

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AUTOMATIZAÇÃO NO PROCESSO DE CONFECÇÃO DE DOCES
ARTESANAIS**

Marcelo Ide Pimentel

São Paulo
2017

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AUTOMATIZAÇÃO NO PROCESSO DE CONFECÇÃO DE DOCES
ARTESANAIS**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a obtenção do título
de Graduação em Engenharia Mecânica

Marcelo Ide Pimentel

Orientador: Marcelo Augusto Leal Alves

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2017

Catalogação-na-publicação

Pimentel, Marcelo Ide

Automatização no Processo de Confecção de Doces Artesanais / M. I.

Pimentel -- São Paulo, 2017.

42 p.

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

1. Desenvolvimento de produto 2. Modelagem 3. Controle I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo identificar um processo na área de confecção artesanal de doces que possa ser automatizado, provendo maior conforto ao operário e sendo economicamente viável.

A primeira etapa consistiu no estudo de viabilidade do projeto, sendo estudadas as necessidades a serem atendidas, os critérios a serem satisfeitos e, ao final, a seleção da melhor alternativa para o trabalho.

Após o estudo de viabilidade foi pesquisado quais materiais poderiam ser utilizados nas partes em contato com alimento, a modelagem para se obter os coeficientes convectivos, o tempo de resfriamento em comparação com o processo atual e a malha de controle. A malha de controle foi então simulada com um controlador PID sintonizado com o auxílio do software Matlab. Através do uso de controle discreto a dinâmica do sensor térmico foi obtida e os modelos térmicos foram comprovados com dados experimentais.

A última etapa consistiu na prototipagem do produto estudado. Foram pesquisados os melhores componentes a serem utilizados e alguns destes foram testados individualmente com o objetivo de sua integração para o projeto final. Por fim os resultados dos testes podem ser utilizados para melhoramentos futuros do produto mínimo viável.

ABSTRACT

The goal of this project is to identify a handmade process in chocolate confectionery and automate it in a viable way, providing more comfort to the worker.

At first the viability study of the project was done. It was analyzed the project needs as well as its criteria in order to select the best alternative among the possible solutions.

Afterwards it was researched which materials could be in contact with food, a model to obtain the convection heat transfer coefficient, the cooling time comparing to the current process and the control system. The PID control loop was tuned with Matlab and then simulated. The equation of the thermal sensor dynamics was obtained through discrete time control techniques and the thermal models were proven with experimental data.

The last stage of this project was prototyping of the desired product. The components to be used were studied in some of the tests with the objective of their integration for the final project. The results of these tests may then be used for future improvement of the minimum viable product.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades térmicas do chocolate.....	13
Tabela 2 – componentes utilizados.	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de chocolate em mil toneladas Fonte: ABICAB (2014). 1	
Figura 2 - sequência de temperagem do chocolate ao leite (Loders Croklaan apud Beckett, 2009)	3
Figura 3 - Princípio de operação (Fonte: Regloplas, 1998)	8
Figura 4 - Modelo Físico.....	9
Figura 5 – Exemplo de resfriamento (fonte: Incropera, 2008).....	10
Figura 6 - Influência do número de Biot em estado estacionário em uma parede plana com convecção na superfície (fonte: Incropera, 2008)	11
Figura 7 - Modelos calculados no EES (Fonte: EES)	12
Figura 8 - diagrama ilustrando cisalhamento (Beckett, 2009)	14
Figura 9 - ilustração de partículas em suspensão em: (a) repouso, (b) durante o fluxo fonte: (Beckett, 2009)	15
Figura 10- Exemplo de fluido newtoniano fonte: (Beckett, 2009)	15
Figura 11 - Exemplo de fluido não-newtoniano fonte: (Beckett, 2009)	16
Figura 12 - gráfico de viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para chocolate ao leite fonte: (Beckett, 2009).....	16
Figura 13 - Medidas do agitador (Fonte: Rushton et al, apud McCabe, 1993)	17
Figura 14 - Proporções típicas (Fonte: McCabe, 1993)	17
Figura 15- (a) Sistema térmico; (b) diagrama de blocos do sistema. Fonte: Ogata (1998).....	18
Figura 16 - (a) Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral-derivativo: (b) e (c) diagramas esboçando uma rampa unitária e o correspondente sinal de saída do controlador Fonte: (Ogata, 1998).....	20
Figura 17 - Diagrama de blocos	21
Figura 18 - Entrada degrau na função de transferência do aquecedor	21
Figura 19 - Entrada degrau controlada por PID da função de transferência Ga	22
Figura 20 - Curva experimental com entrada degrau.....	24

Figura 21 - Curva diferença da temperatura inicial com curva experimental e teórica estimada.....	25
Figura 22 - Curva experimental do aquecedor com sensor térmico.....	26
Figura 23 - Comparaçao modelo com sensor.....	27
Figura 24 - Controle PID na função de transferência GH.....	28
Figura 25 – Modelo de misturador.....	31
Figura 26 - Associação bomba e aquecedor.....	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	METODOLOGIA	2
3	ESTUDO DE VIABILIDADE.....	2
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	2
3.2	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS A SEREM SATISFEITOS	5
3.3	SELEÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA	6
4	MODELAGEM	7
4.1	MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO DO RECIPIENTE.....	9
4.2	CÁLCULOS DO MODELO DO RECIPIENTE	11
4.3	MODELO FLUIDO DO CHOCOLATE.....	13
5	PROJETO DE CONTROLE.....	18
5.1	ESTIMATIVAS INICIAIS DO CONTROLADOR	18
5.2	DINÂMICA DO SENSOR POR CONTROLE DISCRETO.....	22
5.3	DINÂMICA AQUECEDOR COM SENSOR	25
6	PROTOTIPAGEM	28
6.1	ESTUDO DOS COMPONENTES	29
6.1.1	<i>Sensor.....</i>	29
6.1.2	<i>Relé.....</i>	29
6.1.3	<i>Aquecedor e Disjuntor</i>	29
6.1.4	<i>Microcontrolador.....</i>	30
6.1.5	<i>Componentes utilizados</i>	30
6.2	TESTES EXPERIMENTAIS	30
7	CONCLUSÃO	32
8	DISCUSSÃO E PROPOSTAS FUTURAS	33
9	REFERÊNCIAS	35
10	APÊNDICE A	37
11	APÊNDICE B	38
12	APÊNDICE C	40

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um papel relevante na indústria do chocolate. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Cacau, Amendoins, Balas e Derivados (ABICAB), o Brasil é o terceiro maior mercado de chocolates do mundo, como pode ser visto na Figura 1, gera 33 mil empregos anuais e 66 mil empregos indiretos anuais e exporta este produto para 106 países (ABICAB, 2014).

