, t) \quad (39)$$

Onde  $\underline{f}$  é o vetor que contém as equações do modelo matemático,  $\underline{x}(t)$  é o vetor de variáveis de estado, no tempo  $t$ ,  $\underline{u}(t)$  é o vetor das variáveis de controle e  $\underline{\lambda}^T(t)$  é o vetor transposto das variáveis adjuntas (também chamadas variáveis de co-estado ou multiplicadores dinâmicos de Lagrange).

Aplicando o princípio do Máximo de Pontryagin, um conjunto de condições necessárias para maximizar ou minimizar a função objetivo são definidas como:

*Equação de Euler-Lagrange:*

$$\dot{\underline{\lambda}} = -\frac{\partial H}{\partial \underline{x}} \quad (40)$$

*Relações de Restrição:*

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f} = \frac{\partial H}{\partial \underline{\lambda}} \quad (41)$$

*Transversalidade*

$$\left[ \frac{\partial h}{\partial \underline{x}}(t_f) - \underline{\lambda}(t_f) \right]^T \delta \underline{x}_f + \left( H(t_f) + \frac{\partial h}{\partial t}(t_f) \right) \delta t_f = 0 \quad (42)$$

*Controle Ótimo:*

$$\frac{\partial H}{\partial \underline{u}} = 0 \quad (43)$$

Uma solução do tipo *bang-bang* (com o controle assumindo os valores das restrições superior e inferior, de forma alternada) é regida pelo sinal da seguinte Equação:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial u^2} = \underline{\xi} \quad (44)$$

Se  $\underline{\xi} > 0$ , então o valor da variável de controle que minimiza o Hamiltoniano será o seu valor mínimo,  $\underline{u}^{\min}$ , se  $\underline{\xi} < 0$ , então o valor da variável de controle que minimiza o Hamiltoniano será o seu valor máximo  $\underline{u}^{\max}$ , se  $\underline{\xi} = 0$ , então recai-se em um arco singular.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. SUBSTRATO

Nos ensaios experimentais foram usados como substrato: papel filtro da Whatman para determinação da Atividade enzimática, bagaço de malte com e sem pré-tratamento nas hidrólises em batelada alimentada.

#### 3.2. ENZIMA

O complexo enzimático utilizado nos experimentos é produzido pela Novozyme Corp, e possui o nome comercial *Cellic<sup>®</sup>CTec2*, que contém enzimas celulasas  $\beta$ -glicosídeos e hemicelulasas como principais componentes do complexo. Sendo indicado para hidrolisação de celulose em açúcares fermentáveis, sendo eficaz em uma ampla variedade de biomassa lignocelulósica. As melhores condições de operação se dão no intervalo de temperatura de 50 e 55°C e de pH 5 a 5,5.

#### 3.3. DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE TOTAL DAS CELULASES

O presente método segue diretrizes da *International Union of Pure and Applied Chemistry* IUPAC, sendo proposto inicialmente por Miller (1959). A aplicação específica do método, permite neste trabalho, expressar a atividade em papel de filtro “FPU”, utilizando dados da concentração da enzima necessária para produzir uma massa de 2 mg/mL de açúcar redutor.

Para determinar o FPU em um tubo de ensaio de 50 mL, foram pipetados 1 mL do complexo enzimático e 9 mL de tampão citrato 50 mM pH 5,0, resultado numa diluição de 10x, desta solução foram retiradas novas alíquotas de 1; 0,75; 0,5 mL que completadas com tampão resultaram nas diluições de 100x, 150x e 200x. Foram pipetados em *ependorfs* de 2,0 mL, 0,5 mL de cada uma das 3 diluições mais 1 mL de tampão citrato, com o objetivo que alguma destas diluições resultasse numa conversão de aproximadamente 2 mg/mL de glicose.

Posteriormente as amostras foram levadas ao banho maria a 50 °C por 3 minutos para ativação enzimática, em seguida o papel filtro Whatman de 1,0 x 6,0 cm equivalente a 50 mg foi adicionado de maneira que ficasse totalmente submerso. Os *ependorfs* foram colocados na incubadora rotativa a 50 °C e 250 rpm, durante 60 min para que a hidrólise da celulose ocorresse. Após os 60 min, tirou-se os *ependorfs* da incubadora que foram centrifugados por 5 minutos, uma alíquota de 10 µL foi retirada de cada um incluindo dos brancos e adicionada à 1 mL da solução indicadora, a mistura foi levada ao banho maria a 37 °C por 5 min. Para descartar a pré-existência de açúcares nos ensaios, foram incluídos os controles branco da enzima, 0,5 mL da enzima e 1 de citrato e o branco do substrato, 1,0 x 6,0 cm papel e 1,5 mL de tampão.

No espectrofotômetro as absorbâncias foram medidas no comprimento de onda de 510 nm, usando como branco 1,0 mL a solução indicadora. Os valores das absorções referentes aos controles, foram subtraídos das medias das suas respectivas diluições. No Origin pro 2018 foi plotado o log do inverso da diluição versus a concentração de açúcar já determinada por meio da curva padrão de glicose e o absorção de cada diluição. No gráfico determinou-se qual diluição produziria exatamente 2 mg/mL de glicose. Então o valor da diluição referente a 2 mg/mL de glicose, foi substituindo na Equação (45) e o valor da concentração na Equação (46) determinado o valor do FPU (HERRIOT; PEMBERTON, 1995).

$$\text{concentração} = \frac{1}{\text{Diluição}} \quad (45)$$

$$FPU = \frac{0,37}{\text{concentração} \times X} \quad (46)$$

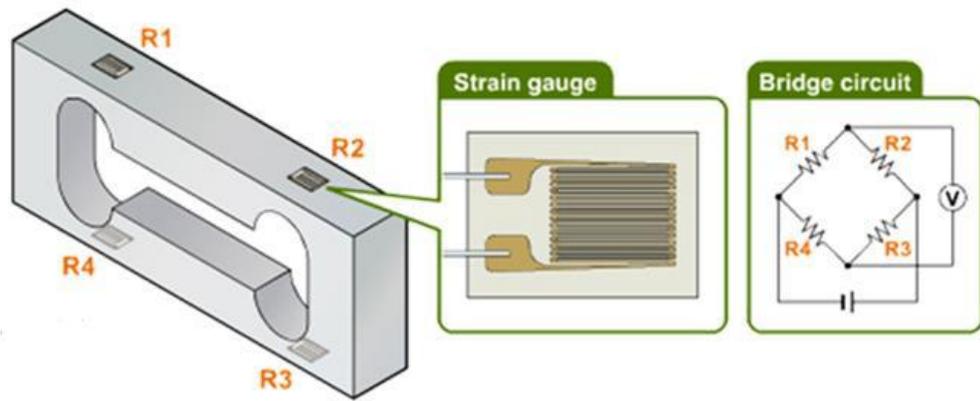
### 3.4. MICROCONTROLADOR

Foram escolhidos como microcontroladores dois tipos de arduinos, o Mega 2560 e o nano 328, ambos são controlados por chips da Atmega. Sendo diferenciados pela quantidade de portas e capacidade de memória. Por ser uma plataforma *open-source*, o arduino pode ser facilmente adaptada a cada projeto, se adequando as necessidades do sistema de alimentação. Para o desenvolvimento dos *shetch's* foi usado o ambiente de programação e compilação fornecido pelo próprio arduino denominado *Integrated Development Environment* ou simplesmente IDE.

### 3.5. SENSORES

Os dois sensores extensômetricos do tipo célula de carga, que são utilizados para aferir a massa de substrato depositada no transportador, são da marca ZHIPU, estes possuem a carga nominal de 200 g cada um, são compostos por quatro extensômetros de resistência em uma ponte de *Wheatstone*, fixados em uma liga de alumínio. O efeito de histerese informado pelo fabricante é de 0,02%, as dimensões e especificações podem ser observadas na Figura 16

Figura 16 – Esquema do sensor de peso utilizado no projeto no qual estão aderidas quatro strain gauges - resistências variáveis encapsuladas em um polímero -, responsáveis por detectar a deformação de carga.



Fonte: (MCAINSH, 2014)

### 3.6. MOTORES DE PASSO

Neste estudo foram utilizados dois motores 28BYJ-48 de 12 volts responsáveis por girar o parafuso transportador. Os motores de passo foram escolhidos em razão da alta precisão e bom torque que estes apresentam. O motor é o tipo unipolar, ou seja, conta com quatro bobinas separadas em seu interior, que podem ser acionadas em *half-step*, *full-step* e *wave-step*. Este motor possui uma caixa de redução de 1/64, isso quer dizer que para cada volta do motor reduzido são necessárias 64 voltas do “original” e por consequência para girar 360° são necessários 4096 passos, resultando na precisão de 0,088° por passo. Na configuração em que o motor foi instalado resultou em um torque de 1,13 kgf/cm, que se mostrou suficiente para conduzir os substratos analisados.

### 3.7. CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

A ampliação e conversão do sinal analógico do sensor de carga ficou a cargo do conversor analógico digital Hx711, a ampliação possibilita o aumento da resolução do sinal. O Hx711 possui 24 bits de resolução, o que significa que para uma entrada analógica de tensão variável entre 0 v e 5 v, ele permite capturar 16777216 níveis discretos. A frequência de atualização do Hx711 é de 80 Hz, a comunicação se fez pelo protocolo de comunicação TTL 232.

### 3.8. IMPRESSORA 3D

A impressora Sethi3D AiP foi utilizada para impressão das partes mecânicas do projeto, a impressora faz uso da tecnologia de extrusão FDM *Fused Deposition Modeling* no qual um extrusor deposita camada por camada de um material plástico fundido até a impressão total da peça. O modelo trabalha com filamentos de 1,75 mm, altura da camada ajustável de 0,05 a 0,03 mm, e área de impressão de 220 x 21 x 200 mm, atendo perfeitamente as necessidades do projeto.

### 3.9. SOFTWARES

A lógica *Fuzzy* aplicada no projeto é resultado da modificação da biblioteca *Embedded Fuzzy Logic Libray* “eFLL” disponível no GitHub, esta biblioteca foi desenvolvida pela *Robotic Research Group* na Universidade Estadual do Piauí na linguagem C “*stdlib.h*” destinada a qualquer sistema embarcado. Não possui limitações explícitas de quantidade de conjuntos *fuzzy*, regras *fuzzy*, entradas ou saídas, sendo limitado pela capacidade de processamento e armazenamento do microcontrolador. A biblioteca utiliza o processo de (MAX-MIN) e (Mínimo de Mamdani) para a inferência e composição e (centro de Área) para a desfuzificação, no universo contínuo.

O controle On-Off utilizado para efeitos de comparação, realizou-se através da comparação entre a função objetivo (perfil de alimentação de substrato) e o valor proveniente da leitura do sensor de carga, então uma função condicional, que determina o desvio, diferencia entre os dois valores, aciona os motores para realizar ou não a alimentação do sólido.

### 3.10. CONTROLE FUZZY DESING

O controlador aplicado neste trabalho usa o método de operação *fuzzy* Mamdani, que opera guiado pela sequência de operações:

1. A variável de entrada, neste projeto representada pelo desvio mássico, é convertida em funções de pertinência *fuzzy*, (variáveis linguísticas do tipo desvio mássico baixo, médio ou alto) por meio da interface de fuzificação. Neste ponto, é possível realizar uma atribuição dos valores linguísticos para os valores reais.
2. A informação fuzzificada (variável desvio mássico convertida em variável linguística), é processada usando uma base de regras, composta pelas regras *fuzzy* do tipo IF-THEN, as quais foram definidas para controlar o processo de alimentação de sólido. O resultado é a forma "*Fuzzy*" (variável linguística) do sinal de controle, esta operação é conhecida como inferência. As composições das regras de inferência foram realizadas através da utilização de max-min de Mamdani, da forma:

$$\varphi M(x, u) = \max_{1 \leq i \leq r} (\varphi R_i(x, u)) = \max_{1 \leq i \leq r} [\varphi A_j(x) \wedge \varphi B_j(u)] \quad (47)$$

Sendo  $r$  o número de regras que compõem a base de regras e,  $A_j$  e  $B_j$  são os subconjuntos *fuzzy* da regra  $j$ . A vantagem do uso deste método é permitir que sejam unidas diversas regras “condicionais” com mais de uma entrada retornando uma saída, e identificar quão apropriado cada regra é para a situação.