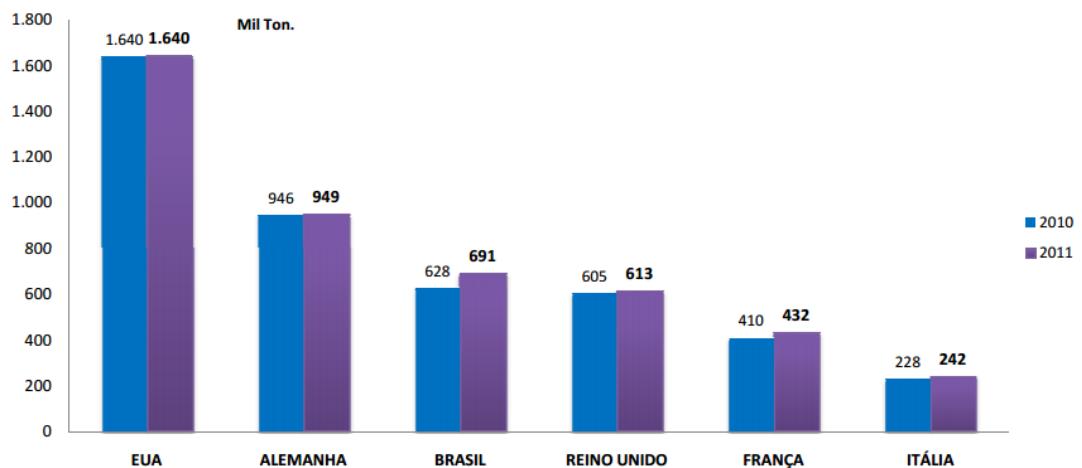


Figura 1 – Consumo de chocolate em mil toneladas Fonte: ABICAB (2014)

O Brasil possui um bom crescimento na produção e no consumo de produtos confeitados. Segundo a Chocolate, biscuits & confectionery of Europe (Caobisco), no setor de produção o Brasil obteve um crescimento de 13,9% de 2010 a 2011, e um crescimento de 104,8% quando comparado no período de 2006 a 2011, no setor de consumo os crescimentos foram de 10,0% e 70,8%, nos períodos de 2010 e 2011 e 2006 a 2011, respectivamente.

Dentre as empresas que faziam parte da ABICAB, cerca de 17% são micro e pequenas empresas. As micro e pequenas empresas no ano de 2014, foram responsáveis por cerca de 22,5% do PIB da indústria, aproximando-se das médias empresas com cerca de 24,5% de participação deste PIB (SEBRAE, 2014). Portanto é interessante o projeto de soluções para esse mercado de relevância considerável no mercado.

2 METODOLOGIA

O primeiro passo para o projeto foi a definição do problema onde foram estudados possíveis problemas a serem resolvidos. Nesta etapa foi escolhido o processo que envolvia maior trabalho manual e que era empregado mais tempo na microempresa. Após definido o problema os foram estipulados os critérios a serem satisfeitos comparando com o processo atual em que foi medida a produtividade do processo em quanto foi produzido em kg por hora. Foi feito um estudo de viabilidade através do custo por hora de um funcionário para comparar o quanto de valor a máquina deveria prover para o produtor. Por fim o problema foi modelado com parâmetros físicos de transferência de calor e definida as formas construtivas para a prototipagem.

3 ESTUDO DE VIABILIDADE

Como mencionado por Kaminski (2000) o estudo de viabilidade constitui a fase inicial de qualquer projeto. O detalhamento deve ser apenas suficiente para se verificar a viabilidade técnica e econômica da solução. Deve-se definir a necessidade técnica e quantitativamente da melhor forma possível. Após isso é necessário especificar as exigências decorrentes das necessidades, fixando-se suas características funcionais, operacionais e construtivas, determinando-se as especificações técnicas do produto a ser desenvolvido. A etapa seguinte é a elaboração de alternativas de solução que consiste na geração de concepções físicas que atendam às especificações de projeto.

3.1 Definição do problema

Dos processos artesanais, o preparo do chocolate ao leite para a temperatura de trabalho foi o processo em que houve mais queixas. Para o preparo de 2kg de chocolate é necessário mexer o produto de forma ininterrupta por cerca de 20 minutos, em que há queixa de desgaste e cansaço nesse processo. O processo de manufatura de raspas

de chocolate, um processo também cansativo, foi descartado, pois os produtos que utilizam as raspas de chocolate não possuem uma vazão de vendas tão grande, se comparado aos produtos que necessitam do derretimento do chocolate e seu preparo na temperatura de trabalho adequada.

O chocolate ao leite precisa ser resfriado até uma temperatura de trabalho específica pois caso esse processo não seja feito, há formação de manchas, deixando o chocolate com aspecto não agradável aos clientes. Essa propriedade está fortemente ligada aos comportamentos polimórficos e à cristalização das gorduras presentes no chocolate. Essa técnica de cristalização controlada é chamada *temperagem* e é necessária para induzir uma forma sólida mais estável da manteiga de cacau no produto final. Esse processo é descrito por Beckett (2009) e pode ser visualizado na Figura 2. O chocolate é descrito por Van Malssen et al (1999, apud Beckett, 2009) com 5 formas polimórficas na manteiga de cacau onde a forma β' é geralmente produzida se o chocolate não for devidamente temperado e a forma polimórfica β é a forma estável.

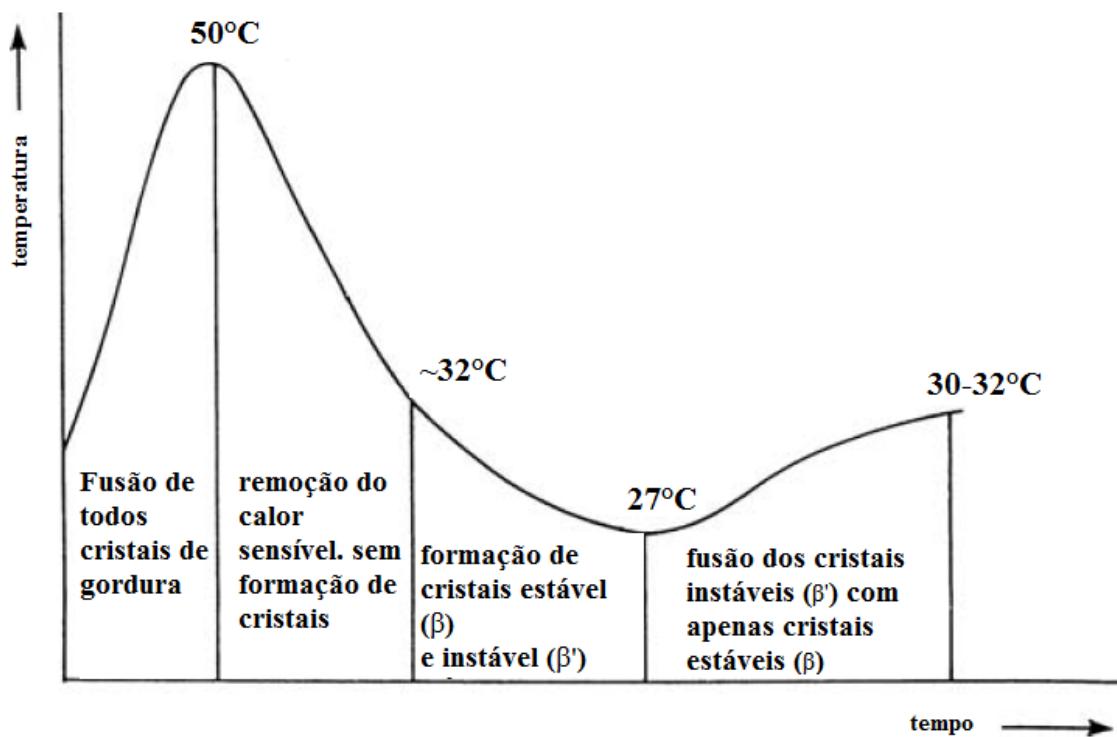


Figura 2 - sequência de temperagem do chocolate ao leite (Loders Croklaan apud Beckett, 2009)

A produção de doces varia muito com a sazonalidade do consumo. No caso da microempresa estudada a utilização do chocolate derretido nos produtos pode variar

de 5kg por semana, a até 30kg a 40kg por dia em períodos festivos de alto consumo como a páscoa.

O produto deve, portanto, trabalhar a uma temperatura que varia de 28°C a 48°C, com uma vazão de até 40 kg por dia, mantendo o chocolate em constante movimento para garantir uniformidade e bom aspecto visual para o cliente, possuindo como características desejáveis poder trabalhar com baixas vazões para períodos de menor consumo e o tempo de resfriamento de 48°C para 28°C de 2 kg de chocolate não exceder muito o processo manual, com tempo de 20 minutos.

O estudo de viabilidade econômica será feito através de uma comparação de aumento de produtividade que a solução proporcionaria ao invés de uma pesquisa de preço direta com o público alvo. Por se tratar de um público alvo não muito extenso, a amostragem seria insuficiente para se obter um preço confiável para o produto.

Através do site Piso Salarial (2016) foram obtidos os valores de piso salarial, R\$ 905,00, teto salarial, R\$ 2065,30, e salário médio, R\$ 1171,10 para um auxiliar de cozinha. Sabendo que o ano de 2016 teve 254 dias úteis, foi feito um cálculo para se obter o custo por hora de um auxiliar de cozinha como mostra na equação 1. O custo mensal foi calculado com o auxílio de uma planilha fornecida pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) em “Planilhas para a gestão do seu negócio” (SEBRAE, 2016) e com o imposto simples nacional adotado o custo mensal para um salário de R\$ 1171,30 foi de R\$ 1676,26, sem contar com horas extras. A carga horária diária adotada foi de 8 horas por dia.

$$C = \frac{12 \times M}{D \times H} \quad (1)$$

Onde C é o custo em reais por hora trabalhada, M é o custo mensal do trabalhador, D os dias úteis no ano e H a carga horária diária.

Do cálculo obteve-se um custo de aproximadamente R\$ 9,90 por hora trabalhada. Da relação de 10 minutos trabalhados por kilograma de chocolates, para o período de menor vendas 5 kg por semana obtém-se 0,83 hora equivalente, e para o período de dias festivos com variação de 30 a 40kg por dia, obtém-se 5 a 6,67 horas equivalentes ao trabalhador. Adotando que as horas equivalentes que a máquina substitui o trabalho manual do funcionário possuem o mesmo valor, a máquina em

períodos de menor consumo tem um custo de R\$ 8,22 semanal e em períodos festivos de R\$ 49,50 a R\$ 66,03 diário, onde as preparações para esses períodos festivos podem ter trabalho intenso de uma a duas semanas de sua véspera dependendo da demanda.

O projeto se mostra, a princípio, viável pois não foram contabilizados no valor gerado pela máquina o fato que o funcionário que estaria trabalhando no preparo do chocolate estaria liberado para trabalhar em outros produtos, aumentando a produtividade da microempresa, e a queixa de ser uma atividade cansativa de esforço repetitivo que pode ser prejudicial ao trabalhador.

3.2 Definição dos critérios a serem satisfeitos

Os critérios a serem satisfeitos foram divididos nas categorias de características funcionais, materiais e construtiva como critérios de projeto.

As características funcionais foram citadas na definição do problema, e são em resumo: operar entre 28°C e 48°C, trabalhar em uma vazão que varia entre 5 litros por semana a 40 litros por dia e não exceder muito mais que 10 minutos por quilograma de chocolate preparado. Devido a máquina proposta liberar o funcionário para exercer outras atividades, o tempo não é um critério crítico do projeto, porém é importante que não seja ignorado para não prejudicar sua viabilidade econômica.