3. Finalmente, este sinal de controle fuzzy (variável linguística) é convertido para um sinal utilizável pelo atuador (motor), o que permite realizar a ação de controle sobre o processo, dito de outro modo, o valor de saída obtido é um valor discreto (variável real, no caso velocidade de rotação) que representa a relação entre os diferentes valores fuzzy contidos na saída do controlador e a variável real. Esta operação é conhecida como desfuzificação e neste caso foi feita pelo método de centro de áreas (SOUZA, 2010)

$$CentroArea = \frac{\sum_{i=1}^N y_i W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (48)$$

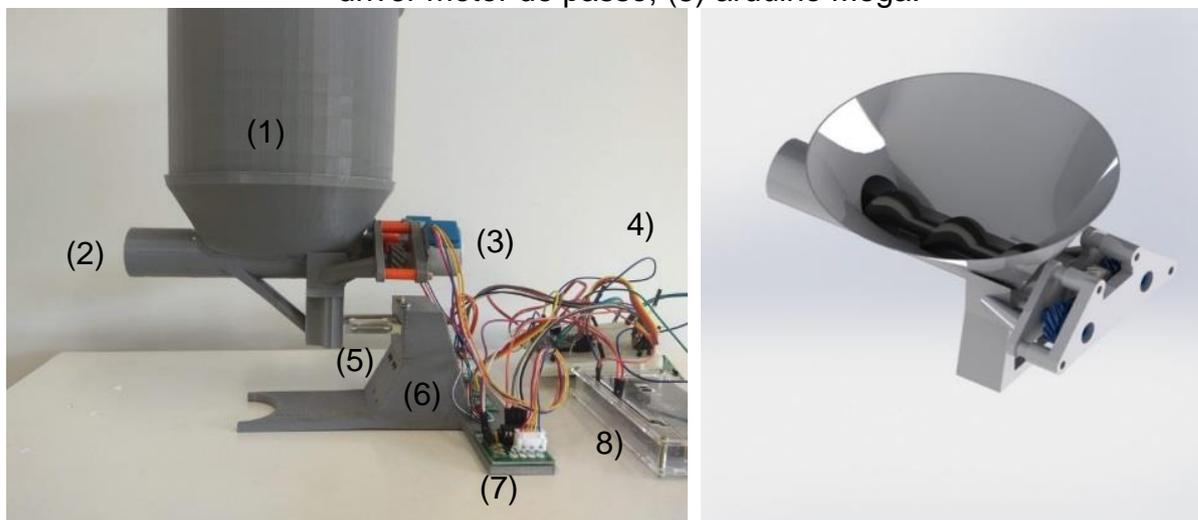
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO DE SÓLIDO

O dispositivo passou por algumas transformações até que se chegasse na versão final, foram testadas as configurações: motor e relação 1:1 entre motor e parafuso transportador, dois motores de 5 v e relação 1:3/4, versão final opera com dois motores de 12 v e uma caixa de redução de 1:3/4. Os testes com os motores foram necessários para encontrar um sistema leve, que vibrasse pouco e que tivesse torque suficiente para transportar o substrato. Foi determinado de forma empírica qual o ângulo das paredes do tanque de armazenamento seria suficiente para que o substrato não aderisse.

Foram testadas também configurações a respeito da quantidade sensores e conversores que resulte no melhor funcionamento do dispositivo. Em razão da vibração ocasionada pelo funcionamento dos motores e movimentação do substrato, a configuração de dois sensores de carga de 100g apresentou melhores resultados. Não houveram diferenças significativas entre o uso de um ou dois conversores, por essa razão optou-se por usar a penas um conversor A/D Hx711 no qual foi convertido o sinal analógico oriundo dos sensores de massa foi convertido em um sinal digital na resolução de 24bits, as conversões foram testadas nas taxas de 20, 40 e 80 amostras por valor de massa retornado pelo sistema. A menor quantidade de amostras resulta numa flutuação maior, e uma alta, demanda uma maior quantidade de tempo para o programa retornar os valores de massa, por conseguinte, o dispositivo foi configurado para 40 amostras, valor suficiente para amortecer parte dos ruídos do sinal e que reduz o tempo de processamento de dados.

Figura 17- Imagem em perfil do dispositivo de alimentação desenvolvido (1) tanque de armazenamento, (2) bocal de saída de substrato, (3) motores de passo, (4) arduino nano, (5) células de carga, (6) conversor analógico digital, (7) driver motor de passo, (8) arduino Mega.



Fonte: Autor

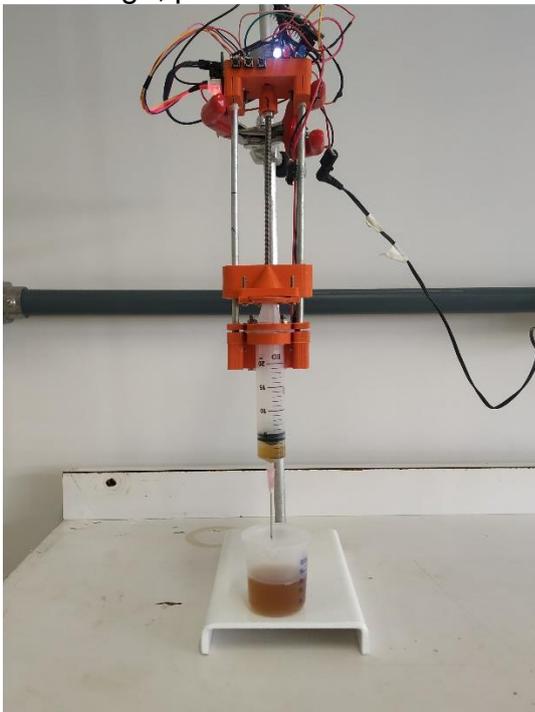
#### 4.2. PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO DE LÍQUIDO

Impresso em 3D, o dosador de líquido permitiu a dosagem de enzimas de maneira precisa e possui um baixo custo de construção. Operando em malha aberta dispensa a necessidade de sensores para seu funcionamento. O dispositivo funciona

tanto de forma independente quanto em conjunto com o dosador de sólido, um arduino nano é responsável por aplicar os perfis de alimentação. A lógica de programação partiu dos ensaios experimentais, que relacionaram os passos do motor com o volume dosado, que permitiram o desenvolvimento da Equação 48, então informado um volume que o controlador deve dosar ele o converte em passos. Para o caso em estudo, foram criadas funções condicionais temporais para controlar o momento que os pulsos de enzima fossem executados. O volume máximo que pode ser dosado é de 50 ml equivalente a seringa que deve ser acoplada ao dispositivo. O dosador possui três botões e três leds, cada botão e led representam um estado de funcionamento: esvaziando dispositivo, enchendo dispositivo, executando perfil de alimentação a Figura 18 apresenta o dispositivo.

$$Passos = \frac{ul}{0,08241} \quad (48)$$

Figura 18 - Representação do dispositivo de alimentação de líquidos: na parte superior estão o microcontrolador o motor de passo os botões e os leds. Um parafuso acoplado ao motor ao girar, movimenta a base na qual está encaixado o embolo da seringa, permitindo encher e esvaziar a seringa.



Fonte: Autor

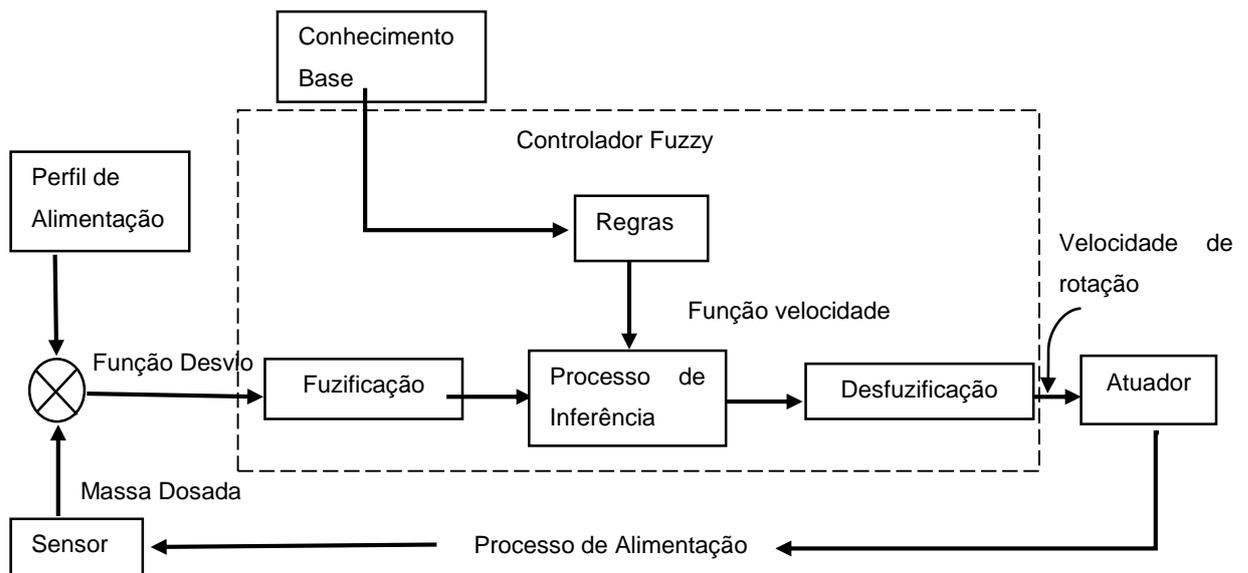
#### 4.3. CONTROLADOR *FUZZY*

O sistema de controle *fuzzy* tem como entrada a função de desvio e como variável manipulada a rotação do motor. O diagrama de blocos que representa o funcionamento do controlador *fuzzy* é apresentado na Figura 19.

A sequência de operações para o desenvolvimento do controlador *Fuzzy* Mamdani, no qual as informações de entrada real, a variável medida, a variável controlada (set point), e o erro de controle foram convertidos em uma representação *fuzzy*, são apresentadas a seguir. Inicialmente foi realizada a fuzificação das informações reais, nas quais as funções de pertinência foram criadas a partir do variável desvio de massa, tal variável foi definida como a diferença entre o valor da massa medida pelo sensor e o valor da massa no setpoint (usando um perfil definido). Então o desvio de massa foi fuzzificado nas funções de pertinência, variando em uma faixa de valores de 0,0 gramas a 2,0 gramas, sendo estes valores representados pelas variáveis linguísticas de  $D_{Nulo}$  correspondentes a valores menores ou iguais a zero gramas, e a variável linguística  $D_{Muito\ Alto}$ , que corresponde a valores iguais ou maiores

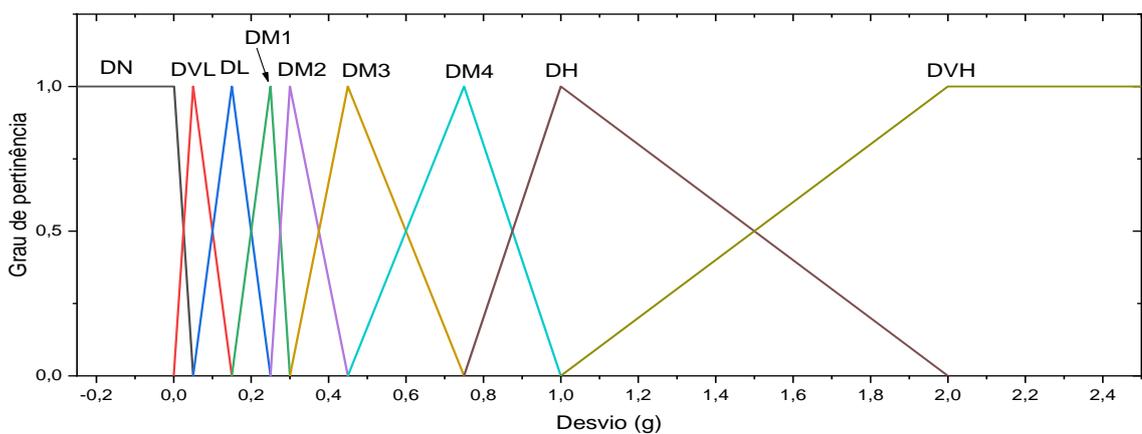
que 2,0 gramas. No total, foram criadas 9 funções de pertinência para a variável desvio de massa, as variáveis linguísticas utilizadas para os demais valores podem ser observadas na Figura 20.

Figura 19 - Diagrama Simplificado da atuação do sistema de alimentação operado em malha fechada



Fonte: Autor

Figura 20 - Funções de pertinência para que determinam o grau de pertinência da variável desvio de em massa. Cada centro corresponde ao grau máximo de adesão (=1) . As funções são representadas por : DN: D<sub>Nulo</sub>, DVN: D<sub>Muito Baixo</sub>, DL: D<sub>Baixo</sub>, DM1: D<sub>Médio 1</sub>, DM2: D<sub>Médio 2</sub>, DM3: D<sub>Médio 3</sub>, DM4: D<sub>Médio 4</sub>, DH: D<sub>Alto</sub>, DVH: D<sub>Muito Alto</sub>.



Fonte: Autor

Note que entre as variáveis linguísticas presentes da Figura 20,  $D_{\text{Médio}2}$  e  $D_{\text{Muito Baixo}}$  são mais estreitas que as demais, garantindo assim - através das interações fuzzy - um ajuste fino da modulação da dosagem, nas regiões em que o delay impacta fortemente no desvio. Enquanto que, quando a influência do delay é fraca sobre o desvio, as funções de pertinência foram desenvolvidas para englobar um conjunto maior de valores, e conseqüente são maiores, como pode ser observado nas funções  $D_{\text{Alto}}$   $D_{\text{Muito Alto}}$ .

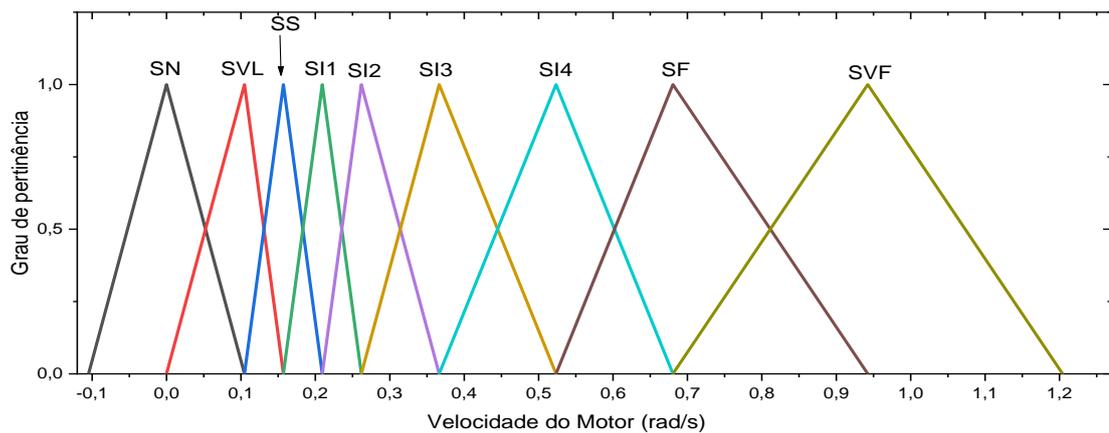
Uma vez que, construídas as funções de pertinência de entrada, ou seja, a associações dos valores de desvio da massa a variáveis linguísticas, gerou-se o sistema de inferência *Fuzzy* que neste trabalho é executado pelo método min-máx de Mamdani, representando através das regras de inferência, e fundamentado em conhecimentos prévios do sistema. As respostas das regras de inferência são variáveis linguísticas da velocidade de rotação do motor, na medida de seus graus de pertinência. Em razão da forma com que foram construídas as funções de pertinência, cada entrada de desvio - que pode ser composta por até duas funções de pertinência - retorna no máximo duas variáveis linguísticas de velocidade. As regras foram do tipo SE “condição” ENTÃO “conclusão” como pode ser observado a seguir:

- SE o desvio = “  $D_{\text{Nulo}}$  “ ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Nulo}}$  “
- SE o desvio = “  $D_{\text{Muito Baixo}}$  “ ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Muito Lento}}$  “
- SE o desvio = “  $D_{\text{Baixo}}$  “ ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Lento}}$  “
- SE o desvio = “  $D_{\text{Médio } 1}$  ” ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Intermediária } 1}$  ”
- SE o desvio = “  $D_{\text{Médio } 2}$  ” ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Intermediária } 2}$  ”
- SE o desvio = “  $D_{\text{Médio } 3}$  ” ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Intermediária } 3}$  ”
- SE o desvio = “  $D_{\text{Médio } 4}$  ” ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Intermediária } 4}$  ”
- SE o desvio = “  $D_{\text{Alto}}$  “ ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Rápido}}$  ”
- SE o desvio = “  $D_{\text{Muito Alto}}$  “ ENTÃO Velocidade de rotação = “  $S_{\text{Muito Rápido}}$  ”

A conclusão da regra indica de qual forma a variável de saída (velocidade de rotação) pertence integral ou parcialmente a um ou mais conjuntos fuzzy. A conversão das conclusões geradas pela inferência foram desfuzzificada através do método de centro das áreas para assim poderem ser compreendidas pelo atuador.

Obtendo valores de rotação que variam entre 0,0 rad/s até 0,94 rad/s. As variáveis linguísticas de velocidade do motor podem ser observadas na Figura 21.

Figura 21 - Funções de pertinência para que determinam o grau de correlação da variável velocidade do motor. Cada centro corresponde ao grau máximo de adesão (=1). As funções são representadas por : SN: S<sub>Nulo</sub>, SVL: S<sub>Muito Lento</sub>, SS: S<sub>Nulo</sub>, SI1: S<sub>Intermediária 1</sub>, SI2: S<sub>Intermediária 2</sub>, SI3: S<sub>Intermediária 3</sub>, SI4: S<sub>Intermediária 4</sub>, SF: S<sub>Rápido</sub>, SVF: S<sub>Muito rápido</sub>

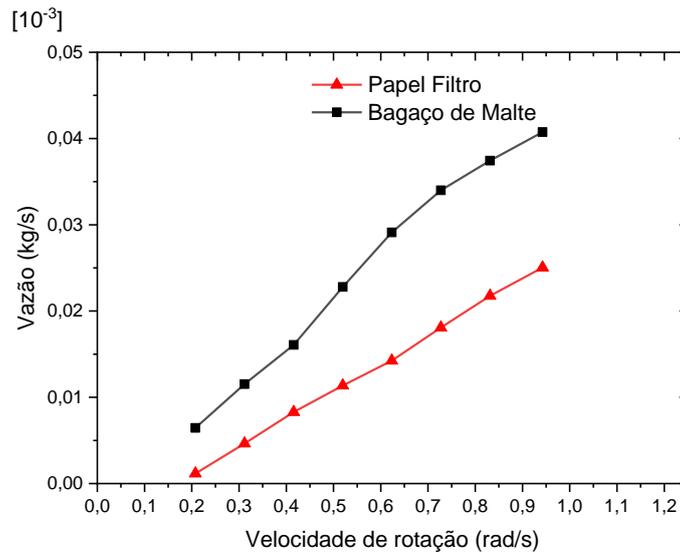


Fonte: Autor

#### 4.4. AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO

A Figura 22 apresenta a correlação obtida a partir de dados experimentais para dois papel filtro e bagaço de malte. Esta relação permite determinar a vazão mássica em função da velocidade de rotação do alimentador. Destacam-se as distintas vazões para cada substrato sólido transportado. O que é justificado em razão das diferentes propriedades inerentes de cada material, tais como densidade, geometria da partícula, e reologia.

Figura 22 - Relação do fluxo de massa do material sólido em função da velocidade de rotação do alimentador para papel filtro e bagaço de malte



Fonte: Autor

O resultado da aplicação do sistema de controle *fuzzy* ao transportador helicoidal foi comparado com resultados obtidos a partir do uso de um controlador com ação ON-OFF. Os testes foram realizados para alimentação de papel filtro cortado em círculos de 6 milímetros e bagaço de malte, três perfis de alimentação foram avaliados para cada material: logarítmico, exponencial e linear.

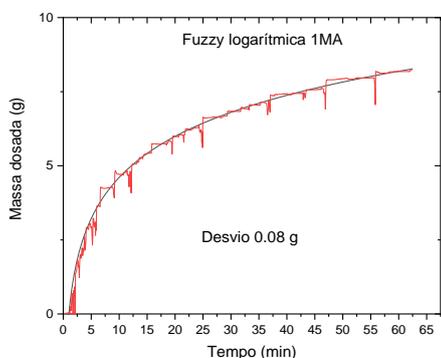
Na Figura 22 é possível visualizar que para os três perfis de alimentação realizados, o sistema *fuzzy* (Figura 23 a, c e) apresentou o melhor desempenho se comparado com o controle tipo On-Off (Figura 23 b, d f). O que é mais evidente nos perfis linear e logarítmico, nos quais observou-se uma maior dificuldade de atuação do controle. O critério que permite comparar os sistemas é o desvio, diferença pontual entre a massa alimentada e a estabelecida pelo *setpoint*. Quanto mais próximo de zero é este valor, mais preciso é o sistema de controle. Resultados similares aos obtidos neste estudo, no qual um controle *fuzzy* apresentou um melhor desempenho quando comparado com outro tipo de controle, são reportados na literatura (Boverie et al., 1991; Mirzaee-Ghaleh et al., 2015; Ulpiani et al., 2016; Ardabili et al., 2016). O desvio do controle fuzzy foi de 2,63 a 4,5 vezes menor que o ON-OFF.

Na alimentação do papel filtro a eficiência do controlador *fuzzy*, foi similar à apresentada pelo bagaço de malte. Entretanto devido ao papel apresentar uma maior adesão às paredes do transportador, o dispositivo teve uma maior dificuldade ao alimentar esse substrato. O destaque fica para o perfil de alimentação logarítmica ON-OFF, no qual houveram 13,5 vezes mais pontos cuja massa dosada foi superior

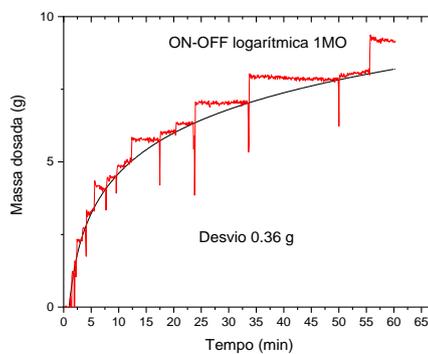
a estabelecida pelo *setpoint*, quando comparado com o sistema *fuzzy* no qual o desvio foi igual a 10.9 vezes maior, o que representa uma redução aproximada do 20% no desvio entre o valor do *setpoint* e o valor dosado.

Comparando os resultados obtidos, fica evidente que o controlador *fuzzy* obteve um melhor desempenho em todos os casos. O fato se justifica pela a forma de operação do controlador *fuzzy*, por este responder proporcionalmente ao desvio, dessa maneira se aproxima suavemente ao *setpoint*. Já no caso do controlador On-Off, por não ter modulação, todos os desvios apresentam a mesma resposta. O delay necessário para que o microcontrolador execute todas as rotinas de controle, no sistema On-Off faz com que o dispositivo faça a dosagem de material além do determinado pelo *setpoint*, em razão do tempo necessário para detectar a variação de massa e da falta de modulação da vazão. O tempo de resposta influencia negativamente também no controlador *fuzzy*, entretanto por este sistema de controle ser modular a resposta da vazão de acordo com cada desvio, é melhorada, devido a que o efeito é amortecido.

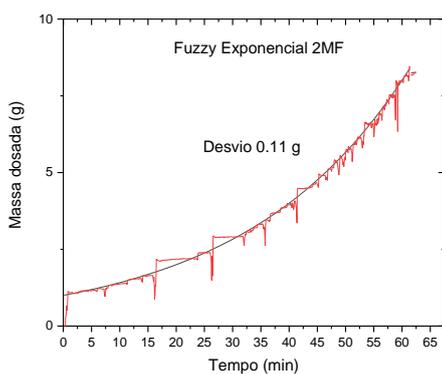
Figura 23 - Perfis de alimentação para o bagaço de malte a) Perfil logarítmico utilizando controle Fuzzy. b) Perfil logarítmico utilizando controle On-Off. c) Perfil exponencial utilizando Controle Fuzzy. d) Perfil exponencial utilizando controle On-Off. e) Perfil linear utilizando controle Fuzzy. f) Perfil linear utilizando controle On-Off.