A escolha dos materiais utilizados é também um fator de grande importância. Todo material destinado ao contato direto com alimentos e ou bebidas, deve atender ao disposto na legislação sanitária de materiais em contato com alimentos, uma vez que substâncias presentes nestes materiais podem migrar para os alimentos, o que pode representar risco à saúde humana. Dos materiais metálicos em contato com alimentos devem obedecer a Lei nº 9.832/99, que proíbe o uso industrial de embalagens metálicas soldadas com ligas de chumbo e estanho para acondicionamento de gêneros alimentícios, exceto para produtos secos ou desidratados (Anvisa, 2014). A utilização de aço carbono é permitida desde que toda sua superfície seja protegida com revestimentos poliméricos, em louças, vitrificados ou esmaltados. A lista de aços inox autorizados para equipamentos encontra-se na resolução RDC n.20/2007. Os monômeros que podem ser utilizados estão contidos na resolução RDC n. 56/12 na parte I, e além desses a lista de polímeros estão na parte II e V da mesma resolução.

Portanto a escolha dos materiais deve respeitar as resoluções citadas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa).

Os critérios de forma construtiva devem satisfazer critérios quantitativos quanto critérios qualitativos. Caso o projeto não seja desmontável, a máquina deverá ter uma largura menor que 0,7 metros, pois portas têm largura típica variando de 0,7 a 0,8 metros, para fácil transporte. Altura em torno de 1 metro, tamanho típico para eletrodomésticos de cozinha como fogões, por exemplo. Os critérios qualitativos a serem satisfeitos são fácil utilização, fácil limpeza e caso seja desmontável, fácil montagem e desmontagem para o usuário.

3.3 Seleção da melhor alternativa

Segundo D. T. Campbell apud Kaminski (2000) para o desenvolvimento de conhecimento humano é essencial que haja um processo de variação “às escuras” e “sobrevivência seletiva”. Desta forma uma das técnicas mais utilizadas atualmente para criação de ideias e soluções é o chamado “Brainstorming”, uma das possíveis traduções é “tempestade de ideias”, porém o termo original em inglês é o mais comumente empregado, que visa a proposição de ideias sem critérios prévios para não haver inibição ou limitantes para as soluções. O Passo seguinte a esse processo seria a “sobrevivência seletiva” que após o processo de *Brainstorming* são aplicados os critérios de projeto para a seleção da alternativa mais viável.

Como a evolução de um projeto não é linear, a abordagem citada por Kaminski (2000) é a espiral de projeto em que as etapas são detalhadas por área de estudo do projeto antes de se passar para a seguinte, e o processo é iterativo pois cada item depende do outro para que o sistema funcione como um todo. As ideias do *Brainstorming* seguiram uma proposta inicial a respeito da forma construtiva e do tamanho do recipiente.

As primeiras propostas de soluções envolviam grandes recipientes com controle de temperatura para atender às grandes demandas, porém a ideia foi descartada por não ser eficiente nos períodos de baixa demanda. Então foi proposta a segmentação interna desses grandes recipientes para o fluxo de líquido refrigerante fluir apenas até o nível onde o chocolate estivesse de acordo com a demanda. Essa

ideia necessitaria de muitos ajustes de fluxo, e ajustes internos necessitando várias montagens e desmontagens de acordo com a demanda, o que não seria algo muito bom para o usuário. A ideia de modularização foi proposta, fazer vários recipientes que pudessem ser conectados ao sistema de aquecimento e resfriamento com um tamanho médio. Devido à necessidade de o material ser aço inox na parte que lida diretamente com transferência de calor, graças à sua melhor condutibilidade térmica quando comparado a polímeros, essa solução encareceria o projeto pela fabricação de vários componentes em um material mais caro. Soluções de recipientes que envolvessem torneiras foram descartados devido à sua maior dificuldade em limpeza e problemas de endurecimento do chocolate caso a temperatura ficasse muito abaixo dos 28°C. A melhor solução então para o recipiente seria ele ser de tigelas de aço inox comumente vendidas no mercado para aplicação culinária, e adaptar o sistema de controle de temperatura para o tamanho padrão vendido no mercado. Assim o recipiente seria mais barato devido a sua fabricação em larga escala e presente em lojas comuns e o mecanismo de controle de temperatura não seria limitado pela escolha de materiais pois não teria contato direto com os alimentos.

4 MODELAGEM

A modelagem do sistema principal de controle de temperatura foi feita utilizando a forma construtiva *bath heating* que constitui que o fluido de transferência de calor, água ou óleo, está em contato direto com o ar atmosférico (Regloplas, 1998). Sua figura esquemática pode ser visualizada na Figura 3.

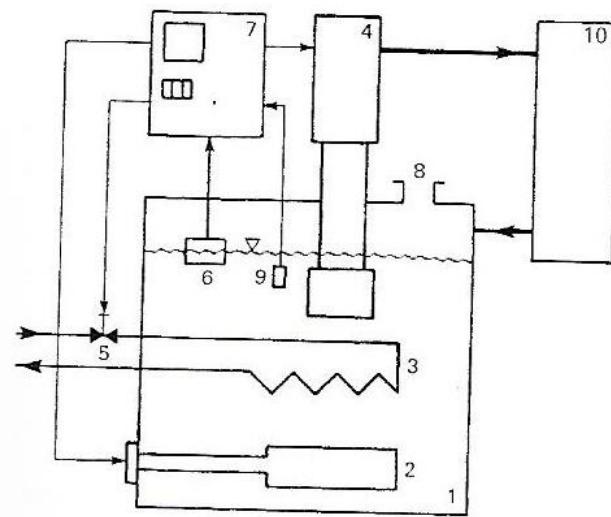


Figura 3 - Princípio de operação (Fonte: Regloplas, 1998)

Onde os componentes da figura são:

- 1) Tanque
- 2) Aquecedor
- 3) Resfriador
- 4) Bomba
- 5) Válvula Solenoide (Resfriador)
- 6) Controle de nível
- 7) Controlador
- 8) Abertura para reabastecimento do fluido
- 9) Sensor de temperatura
- 10) Consumidor

As vantagens dessa forma construtiva são: o baixo custo e projeto simples. Suas desvantagens são: para o sistema com água como fluido de transferência de calor, o limite de operação é 90°C devido ao fato da água evaporar muito rápido nessa temperatura (Regloplas, 1998). Como a temperatura de operação do chocolate foi definida entre 28°C e 48°C, não há problema em utilizar a água como fluido de transferência de calor.