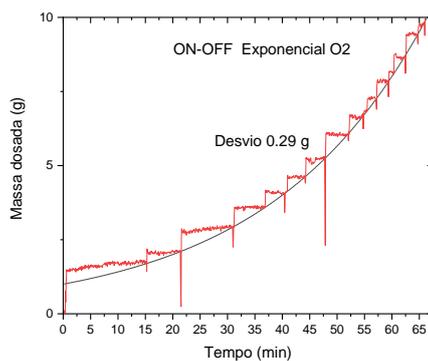
a)



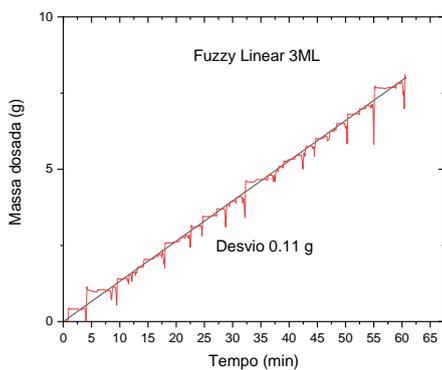
b)



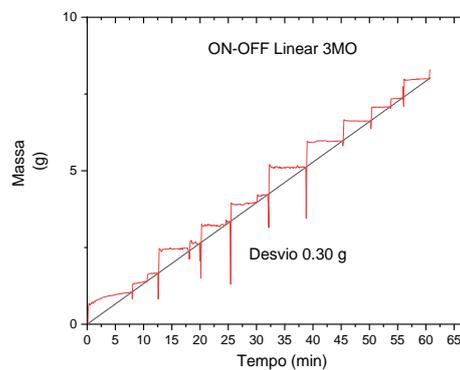
c)



d)



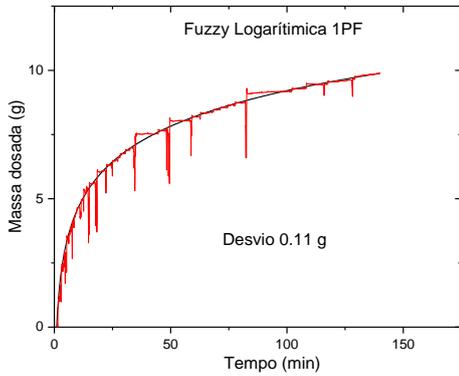
e)



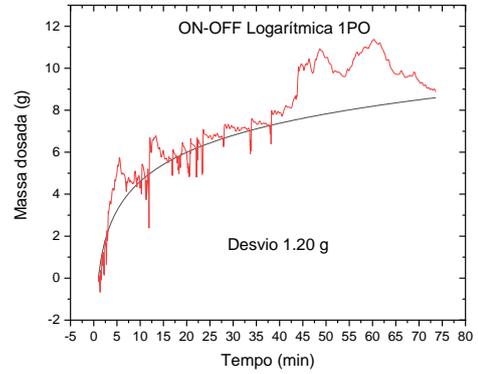
f)

Fonte: Autor

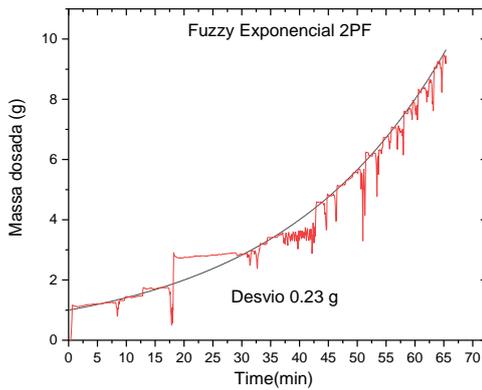
Figura 24 - Perfis alimentam o papel de filtro: a) Perfil logarítmico utilizando o controlo Fuzzy. b) Perfil logarítmico utilizando o controlo ON-OFF. c) Perfil exponencial utilizando o controlo Fuzzy. d) Perfil exponencial utilizando o controlo ON-OFF. e) Perfil linear utilizando o controlo Fuzzy. f) Perfil linear utilizando o controlo Fuzzy.



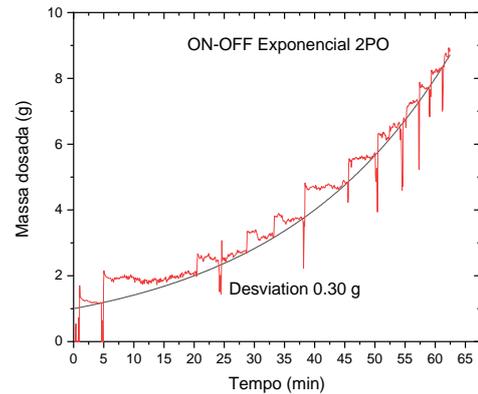
a)



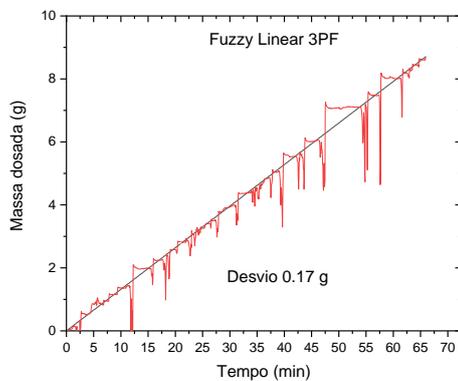
b)



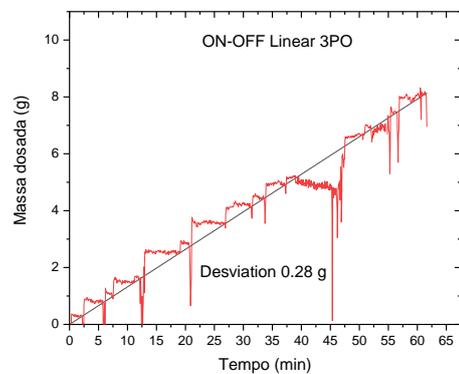
c)



d)



e)



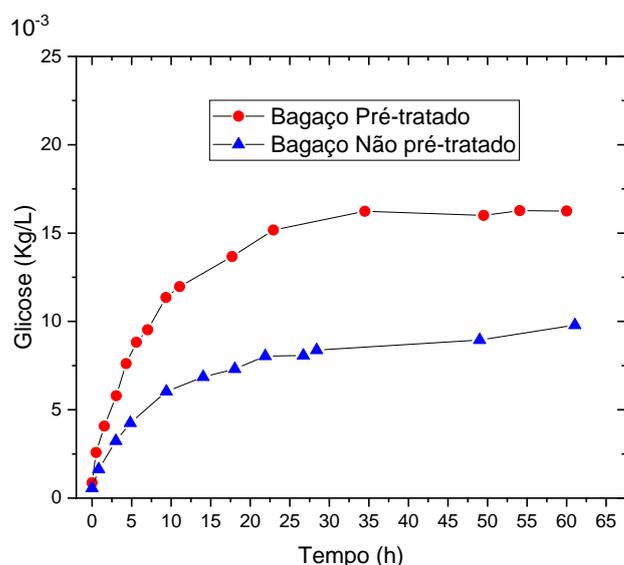
f)

Fonte: Autor

#### 4.5. PRIMEIRA ESTRATÉGIA DE ALIMENTAÇÃO.

Após a determinação do valor da atividade enzimática em papel filtro “FPU” detalhada no tópico 3.1, foram feitos ensaios em bateladas simples, tendo como substrato o bagaço de malte com e sem pré-tratamento. O pré-tratamento hidrotérmico executado pela Embrapa, permite que a enzima acesse um número maior de sítios de reação na medida em que, neste trabalho, veio a proporcionar uma conversão 48% maior de celulose em glicose, que pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Representada pelos triângulos em azul, a batelada simples do bagaço sem pré-tratamento e em vermelho a batelada do bagaço de malte, ambos experimentos executados em triplicata.



Fonte: Autor

Os dados do ensaio da batelada simples adequaram-se ao modelo de Michaelis-Menten pseudo-homogêneo com inibição pelo substrato, representado pela Equação 42. De forma que possibilitou assim, determinar os valores dos parâmetros:  $k_m$ , medida da estabilidade do complexo enzima-substrato;  $k_i$ , constante de dissociação. Partiu-se dos parâmetros ajustados por Montano et. al. (2013)  $k_e = 0,112 \text{ g.L}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ;  $k_m = 15,0 \text{ g.L}^{-1}$  e  $k_i = 4,5 \text{ g.L}^{-1}$  e foram executados ajustes manuais finos de modo que os dados do ensaio se ajustasse ao modelo, por mais que Montano et al. (2013) desenvolveu os parâmetros para o bagaço de cana e não diretamente para

o bagaço malte, obteve-se um ajuste adequado para o último conforme expresso na Figura 26.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k.e.S}{k_m.(1 + \frac{P}{k_i}) + S} \quad (42)$$

O conjunto de equações utilizadas nas simulações para adequar os dados obtidos da batelada ao modelo, foram as seguintes:

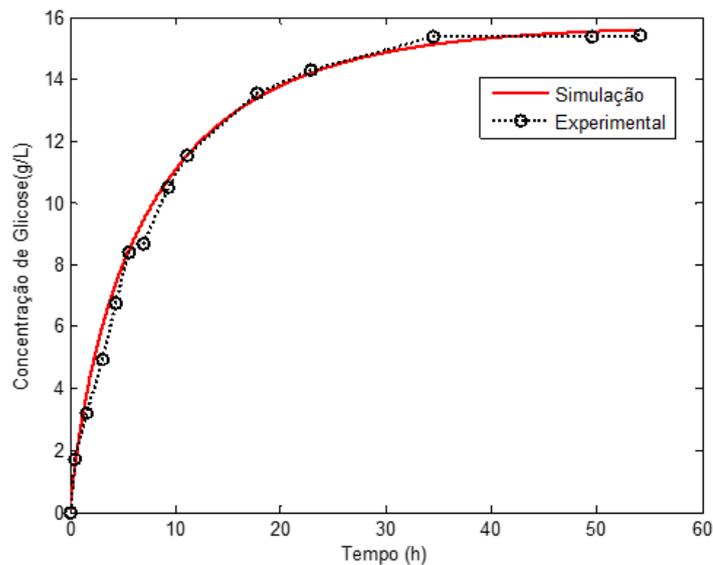
$$\frac{dS}{dt} = -r \quad (49)$$

$$\frac{dP}{dt} = r \quad (50)$$

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (51)$$

$$r = \frac{k.e.S}{k_m.(1 + \frac{P}{k_i}) + S} \quad (52)$$

Figura 26 - Hidrólise enzimática do bagaço de malte em batelada simples (dados simulados e experimentais). Parâmetros cinéticos do modelo de Michaelis-Menten com inibição:  $k.e = 0,1008 \text{ g.L}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ,  $k_m=13,0\text{g.L}^{-1}$  e  $k_i = 3,1 \text{ g.L}^{-1}$ . As condições de operação são  $50^\circ\text{C}$ , pH 4,8 concentração inicial de enzima  $e(0) = 16,8 \text{ g.L}^{-1} \equiv 285 \text{ FPU.L}_{\text{solução}}^{-1}$  e concentração inicial de glicose potencial de  $15,6 \text{ g}_{\text{glicose\_potencial.L}_{\text{solução}}^{-1}}$



Fonte: Autor

Os parâmetros obtidos por meio do ensaio da batelada simples, possibilitaram o desenvolvimento de dois perfis de alimentação: um para o substrato e outro para enzima. No escopo geral os objetivos dos dois perfis são: reduzir o consumo de enzima, principal empecilho econômico do etanol de segunda e evitar a aglutinação de substrato, resultado de elevados graus de concentração de biomassa dentro do reator. Os perfis de alimentação do substrato e da enzima foram elaborados com base na política proposta por Montano et al. (2013). Nessa política, o perfil de alimentação de bagaço de malte seco é calculado utilizando não só, o critério de manter constante o valor inicial da concentração de substrato dentro do reator, mas também, é escolhida uma porcentagem da velocidade de reação inicial com o intuito de manter a velocidade do processo num valor acima ao escolhido. Para esse propósito, a enzima é alimentada em forma de pulsos em tempos definidos na simulação do processo. O critério para a escolha da porcentagem é aquele que minimize o gasto de enzima e consiga elevadas taxas de produção de glicose ao longo do experimento.

Para o equacionamento dinâmico do reator em batelada alimentada, e determinação das taxas de alimentação foram usadas as equações.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{F_{a\text{lim}} \cdot S_{a\text{lim}}}{V} - r - \frac{F_{a\text{lim}} \cdot S}{V} \quad (53)$$

$$\frac{dP}{dt} = r - \frac{F_{a\text{lim}} \cdot P}{V} \quad (54)$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{a\text{lim}} \quad (55)$$

$$r = \frac{k \cdot e \cdot S}{km \left(1 + \frac{P}{ki}\right) + S} \quad (56)$$

A Figura 28 corresponde às simulações do comportamentos da taxa de reação em função do tempo, para as seis propostas de limite inferior de taxa, que variam de 35 a 85% da inicial. Para colocar em prática a estratégia traçada, foram introduzidos pulsos de enzima nos momentos em que a taxa chegara a valores inferiores aos pré-estabelecidos, adotou-se como critério de parada, a capacidade máxima do reator. Na Figura 28 pode-se verificar que quanto maior a taxa limite mais enzima é necessária para limita-la. Foram gastos 275 FPU para manter a taxa em 85 % da inicial e 123 para manter a 35%. A conversão de glicose para cada taxa é detalhada na Figura 29 em todas as seis simulações a conversão final foi a mesma, se diferenciando pelo tempo necessário para atingir a concentração final de glicose.