4.1 Modelo físico e matemático do recipiente

O modelo físico feito baseado nos recipientes de inox, com *bath heating*, a Figura 4 mostra o que seria o consumidor exemplificado na Figura 3. Nele o recipiente de inox, exemplificado pela parte tracejada da figura, troca calor com o fluido através de convecção. Nesse modelo adota-se perda por convecção natural e perdas de calor do fluido para o consumidor desprezíveis.

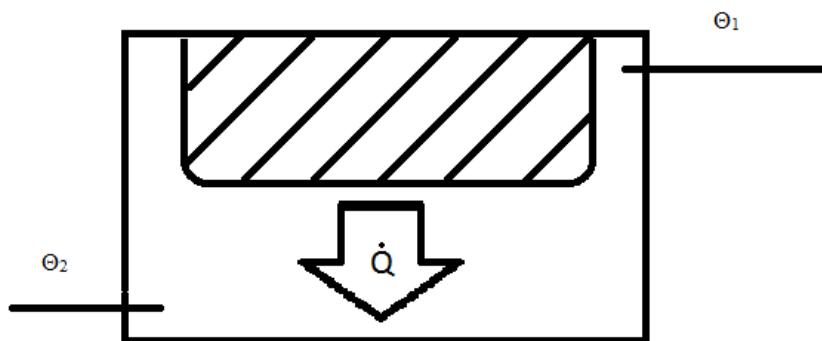


Figura 4 - Modelo Físico

Onde: θ_1 é a temperatura de entrada do fluido, θ_2 é a temperatura de saída do fluido, e \dot{Q} é o calor trocado entre o recipiente e o fluido.

Segundo Ogata (1998) os sistemas térmicos podem ser analisados em termos de resistência e capacidade, embora resistência térmica e capacidade térmica não possam ser representadas precisamente por parâmetros concentrados, admite-se essa hipótese simplificadora para simplificar a análise, admite-se também que as substâncias que são caracterizadas pela resistência ao fluxo de calor têm capacidade térmica desprezível, e as que são caracterizadas pela capacidade térmica, tem resistência térmica desprezível ao fluxo de calor. Outras hipóteses simplificadoras adotadas são que a taxa de transferência de calor do recipiente e do fluido são iguais, por conservação de energia, e perdas para o ambiente desprezíveis. Será considerado a condução de calor será considerada unidirecional. O efeito de convecção do chocolate até a parede interna do recipiente será desprezado pelo fato de existir uma pá em constante movimento para homogeneizar sua temperatura.

Adotando o volume de controle envolvendo o recipiente de inox exemplificado na Figura 4, para o modelo de condução transiente descrito por Incropera (2008), para o modelo exemplificado na Figura 5.

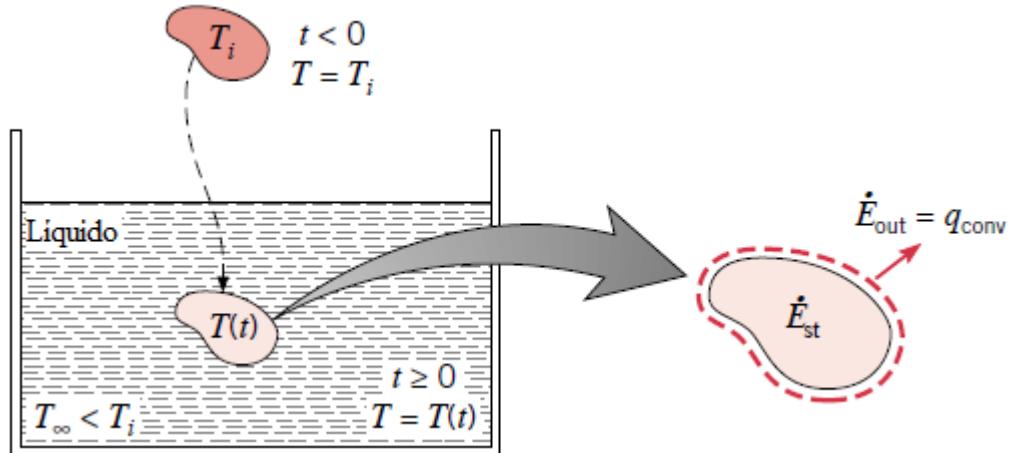


Figura 5 – Exemplo de resfriamento (fonte: Incropera, 2008)

Onde T_i é a temperatura inicial do corpo, $T(t)$ é a temperatura em função do tempo, q_{conv} é a transferência de calor por convecção, \dot{E}_{st} é a taxa de energia acumulada no tempo e \dot{E}_{out} é a taxa de energia que sai do corpo no tempo.

Através da igualdade da variação de energia acumulada e energia que sai do corpo por convecção, obtemos:

$$-hA(T - T_{\infty}) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Onde, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A é a área superficial do corpo, T é a temperatura do corpo, T_{∞} é a temperatura do fluido, ρ é a massa específica, V é o volume, c é o calor específico do corpo. Resolvendo a equação 2 obtemos:

$$Q = (\rho V c) \theta_i \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_t} \right) \right] \quad (3)$$

Onde Q é a energia térmica, ρ é a massa específica, V é o volume, c é o calor específico, t é o tempo, τ_t é a constante de tempo térmica.

Em que:

$$\theta_i = T_i - T_{\infty} \quad (4)$$

Onde T_i é a temperatura inicial do corpo

$$\tau_t = \left(\frac{1}{hA} \right) (\rho V c) = R_t C_r \quad (5)$$

Onde R_t é a resistência térmica equivalente e C_r a capacidade térmica equivalente.

Nesse modelo é possível desconsiderar a resistência térmica equivalente gerada pelo recipiente de inox se seu número de Biot for menor que 0,1 (Incropora, 2008), como exemplificado na Figura 6.