Em razão do alto custo da enzima é preferível que se demore um tempo maior para atingir a conversão máxima, consumindo menos enzima que converter rapidamente a biomassa gastando muita enzima. Na busca em reduzir o consumo de enzima, optou-se por realizar os ensaios experimentais mantendo o limite da taxa em 35 % da inicial.

Figura 27 - Simulação da variação da taxa de reação em função do tempo, para diferentes valores mínimos

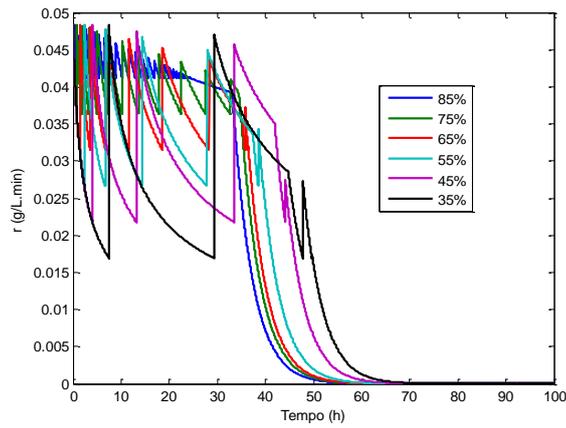


Figura 28 - Simulação quantidade de FPU consumida, para diferentes valores de taxa de reação.

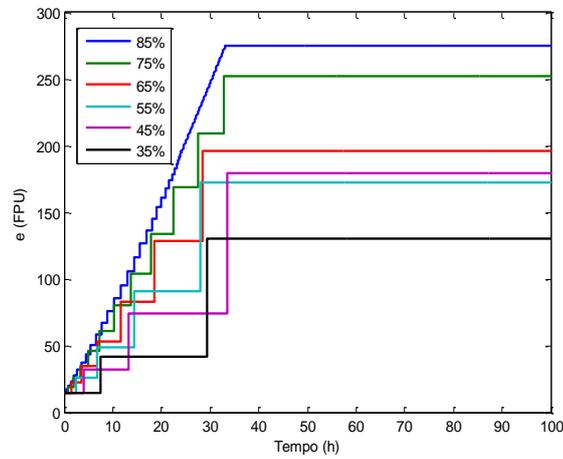
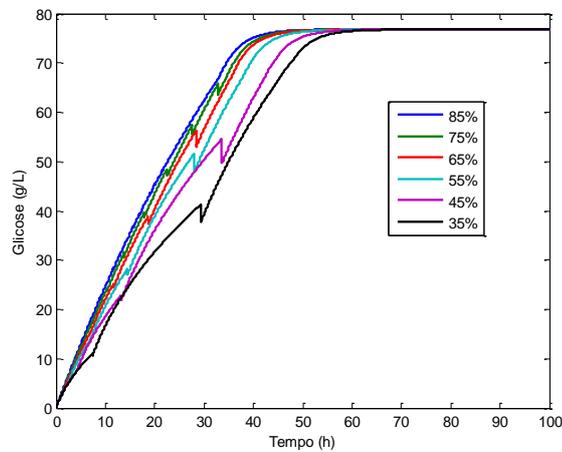


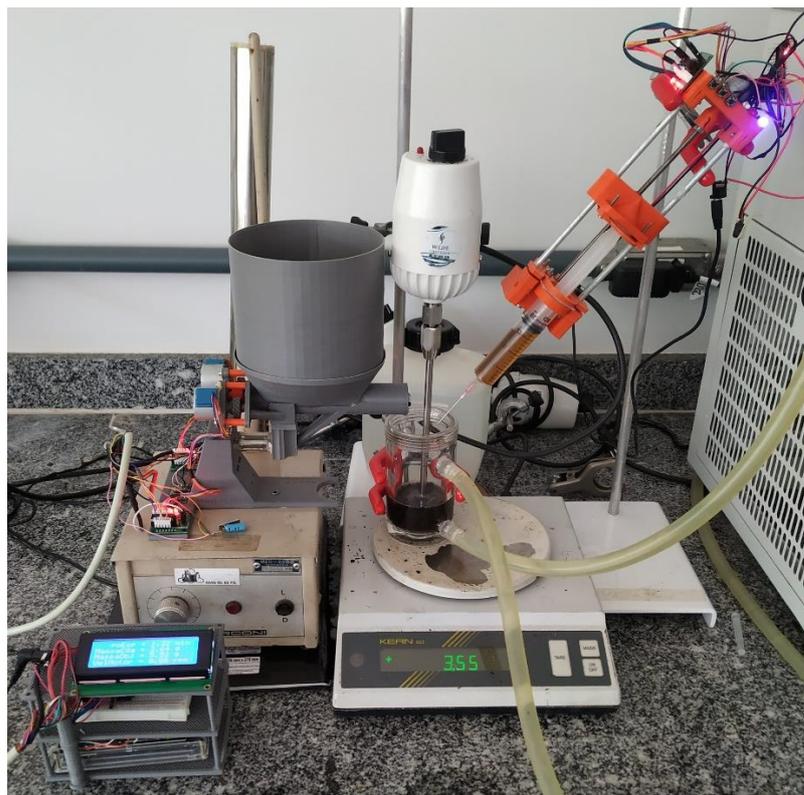
Figura 29 - Simulação dos valores de concentração glicose em função do tempo para diferentes limites de taxa de reação.



#### 4.6. ENSAIO BATELADA ALIMENTADA: PRIMEIRA ESTRATÉGIA

A execução - pelos dispositivos aqui desenvolvidos - dos perfis de alimentação, permitiu operar o reator na configuração de batelada alimentada, resultando na concentração final de glicose de 76,7 mg/mL o que é 4,6 vezes maior que a obtida em batelada simples. Na Figura 30 é possível observar a execução da batelada alimentada, simultaneamente com os dosadores de sólido e líquido em execução. O dispositivo de alimentação de substrato sólido a cada quatro segundos atuou sobre o reator, permitindo assim, uma alimentação contínua durante 150 horas, de mg em mg para o bagaço de malte, - algo que seria impraticável caso fosse realizado manualmente. Portanto pode-se destacar neste trabalho, a forma automatizada com que o substrato e a enzima foram alimentados. Porquanto, na literatura, não foram encontrados relatos de estudos de hidrólise enzimática com vista a sacarificação de material lignocelulósicos cuja a alimentação seja feita de forma automatizada. A alimentação automatizada de sólido, pode ser de difícil execução em razão da condição geralmente, heterógena do substrato e da compactação do sólido inerente dos sistemas de transporte de sólido. Não obstante, o dispositivo desenvolvido apresentou bons resultados nos ensaios realizados; com desvio médio de massa entre a função objetivo e a massa medida no sensor de 0,08 g, acumulando-se no tempo um desvio de 0,86 % da massa total dosada.

Figura 30 – Fotografia do experimento em execução, ao centro está o reator operado na forma de batelada alimentada, a esquerda o dosador de sólido no centro o reator encamisado e a direitas o dosador de líquido,



Fonte: Autor

Na Figura 31 a linha pontilhada em azul representa o total de enzima acumulada com o tempo e pela linha contínua preta os pulsos de enzima em dados momentos. Na Figura 32 a curva em azul indica os valores de massa objetivados em cada instante pelas simulações, e os círculos os valores reais dosados pelo dispositivo, há uma adequação quase que perfeita entre os valores experimentais e simulados validando a eficácia do dispositivo. Dista-se duas etapas, em um primeiro momento a batelada alimentada que ocorre de zero até 43,13 horas, após 43,13 horas o ensaio segue-se como batelada simples, a alimentação é finalizada pois chega-se a carga máximo suportada pelo reator. Na Figura 33 é possível acompanhar os valores de conversão da concentração de glicose advindos da simulação e os valores experimentais, as comparações dos resultados permitem, considerar que existe uma boa adequação dos modelos aos dados experimentais obtidos durante a hidrólise em batelada alimentado do bagaço de malte.

Figura 31 - Enzima alimentada para limite inferior de taxa de 35 %.

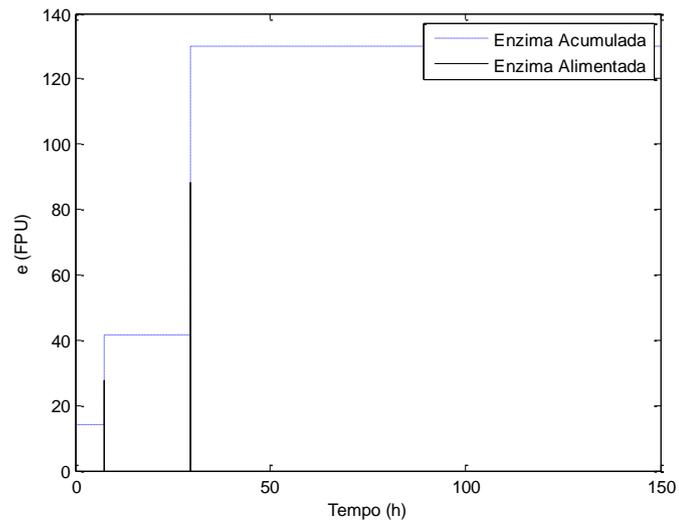


Figura 32 - Confrontamento entre os valores simulados e experimentais do substrato dosado no biorreator.

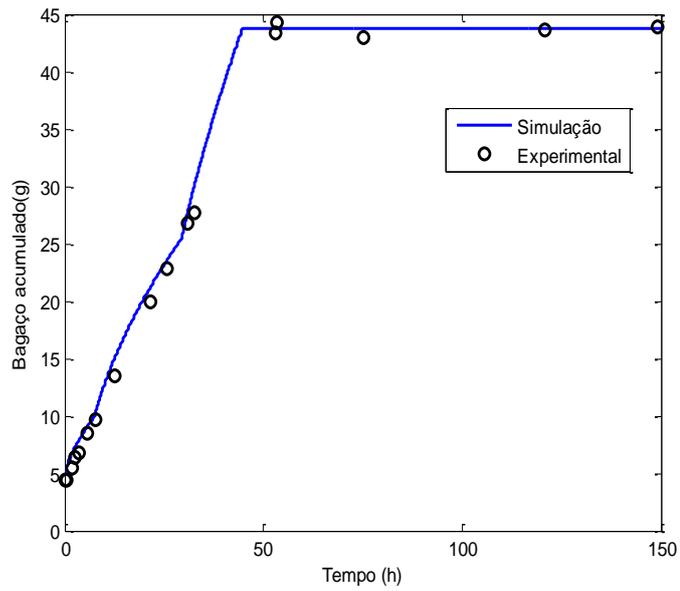
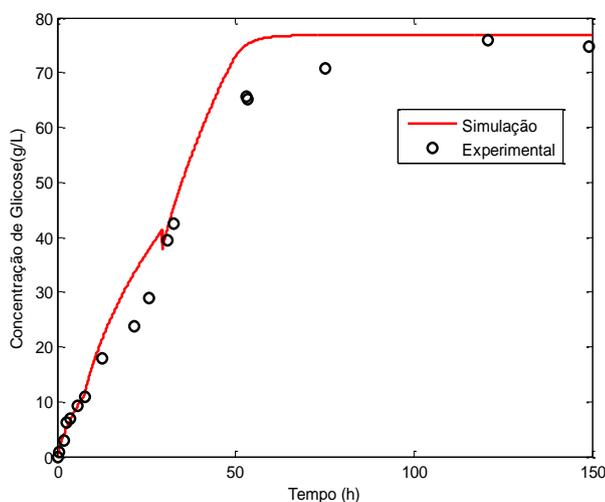


Figura 33 – Concentração de glicose simulada e experimental para valores de taxa de 35 %.



Não só a dosagem de substrato foi automatizada, mas também a de enzima. De tal forma o reator operou de forma totalmente independente de intervenção manual. O dispositivo de dosagem de enzima tem precisão teórica de 0,09  $\mu\text{l}$ , entretanto devido aos efeitos de reologia que ocorreram na ponta da agulha do dosador.