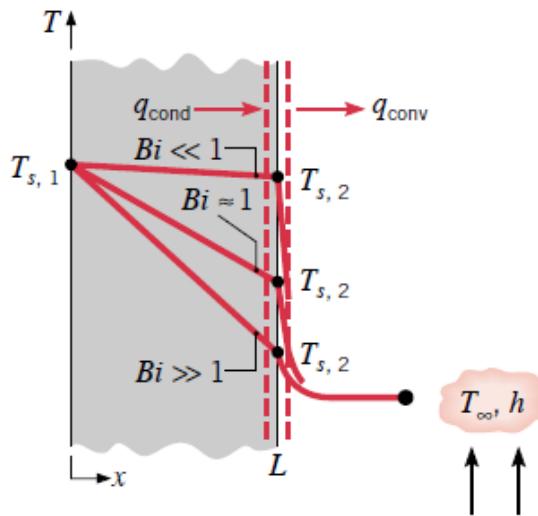


Figura 6 - Influência do número de Biot em estado estacionário em uma parede plana com convecção na superfície (fonte: Incropora, 2008)

O número de Biot é definido como:

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (6)$$

Onde Bi é o número de Biot, adimensional, e L é o comprimento característico definido como a razão entre o volume e a área superficial.

4.2 Cálculos do modelo do recipiente

O programa *Engineering Equation Solver* (EES) foi utilizado para calcular o coeficiente convectivo para dois modelos, o primeiro o escoamento externo num cilindro e posteriormente um no modelo de escoamento externo sobre placa para

comparação (Figura 7). As dimensões foram estimadas para um cálculo primário das propriedades e será mudado de acordo com os parâmetros do protótipo a ser desenvolvido. O programa feito pode ser visualizado no Apêndice A.

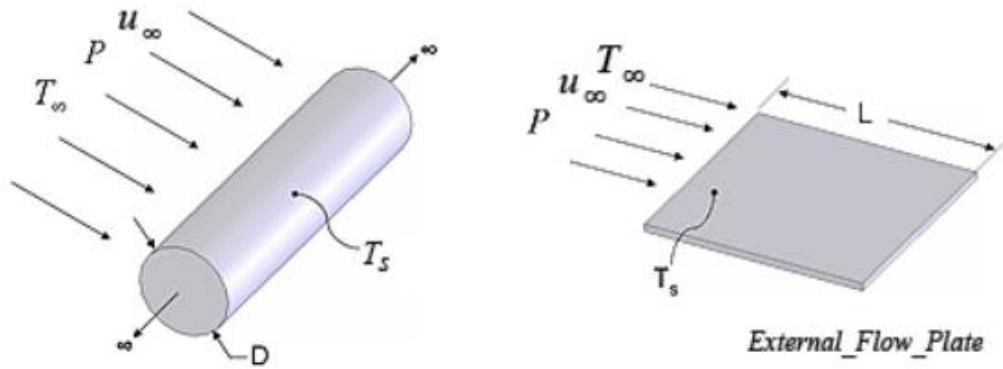


Figura 7 - Modelos calculados no EES (Fonte: EES)

O recipiente onde o chocolate será despejado foi modelado de um recipiente de inox utilizado no processo que possui 2,5 litros de capacidade e foi modelado como um corpo cilíndrico de 230mm de diâmetro e 95mm de altura. O consumidor foi modelado como uma caixa com dimensões de uma base quadrada de base 300mm e altura 200mm, por onde vai escoar o fluido de transferência de calor, com vazão estimada de 1000 litros por hora, este valor foi estimado de bombas submersas para aquário que será utilizada na prototipagem. A velocidade do escoamento foi adotada como constante em todo consumidor e igual a razão entre vazão e área transversal do consumidor. A temperatura do fluido foi 14°C, atualmente utilizado no preparo para não resfriar rapidamente o chocolate e mudar suas características e a temperatura de superfície foi adotada como a máxima que o chocolate pode ser aquecido 48°C.

Para os cálculos térmicos foram utilizadas as propriedades de Beckett (2009) que são listados Tabela 1.

Valor utilizado	Propriedade	Unidade	Condição
0,27	condutividade térmica	W/m°C	40°C a 35°C: 0,26. 30°C: 0,27 e 27°C: 0,28
1590	calor específico	J/kg°C	Chocolate líquido/sólido 15–40°C: 1590 líquido 40-60°C: 1670
1250	massa específica	kg/m ³	Sólido: 1300 Líquido 40°C: 1200

Tabela 1- Propriedades térmicas do chocolate

Os resultados obtidos para o modelo de escoamento externo cilíndrico foi um coeficiente convectivo $h = 104,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Após isso foi calculado para o modelo de placa para comparação que seria o fundo reto do recipiente que contém o chocolate, e seu resultado foi de $h = 113,9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Como há uma diferença de aproximadamente 8,7%, o coeficiente convectivo do escoamento externo cilíndrico será adotado para toda a área do recipiente e com o valor de 104,8 W/m²K constante em toda sua superfície.

O cálculo do número de Biot foi feito em seguida, utilizando coeficiente convectivo $h = 104,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, condutividade térmica $k = 15,1 \text{ W/mK}$ (aço inox 302 obtido de Incropora, 2011) e espessura do recipiente medida como aproximadamente $L = 0,55\text{mm} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. O número de Biot obtido foi de $Bi = 0,0038$ que é menor que 0,1. Portanto, pode-se utilizar o modelo da Figura 5. Da equação 3 foi obtido o tempo de resfriamento de 382s (6 minutos e 22 segundos) para o recipiente anteriormente descrito e massa de 3,125 kg de chocolate.

4.3 Modelo fluido do chocolate

Segundo Beckett (2009) as propriedades de fluidez do chocolate são importantes por duas razões: qualidade e sabor. A qualidade descrita no caso é por exemplo ao aplicar uma camada de chocolate aos doces, que com a aplicação errada pode diminuir a qualidade do produto, e consequentemente seu preço, ou aumentar o retrabalho. Estas propriedades são muito complicadas pois elas não possuem valores únicos e a estes fluidos é atribuído o nome de não-newtonianos. Isto significa que ao

medir sua viscosidade ela irá variar conforme quanto rápido o chocolate está fluindo. A Figura 8 ilustra o processo de cisalhamento que ocorre no fluido.