#### 4.7. SEGUNDA ESTRATÉGIA DE ALIMENTAÇÃO: CONTROLE ÓTIMO

A teoria do controle ótimo foi utilizada para resolver o problema da hidrólise enzimática da celulose por meio do Princípio do Mínimo ou Máximo de Pontryagin. Geralmente, esta abordagem pode resultar em um arco singular, em uma estratégia de controle tipo *bang-bang*, ou na combinação dos dois. O programa de simulação foi desenvolvido por Montano et al. (2013). O modelo dinâmico proposto para esta estratégia faz uso das mesmas equações 47; 48; 49; 50 aplicadas na primeira estratégia de alimentação. Nas simulações foram utilizados os valores dos parâmetros apresentados na Figura 26. A função objetivo escolhida para ser minimizado no tempo (final fixo) é:

$$J = -P(tf) - X(tf) \quad (57)$$

Onde  $P(tf)$  é a concentração de produto no tempo final e  $X(tf)$  é a conversão do substrato no tempo final.

A variável de controle foi definida como  $u = F/V$ . Sendo F a vazão volumétrica de entrada e V o volume de líquido do sistema (taxa de diluição). As restrições para a variável de controle são:  $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$  onde:  $u_{\min} = 0$  e  $u_{\max}$  é dado pela equação:

$$u_{\max} = \frac{F_{\max}}{V} \quad (58)$$

Confrontando a quantidade de enzimas consumidas nas duas estratégias de alimentação, o valor inicial utilizado nas simulações de controle ótimo foi igual à quantidade total utilizada na estratégia de o mínimo 35 % da velocidade de reação inicial, sendo este valor igual a 128, e que foi dosado de uma só vez no início do experimento.

Segundo Montano et al. (2013), o algoritmo do controle ótimo começa pela definição de valores iniciais das variáveis de estado, magnitudes dos parâmetros cinéticos, limites inferior e superior da variável de controle (u) e tempo final da simulação (problema com tempo final fixo, tf). A variável de controle escolhida foi a taxa de diluição ( $D = F/V$ ). A metodologia é a seguinte:

**Passo 1:** Adotar um valor para a variável de controle (chute inicial).

**Passo 2:** Resolver as equações do modelo matemático para frente no tempo até o tempo final. A resposta é armazenada em vetor para ser posteriormente utilizado na integração das equações de co-estado.

**Passo 3:** Calcular o valor da função objetivo para a primeira iteração  $J_k$  (Equação 38).

**Passo 4:** Calcular o valor das variáveis adjuntas no tempo final utilizando a condição de transversalidade para o tempo final fixo ( $\delta t_f = 0$ ) e ponto final livre (42). Estas variáveis são as condições iniciais de integração das equações de co-estado.

**Passo 5:** Resolver as equações dinâmicas de co-estado do tempo final até o tempo inicial (Equação de Euler-Lagrange 40). O perfil das variáveis adjuntas em relação ao tempo obtido ( $\lambda(t)$ ) é utilizado para calcular o Hamiltoniano (Equação 39) e o vetor da variável de controle ( $u(t)$ ).

**Passo 6:** Utilizando o vetor  $u(t)$  calculado no passo 5, repetir o passo 2.

**Passo 7:** Calcular o valor da função objetivo  $J_{k+1}$ . Verificar a convergência:

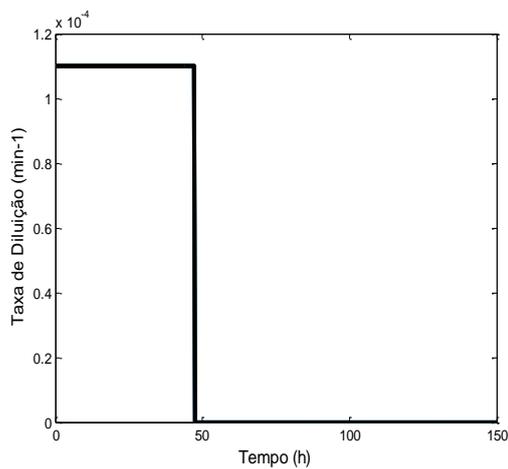
$$u_{max} = \frac{F_{max}}{V} \quad (59)$$

$$|J_k - J_{k+1}| \leq \textit{tolerância}$$

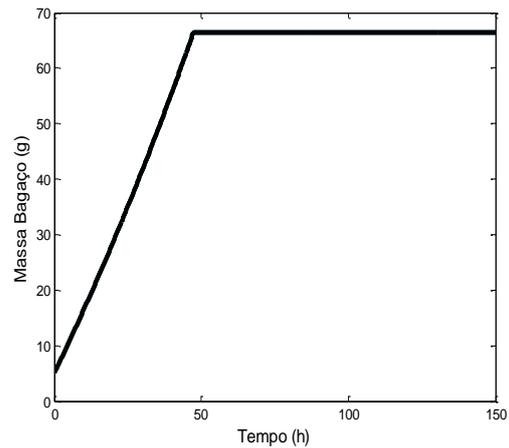
**Passo 8:** Repetir os Passos 4-7 até a convergência ser alcançada no Passo 7.

A Figura 28 mostra as simulações da segunda estratégia de alimentação, implementando a teoria do controle ótimo.

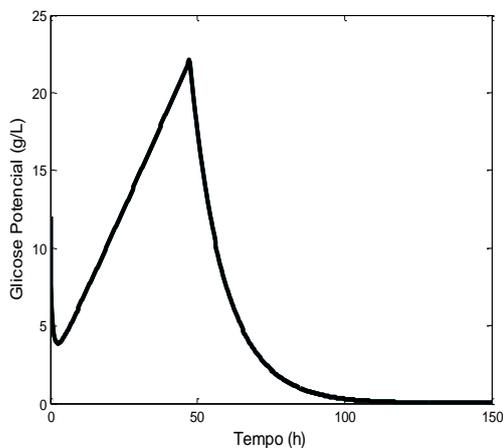
Figura 34, a) pode se observar que a solução do problema do controle ótimo é do tipo bang-bang, onde a variável de controle vai do valor máximo ao mínimo, (b) Perfil de alimentação de bagaço pré-tratado, (c) Concentração de substrato, (d) Concentração de produto.



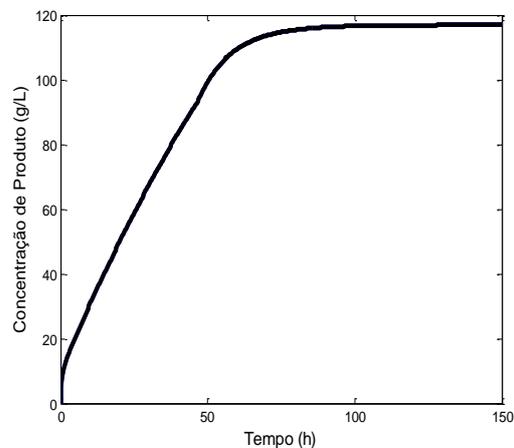
a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados corroboram que o uso de controladores *fuzzy* baseados em regras detêm uma grande vantagem prática, podendo ser aplicados a nível industrial em um grande número de processos, além disso são de fácil compressão pelo operador, na medida em que são baseados no senso comum, e o

efeito ou resultado de cada regra pode ser facilmente interpretado. A nível operacional o controlador *fuzzy* resultou ser robusto e confiável, apresentando melhores resultados e de forma rápida quando comparado com o controle On-Off, isto se deve ao fato que a resposta do alimentador *fuzzy* tem a capacidade de ponderar proporcionalmente a velocidade de rotação em função do desvio da vazão mássica. O dispositivo dosador de sólido ensejou executar bateladas alimentadas de forma automatizada para quais quer perfis de alimentação, de modo a tornar possível aplicação de perfis que seriam impraticáveis de executar-se manualmente. As simulações permitiram testar estratégias para reduzir o consumo de enzima e planejar a forma como conduzir a batelada alimentada, permitindo desenvolver as curvas de alimentação tanto de enzima como do substrato. Ao confrontar para estratégia os resultados da simulação e do ensaio experimental é possível observar que houve um leve desvio entre eles, o que pode ser atribuído a lignina presente no bagaço, na medida em que essa adsorve a enzima, reduzindo a taxa da reação e consequentemente elevando o tempo para que se obtenha a conversão máxima. Entretanto o desvio foi pouco significativo de modo que não atrapalham o êxito dos resultados. Após a finalização do ensaio da batelada alimentada foi verificado o consumo toda celulose presente no bagaço e neste constatou-se que 100% da celulose foi consumida. No ensaio da hidrólise enzimática, o dispositivo aplicou de maneira inexorável o perfil proposto, dosando de mg em mg o bagaço de malte durante 150 horas, com desvio mássico de acumulado no tempo menor que 1% da massa total dosada. Validando a capacidade de operar hidrólises enzimáticas. O dispositivo desenvolvido contribuirá em futuros projetos do grupo de pesquisa, facilitando a aplicação de perfis de alimentação em estudos que ainda estão por vir.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARELLI, J. Q. **Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda geração: simulação, integração energética e análise econômica.** [s.l.] Unicamp, 2013.
- ALCANTUD, J. C. R.; BIONDO, A. E.; GIARLOTTA, A. Fuzzy politics I: The genesis of parties. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 349, p. 71–98, 2018.
- ANDRADE, L. P. **Estudo da Influência da Matéria-Prima no Processo de Produção de Etanol a Partir de Bagaço de Cana.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- ANGARITA, J. D. et al. Kinetic modeling for enzymatic hydrolysis of pretreated sugarcane straw. **Biochemical Engineering Journal**, v. 104, p. 10–19, 2015.
- ATAÍDE, R. W. R. **Projeto e Implementação de um Nodo Sensor para Aquisição de Sinais de Extensômetros em Redes de Sensores sem Fio aplicado ao Monitoramento de Deformações em Estruturas.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2012.
- BAKSHI, U. A. B. A. V. **Electrical Measurements and Instrumentation.** [s.l.] Technical Publications Pune, 2009.
- BESTECH, S. E. T. E. **No Title.** Disponível em: <<https://www.bestech.com.au/bending-shear-beam/>>.
- BRITO, T. S. P. **DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY.** [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco Departamento de Energia Nuclear, 2015.
- CALVO, R. **Arquitetura híbrida inteligente para navegação autônoma de robôs.** [s.l.] ICMC-USP, 2007.
- CARVALHO, M. L. DE. **Estudo cinético da hidrólise enzimática de celulose de bagaço de cana-de-açúcar.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2011.
- CHANG, Y. H. et al. Comparison of batch and fed-batch fermentations using corncob hydrolysate for bioethanol production. **Fuel**, v. 97, p. 166–173, 2012.
- CORDEIRO, M. DE A. et al. **Hidrólise enzimática do caroço de açaí (Euterpe oleracea Mart.) para a produção de etanol.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2017.
- GOMES, J. **No Title.** Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/usina-e2g-raizen-capacidade-maxima-2019-20-190318>>. Acesso em: 15 ago. 2019.
- GOMIDE, F.; GUDWIN, R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994.
- HERRIOT, P.; PEMBERTON, C. Sundridge Park Management Centre, Bromley, Kent, UK: CONTRACTING CAREERS AND CAREER CONTRACTION. **International Journal of Selection and Assessment**, v. 3, n. 4, p. 245–247, 1995.
- HURWITZ, A. Ueber die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reellen Theilen besitzt. **Mathematische Annalen**, v. 46, n. 2, p. 273–284, 1895.
- KANDEL, A.; SCHNEIDER, M. **Fuzzy Sets and Their Applications to Artificial Intelligence.** [s.l.: s.n.]. v. 28

KELEB, E. I. et al. Twin screw granulation as a simple and efficient tool for continuous wet granulation. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 273, n. 1–2, p. 183–194, 2004.

LEE, K. T.; INGRAM, A.; ROWSON, N. A. Comparison of granule properties produced using Twin Screw Extruder and High Shear Mixer: A step towards understanding the mechanism of twin screw wet granulation. **Powder Technology**, v. 238, p. 91–98, 2013.

MATTIELLO, C. **Comparativo entre controlador pid e fuzzy no controle de atitude em um quadricóptero**. [s.l.] Universidade Tecnologia Federal do Paraná Câmpus Pato, 2015.

MCAINSH, R. No Title. In: **Design and Engineering of an Accurate Bicycle Power Meter**. [s.l: s.n.].

MOSIER, N. S. et al. Reaction kinetics, molecular action, and mechanisms of cellulolytic proteins. **Advances in biochemical engineering/biotechnology**, v. 65, p. 23–40, 1999.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Lehninger Principles of Biochemistry 6th ed.** 6ª ed. Porto Alegre: [s.n.].

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil ©, 2010.

PHU, N. D.; HUNG, N. N. Minimum stability control problem and time-optimal control problem for fuzzy linear control systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 1, p. 1–24, 2018.

PRADHAN, S. U. et al. Tailored granule properties using 3D printed screw geometries in twin screw granulation. **Powder Technology**, 2018.

RABELO, S. C. **Avaliação E Otimização De Pré-Tratamentos E Hidrólise Enzimática Do Bagaço De Cana-De-Açúcar Para a Produção De Etanol De Segunda Geração**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2010.

RAMIREZ, W. . **Process Control and Identification**. [s.l: s.n.].

ROUTH, E. J. A Treatise on the Stability of a Given State of Motion: Particularly Steady Motion. **Macmillan**, 1877.

RUBIN, E. M. Genomics of cellulosic biofuels. **Nature**, v. 454, n. 7206, p. 841–845, 2008.

SANTOS, D. M. **Redução de Ruído em Sensores de Monitoramento usando Separação Cega de Fontes**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

SANTOS, F. A et al. Potencial da palha de cana-de-aucar para produção de etanol. **Quimica nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SENSOR, B. <https://www.bcmsensor.com>. Disponível em: <[https://www.bcmsensor.com/wp-content/uploads/2018/01/170329\\_Pic-for-Upgraded-Backing-Materials\\_TEC.png](https://www.bcmsensor.com/wp-content/uploads/2018/01/170329_Pic-for-Upgraded-Backing-Materials_TEC.png)>. Acesso em: 18 out. 2018.

SILVA, H. V. D. et al. Estudo Comparativo entre os Controladores Fuzzy e PID Aplicados ao Controle de um Pêndulo Invertido Utilizando Plataforma Lego Mindstorms NXT. **XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, 2013.

SOUSA, J. N. DE P. **Aplicação De Lógica Fuzzy Em Sistemas De Controle de Tráfego Metropolitano Em Rodovias Dotadas De Faixas Exclusivas Para Ônibus**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

SOUZA, O. N. Introdução à Teoria dos Conjuntos Fuzzy. p. 15, 2010.

SUAREZ, C. A. G. et al. Modeling the kinetics of complex systems: Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic substrates. **Applied Biochemistry and**

**Biotechnology**, v. 173, n. 5, p. 1083–1096, 2014.

TANSCHKEIT, R. SISTEMAS FUZZY. **IMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE(SBA'03)**, p. 35, 2003.

TERVASMÄKI, P. et al. A discretized model for enzymatic hydrolysis of cellulose in a fed-batch process. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 112–124, 2017.

WANG, R.; UNREAN, P.; FRANZÉN, C. J. Model-based optimization and scale-up of multi-feed simultaneous saccharification and co-fermentation of steam pre-treated lignocellulose enables high gravity ethanol production. **Biotechnology for Biofuels**, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2016.

WANG, S. et al. Numerical simulation of particle flow behavior in a screw conveyor using the discrete element method. **Particuology**, p. 1–12, 2018.

WENG, J. K. et al. Emerging strategies of lignin engineering and degradation for cellulosic biofuel production. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 19, n. 2, p. 166–172, 2008.

WOJTUSIK, M. et al. Study of the enzymatic activity inhibition on the saccharification of acid pretreated corn stover. **Biomass and Bioenergy**, v. 98, p. 1–7, 2017.

YANG, G.; JAAKKOLA, P. Wood chemistry and isolation of extractives from wood. **Literature study for BIOTULI project**, p. 47, 2011.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets\*. **Information and Control**, p. 383–353, 1964.

ZHANG, J. et al. Simultaneous saccharification and co-fermentation of paper sludge to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae* RWB222 - Part I: Kinetic modeling and parameters. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 104, n. 5, p. 920–931, 2009.

ZHANG, J. et al. Effect of the organizational difference of corn stalk on hemicellulose extraction and enzymatic hydrolysis. **Industrial Crops and Products**, v. 112, n. January, p. 698–704, 2018.

## APÊNDICE A SKETCH MASTER DOSADOR DE SÓLIDOS

```

#include <math.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <HX711.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define SlaveMotorControl 0x08

//Inicializa o display no endereço 0x27////////////////////
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);//
// Conexão////////////////////
//Nano SDA A4 SCL A5////////////////////
//Uno  A4  A5////////////////////
//Mega  20  21////////////////////
////////////////////////////////////

//Conexão Célula de Carga///
#define DOUT 3////////////////////
#define CLK 2////////////////////
////////////////////////////////////

//Parametros//
int pontos = 40;

```

```

float fator_calibracao = (625440/200); //para 200g
int velocidade = 0;

/////Funções /////

float FMObj(unsigned long tempoSeg);
float Fdesvio(float massaObj, float massaCg);
float massa();
void FuzzyInpD();
float AplicaFuzzy(float desvio);
void estabilizacao();
void envioVel(int velEnviada);
void calibracao();
void atualizacaoInfDL(float massaCgModu, float massaObj, float velRpm, float
minutosc);

//Configurando Hx711//
HX711 scale(DOUT, CLK);
// Instacionando um objeto da biblioteca//
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  lcd.begin(20,4);
  scale.set_gain(128);
  scale.set_scale(fator_calibracao);
  estabilizacao();
  FuzzyInpD();
  //Comando para aquisição de dados excel-arduino//
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("Hora,minutosc,velRpm,massaObj,massaCgModu");

```

```

}

void loop() {

//////////Tempo de execução//////////
  unsigned long tempoSeg = millis()/1000;//
  float minutosc = tempoSeg/60.f; //
  //////////////////////////////////////

  calibracao();
  float massaObj = FMObj(tempoSeg);
  float massaCg = massa();
  float massaCgModu = massaCg*(-1);
  float desvio = Fdesvio(massaCg,massaObj);
  velocidade = AplicaFuzzy(desvio);
  envioVel(velocidade);
  float velRpm = velocidade*0.0351;
  atualizacaoInfDL(massaCgModu,massaObj,velRpm,minutosc);

}

//*****Fim da função loop*****//

float FMObj(unsigned long tempoSeg){
  float massaObj = 1.6666*tempoSeg/60;
  return massaObj;
}

float massa(){
  float weight = (scale.get_units(pontos));
  return weight;
}

```

```
float Fdesvio(float massaObj, float massaCg){
    float desvio = (massaCg*(-1) - massaObj)*1000;
    return desvio;
}
```

```
void FuzzyInpD(){
    //Criando o FuzzyInput desvio
    FuzzyInput* desvio = new FuzzyInput(1); // Parametro para ID

    // Criando os FuzzySet que compoem o FuzzyInput desvio
    FuzzySet* longe = new FuzzySet(-1000,-1000, -600, -400);
    desvio->addFuzzySet(longe); // Adiciona FuzzySet longe ao desvio
    FuzzySet* proximo = new FuzzySet(-450, -250, -250, -1);
    desvio->addFuzzySet(proximo); // Adiciona FuzzySet proximo ao desvio
    FuzzySet* passou = new FuzzySet(1,50000,50000,50000);
    desvio->addFuzzySet(passou); // Adiciona FuzzySet passou ao desvio

    fuzzy->addFuzzyInput(desvio); //Adicionando FuzzyInput no Objeto

    // Criando o FuzzyOutput velocidade
    FuzzyOutput* velocidade = new FuzzyOutput(1); // para

    // Criando os FuzzySet da velocidade
    FuzzySet* parado = new FuzzySet(0,0,0,0);
    velocidade->addFuzzySet(parado); // Adiciona FuzzySet parado a velocidade
    FuzzySet* acelerando = new FuzzySet(1,120,130,160);
    velocidade->addFuzzySet(acelerando); // Adiciona FuzzySet acelerando a
    velocidade

    FuzzySet* maximo = new FuzzySet(150,307,307,307);
    velocidade->addFuzzySet(maximo); // Adiciona FuzzySet maximo a velocidade
}
```

```

fuzzy->addFuzzyOutput(velocidade); //Adiciona FuzzyOutput ao objeto

//Ditando as regras Fuzzy
//Regra 001
//FuzzyRule "Se desvio = longe, então velocidade máximo
FuzzyRuleAntecedent* ifDesvioLonge = new FuzzyRuleAntecedent();
ifDesvioLonge->joinSingle(longe); //Adicionando FuzzySet correspondente ao
objeto
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeMaximo = new FuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadeMaximo->addOutput(maximo); //Adicionando FuzzySet
correspondente ao objeto

//Instanciando um objeto FuzzyRule
FuzzyRule* fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1, ifDesvioLonge,
thenVelocidadeMaximo); // Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01); // Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy

//Regra 002
//FuzzyRule "Se desvio = proximo, então velocidade acelerando
FuzzyRuleAntecedent* ifDesvioProximo = new FuzzyRuleAntecedent();
ifDesvioProximo->joinSingle(proximo); //Adicionando FuzzySet correspondente ao
objeto
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeAcelerando = new FuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadeAcelerando->addOutput(acelerando);

//Instanciando um objeto FuzzyRule
FuzzyRule* fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2, ifDesvioProximo,
thenVelocidadeAcelerando);
// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy

```

```

fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy

//Regra 003
//FuzzyRule "Se desvio = passou, então velocidade parado
FuzzyRuleAntecedent* ifDesvioPassou = new FuzzyRuleAntecedent();
ifDesvioPassou->joinSingle(passou); //Adicionando FuzzySet correspondente ao
objeto
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeParado = new FuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadeParado->addOutput(parado);

//Instanciando um objeto FuzzyRule
FuzzyRule* fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3, ifDesvioPassou,
thenVelocidadeParado);
// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
}

float AplicaFuzzy(float desvio){
//Informar o valor das entrdas, passando seu ID e valor
fuzzy->setInput(1, desvio);
//Executa a fuzzyficação
fuzzy->fuzzify();
//Aplica as regras e desfuzzyfica
float output = fuzzy->defuzzify(1);
return output;
}

void estabilizacao(){

lcd.setBacklight(ALTO);
lcd.setCursor(0,0);

```

```

lcd.print("*****");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("*");
lcd.print("  Estabilizando");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("*");
lcd.print("  Aguarde!");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("*****");
lcd.setCursor(19,1);
lcd.print("*");
lcd.setCursor(19,2);
lcd.print("*");

Serial.println ("Estabilização em andamento aguarde!");
for(int i = 0; i < 7; i++){
  Serial.print(".");
  delay(1000);
}

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("*****");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("*");
lcd.print("  Estabilizacao");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("*");
lcd.print("  Completa!");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("*****");
lcd.setCursor(19,2);
lcd.print("*");

```

```

lcd.setCursor(19,1);
lcd.print("*");

Serial.println(".");
Serial.println("Estabilizacao Completa!");
delay(500);

Serial.println("Inciando as medidas!");
Serial.println(" ");

scale.tare(); //reset the scale to 0

}

void calibracao(){
  if(Serial.available()){
    char z = Serial.read();

    if(z == '8') pontos = 100;
    if(z == '7') pontos = 10;
    if(z == '6') fator_calibracao +=2;
    if(z == '5') fator_calibracao -=2;
    if(z == '4') fator_calibracao +=1;
    if(z == '3') fator_calibracao -=1;
    if(z == '2') fator_calibracao +=0.5;
    if(z == '1') fator_calibracao -=0.5;
    if(z == 'T') scale.tare();
  }
}

void envioVel(int velEnviada){
  Wire.beginTransmission(SlaveMotorControl); // transmit to device #9
  Wire.write(velEnviada); // sends x
}

```

```

Wire.endTransmission(); // stop transmitting
}

void atualizacaolnfDL(float massaCgModu, float massaObj, float velRpm, float
minutosc ){
  /*
  //Monitor IDE arduino/////
  Serial.print("Massa");
  Serial.print(massaCgModu);
  Serial.print("\t\tmassa_objetivo:\t");
  Serial.print(massaObj);
  Serial.print("\t\tVelocidade do Motor:\t");
  Serial.println(velRpm);
  */
  //Lcd SistemaAlimentação/////
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("TempoEsp = ");
  lcd.print(minutosc,2);
  lcd.print(" min ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("MassaCga = ");
  lcd.print(massaCgModu,2);
  lcd.print(" g ");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("MassaObj = ");
  lcd.print(massaObj);
  lcd.print(" g ");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("VelMotor = ");
  lcd.print(velRpm);
  lcd.print(" rpm ");