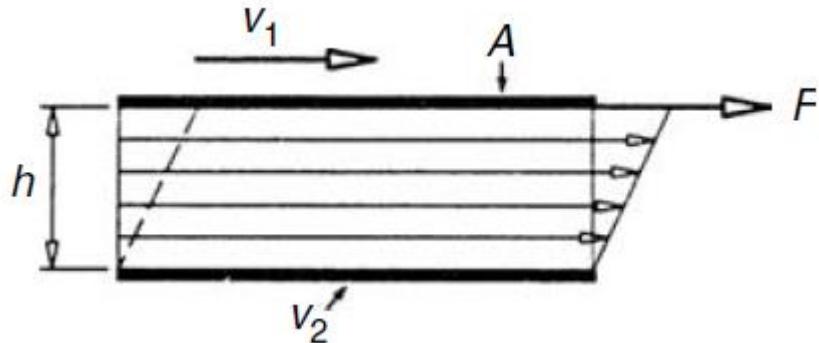


Figura 8 - diagrama ilustrando cisalhamento (Beckett, 2009)

Onde V_1 é a velocidade no plano superior, V_2 no plano inferior, A a área do plano, F a força aplicada e h a distância entre planos.

O gradiente de velocidade é definido como:

$$D = \frac{v_1 - v_2}{h} \quad (7)$$

A equação 11 representa a taxa que o fluido é cisalhado e tem como unidade 1/s. Normalmente é denominada taxa de cisalhamento.

A viscosidade aparente, representada por η pode ser calculada através de:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (8)$$

Onde η é a viscosidade aparente em Ns/m² ou Pa.s, e τ é a tensão de cisalhamento em Pa,

A complexidade das propriedades de fluxo do chocolate é devida às partículas sólidas nele presentes, exemplificado na Figura 9. Em escoamentos lentos, as partículas em suspensão colidem e há uma maior resistência elevando a viscosidade aparente. Uma vez que o chocolate flui mais rápido, as partículas movem juntas ao fluxo, fazendo com que se comporte como um fluido menos viscoso.

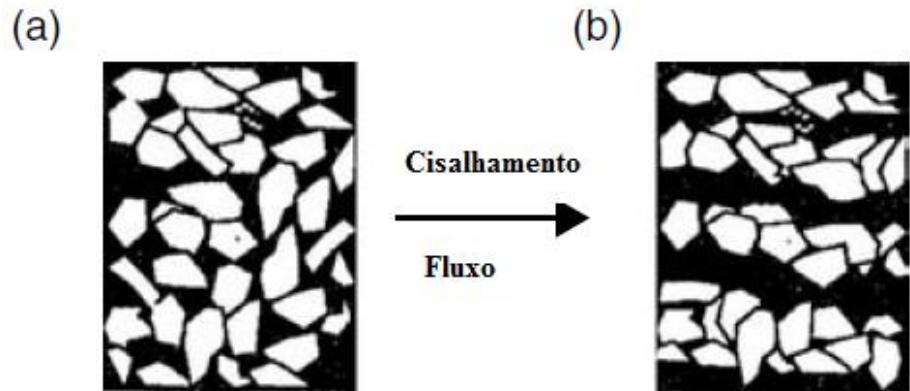


Figura 9 - ilustração de partículas em suspensão em: (a) repouso, (b) durante o fluxo fonte: (Beckett, 2009)

A tensão de cisalhamento em que um fluido não-newtoniano começa a fluir é denominado τ_0 . A Figura 10 ilustra um fluido newtoniano e a Figura 11 um fluido não newtoniano.

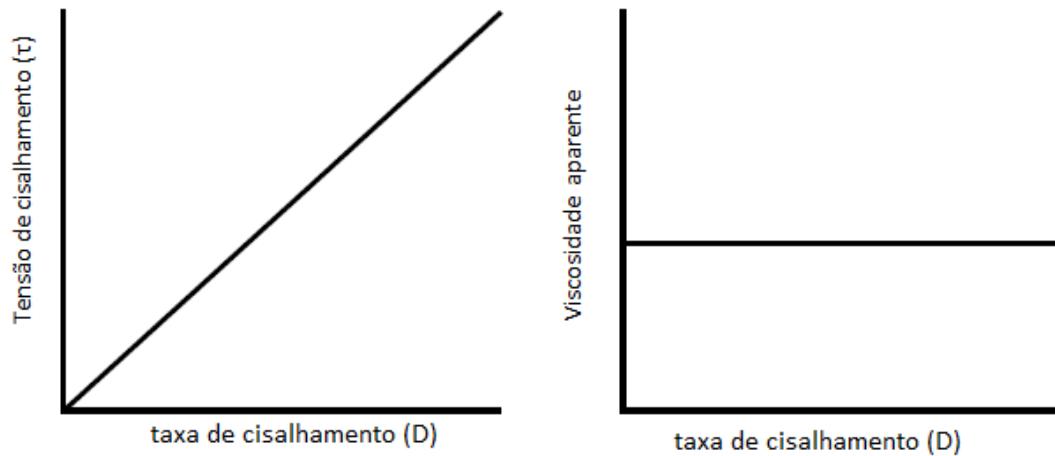


Figura 10- Exemplo de fluido newtoniano fonte: (Beckett, 2009)

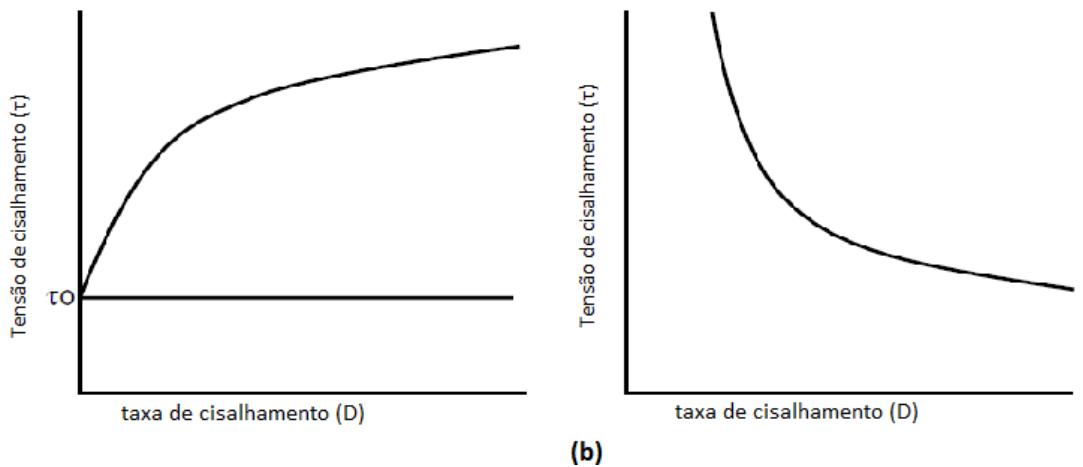


Figura 11 - Exemplo de fluido não-newtoniano fonte: (Beckett, 2009)

A Figura 12 ilustra a viscosidade aparente de um típico chocolate ao leite à temperatura de 40°C.