```

```

Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print(minutosc);
Serial.print(",");
Serial.print(velRpm);
Serial.print(",");
Serial.print(massaObj);
Serial.print(",");
Serial.println(massaCgModu);
}

```

#### APÊNDICE B SKETCH SLAVE DOSADOR DE SÓLIDOS

```

#include <Wire.h>
#define myAdress 0x08
#define SLA 4
#define SDA 5

//Para no NANO//
// SCL e o Conector A4 //
// SDA e o Conector A5 //

const byte INPUT_1 = 8;
const byte INPUT_2 = 9;
const byte INPUT_3 = 10;
const byte INPUT_4 = 11;

int passo = 0;
int x = 0;
unsigned long interpasso = 3;
unsigned long antmillis =0;

// Para horário uso 1 para antihorario use 0. //

```

```
int sentido = 0;
```

```
void receiveEvent(int bytes);
```

```
void sentidorotacao(int rpm);
```

```
void setup() {
```

```
    pinMode(INPUT_1, OUTPUT);
```

```
    pinMode(INPUT_2, OUTPUT);
```

```
    pinMode(INPUT_3, OUTPUT);
```

```
    pinMode(INPUT_4, OUTPUT);
```

```
    //Serial.begin(9600);
```

```
    //determina o endereço do slave
```

```
    Wire.begin(myAdress);
```

```
    //chama a função apenas se houver um novo envio de dos dados.
```

```
    Wire.onReceive(receiveEvent);
```

```
}
```

```
// função que é executada apenas quando e detectada um novo envio de Bytes.
```

```
void receiveEvent(int bytes){
```

```
    if(Wire.available()){
```

```
        x = Wire.read();
```

```
    }
```

```
    //Serial.println(x);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    float rpm = x/28.2485;
```

```
    sentidorotacao(rpm);
```

```
}
```

```
void sentidorotacao(int rpm){

float interpasso = (20*1.46484375/rpm);
if(millis() - antmillis >= interpasso){
    antmillis = millis();

    if(sentido == 1){
        passo = passo + 1;
        if(passo > 3){passo = 0;}
    }
    else{
        passo = passo - 1;
        if(passo < 0){passo = 3;}
    }

switch (passo) {
//PASSO 1
case 0:
    digitalWrite(INPUT_1, ALTO);
    digitalWrite(INPUT_2, ALTO);
    digitalWrite(INPUT_3, BAIXO );
    digitalWrite(INPUT_4, BAIXO );
break;
///PASSO 2
case 1:
    digitalWrite(INPUT_1, BAIXO );
    digitalWrite(INPUT_2, ALTO);
    digitalWrite(INPUT_3, ALTO);
    digitalWrite(INPUT_4, BAIXO );
break;
//PASSO 3
```

```

case 2:
  digitalWrite(INPUT_1, BAIXO );
  digitalWrite(INPUT_2, BAIXO );
  digitalWrite(INPUT_3, ALTO);
  digitalWrite(INPUT_4, ALTO);
  break;
//PASSO 4
case 3:
  digitalWrite(INPUT_1, ALTO);
  digitalWrite(INPUT_2, BAIXO );
  digitalWrite(INPUT_3, BAIXO );
  digitalWrite(INPUT_4, ALTO);
  break;
}
}
}

```

#### APÊNDICE C SKETCH DOSADOR DE ENZIMAS

```

////////////////////////////////////
//                               //
// Resolução 0.0824 ul/passo      //
// Vazão Máxima 1236 ul/min       //
// Total de passos para 20000 ul --> 242699 //
// Delay por passo 4 milisegundos //
//                               //
////////////////////////////////////

```

```

int pinVermelho = 13; //azul
int pinAmarelo = 6; //vermelho
int pinVerde = 5; //Branco

```

```
int pinBotaoEn = 2;  
int pinBotaoEs = 3;  
int pinBotaoRd = 4;  
int pinBotaoFull = 7;  
int pinBotaoEmpty = 8;
```

```
float massaForm;  
float mlacumulado;  
float passoTempo;  
unsigned long passoReal;
```

```
unsigned long tempomin;  
float tempohora;
```

```
int passo = 0;  
int x = 0;  
unsigned long interpasso = 3;  
unsigned long antmillis =0;  
unsigned long contadorpasso;  
unsigned long antmillistt;
```

```
int faseSemaforo;
```

```
int estadoBotaoEn;  
int estadoAnteriorBotaoEn;
```

```
int estadoBotaoEs;  
int estadoAnteriorBotaoEs;
```

```
int estadoBotaoRd;
```

```
int estadoAnteriorBotaoRd;

int estadoBotaoFull;
int estadoAnteriorBotaoFull;

int estadoBotaoEmply;
int estadoAnteriorBotaoEmply;

const byte INPUT_1 = 12;
const byte INPUT_2 = 11;
const byte INPUT_3 = 10;
const byte INPUT_4 = 9;

int vaca;

//Funções

void sentidorotacao1();
void sentidorotacao2();
void funcaopisca();

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  pinMode(pinVerde, OUTPUT);
  pinMode(pinAmarelo, OUTPUT);
  pinMode(pinVermelho, OUTPUT);
  pinMode(pinBotaoEn, INPUT_PULLUP);
  pinMode(pinBotaoEs, INPUT_PULLUP);
```

```
pinMode(pinBotaoRd, INPUT_PULLUP);  
pinMode(pinBotaoFull, INPUT_PULLUP);  
pinMode(pinBotaoEmpty, INPUT_PULLUP);
```

```
faseSemaforo = 0;
```

```
estadoAnteriorBotaoEn = digitalRead(pinBotaoEn);  
estadoAnteriorBotaoEs = digitalRead(pinBotaoEs);  
estadoAnteriorBotaoRd = digitalRead(pinBotaoRd);  
estadoAnteriorBotaoFull = digitalRead(pinBotaoFull);  
estadoAnteriorBotaoEmpty = digitalRead(pinBotaoEmpty);
```

```
pinMode(INPUT_1, OUTPUT);  
pinMode(INPUT_2, OUTPUT);  
pinMode(INPUT_3, OUTPUT);  
pinMode(INPUT_4, OUTPUT);
```

```
Serial.begin(9600);  
}
```

```
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  
  unsigned long tempoSeg = millis()/1000;  
  
  tempohora = tempoSeg/3600.f;  
  
  if((tempohora >=0)&&(tempohora<=7.39)){  
    mlacumulado = 866;
```

```
passoTempo = mlacumulado/0.08241;  
}
```

```
if((tempohora >=7.39)&&(tempohora<=28.47)){  
mlacumulado = 1522;  
passoTempo = mlacumulado/0.08241;  
}
```

```
if((tempohora >=28.47)&&(tempohora<=200)){  
mlacumulado = 4791;  
passoTempo = mlacumulado/0.08241;  
}
```

```
estadoBotaoEn = digitalRead(pinBotaoEn);  
estadoBotaoEs = digitalRead(pinBotaoEs);  
estadoBotaoRd = digitalRead(pinBotaoRd);  
estadoBotaoFull = digitalRead(pinBotaoFull);  
estadoBotaoEmply = digitalRead(pinBotaoEmply);
```

```
if ((estadoBotaoEn == LOW) && (estadoAnteriorBotaoEn == HIGH)) {  
    faseSemaforo = 1;  
    contadorpasso = 0;  
}  
estadoAnteriorBotaoEn = estadoBotaoEn;
```

```
if ((estadoBotaoEs == LOW) && (estadoAnteriorBotaoEs == HIGH)) {  
    faseSemaforo = 2;  
    contadorpasso = 0;  
}
```

```
estadoAnteriorBotaoEs = estadoBotaoEs;
```

```
if ((estadoBotaoRd == LOW) && (estadoAnteriorBotaoRd == HIGH)) {
    faseSemaforo = 3;
    contadorpasso = 0;
}
estadoAnteriorBotaoRd = estadoBotaoRd;
```

```
if ((faseSemaforo == 1) && (estadoBotaoEmply == LOW)) {    //(BRANCO)
ESVAZIAR
```

```
    digitalWrite(pinVerde, HIGH);
    digitalWrite(pinAmarelo, LOW);
    digitalWrite(pinVermelho, LOW);
    sentidorotacao1();
}
```

```
if ((faseSemaforo == 1) && (estadoBotaoEmply == HIGH)) {
funcaopisca();
}
```

```
if ((faseSemaforo == 2) && (estadoBotaoFull == LOW)) { //(VERMELHO) ENCHER
    digitalWrite(pinVerde, LOW);
    digitalWrite(pinAmarelo, HIGH);
    digitalWrite(pinVermelho, LOW);
    sentidorotacao2();
}
```

```
if ((faseSemaforo == 2) && (estadoBotaoFull == HIGH)) {
funcaopisca();
```

```

}

if ((faseSemaforo == 3)&&(estadoBotaoEmply == LOW)) { // (AZUL) RODAR O
PROGRAMA
    digitalWrite(pinVerde, LOW);
    digitalWrite(pinAmarelo, LOW);
    digitalWrite(pinVermelho, HIGH);

    if(contadorpasso<=passoTempo){

        /*
        Serial.print(tempoSeg);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(tempohora);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(mlacumulado);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(passoTempo);
        Serial.print(" ");
        Serial.println(contadorpasso);
        */

        sentidorotacao1();
    }

}

if ((faseSemaforo == 3)&&(estadoBotaoEmply == HIGH)) {
    funcaopisca();
}
}

```

```
void sentidorotacao1(){

    if(millis() - antmillis >= 4){
        antmillis = millis();

        passo = passo + 1;
        contadorpasso++;
        if(passo > 3){
            passo = 0;
            contadorpasso++;

        }

        switch (passo) {
            //PASSO 1
            case 3:
                digitalWrite(INPUT_1, HIGH);
                digitalWrite(INPUT_2, HIGH);
                digitalWrite(INPUT_3, LOW);
                digitalWrite(INPUT_4, LOW);
                break;
            ///PASSO 2
            case 2:
                digitalWrite(INPUT_1, LOW);
                digitalWrite(INPUT_2, HIGH);
                digitalWrite(INPUT_3, HIGH);
                digitalWrite(INPUT_4, LOW);
                break;
```

```
//PASSO 3
case 1:
    digitalWrite(INPUT_1, LOW);
    digitalWrite(INPUT_2, LOW);
    digitalWrite(INPUT_3, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_4, HIGH);
break;
//PASSO 4
case 0:
    digitalWrite(INPUT_1, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_2, LOW);
    digitalWrite(INPUT_3, LOW);
    digitalWrite(INPUT_4, HIGH);
break;
}
}
}
void sentidorotacao2(){ //

if(millis() - antmillis >= 4){
    antmillis = millis();

// if(sentido == 1){
    passo = passo + 1;
    contadorpasso++;
    if(passo > 3){
        passo = 0;
        contadorpasso++;

    }
// }
// else{
```

```
//passo = passo - 1;
//if(passo < 0){passo = 3;}
// }

switch (passo) {
//PASSO 1
case 0:
    digitalWrite(INPUT_1, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_2, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_3, LOW);
    digitalWrite(INPUT_4, LOW);
    break;
//PASSO 2
case 1:
    digitalWrite(INPUT_1, LOW);
    digitalWrite(INPUT_2, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_3, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_4, LOW);
    break;
//PASSO 3
case 2:
    digitalWrite(INPUT_1, LOW);
    digitalWrite(INPUT_2, LOW);
    digitalWrite(INPUT_3, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_4, HIGH);
    break;
//PASSO 4
case 3:
    digitalWrite(INPUT_1, HIGH);
    digitalWrite(INPUT_2, LOW);
    digitalWrite(INPUT_3, LOW);
    digitalWrite(INPUT_4, HIGH);
```

```
    break;
}
}
}

void funcaopisca(){
    digitalWrite(INPUT_1, LOW);
    digitalWrite(INPUT_2, LOW);
    digitalWrite(INPUT_3, LOW);
    digitalWrite(INPUT_4, LOW);

    if(millis() - antmillistt > 250){

        digitalWrite(pinVerde, HIGH);
        digitalWrite(pinAmarelo, LOW);
        digitalWrite(pinVermelho, HIGH);
    }
    if(millis() - antmillistt <=250){

        digitalWrite(pinVerde, LOW);
        digitalWrite(pinAmarelo, HIGH);
        digitalWrite(pinVermelho, LOW);
    }

    if(millis()- antmillistt >= 500){
        antmillistt = millis();
    }
}
```