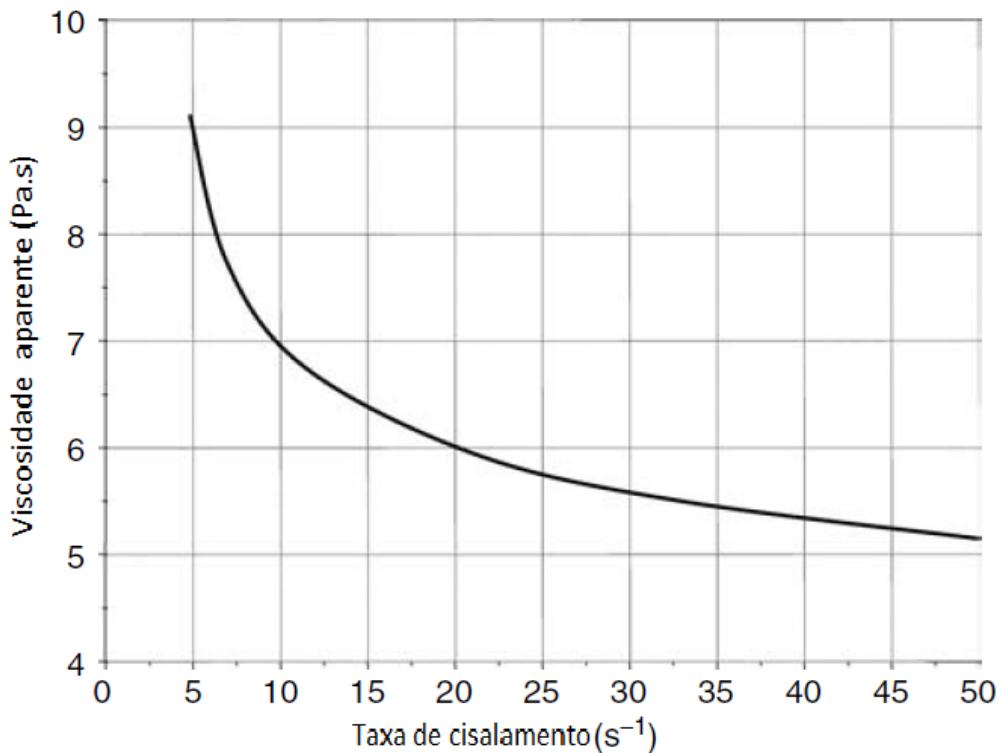


Figura 12 - gráfico de viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para chocolate ao leite fonte: (Beckett, 2009)

Na fase de prototipagem serão testadas duas formas construtivas para o agitador. A primeira descrita por McCabe (1993) cuja forma pode ser descrita na

Figura 13 e a segunda forma construtiva será um misturador com as pás com uma altura W maior e com uma distância menor da parede do recipiente de inox.

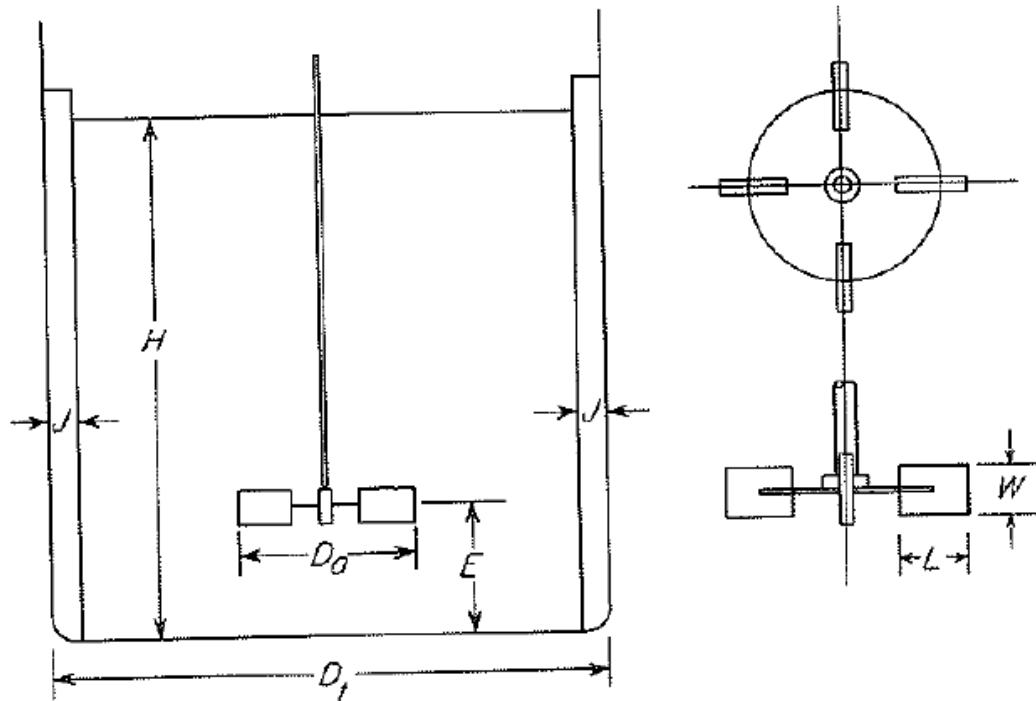


Figura 13 - Medidas do agitador (Fonte: Rushton et al, apud McCabe, 1993)

E suas proporções típicas para problemas de agitação comuns são definidas na Figura 14

$$\begin{array}{l}
 \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \\
 \frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}
 \end{array}$$

Figura 14 - Proporções típicas (Fonte: McCabe, 1993)

5 PROJETO DE CONTROLE

O projeto de controle foi dividido em duas partes: contínuo e discreto. A parte de projeto controle contínuo envolveu a modelagem do problema e estimativas iniciais do problema para a solução do problema. A parte de controle discreto foi feita após o acoplamento de alguns componentes (aquecedor e sensor térmico) para analisar sua dinâmica de resposta e obter suas funções de transferência mais precisas do que a estimativa inicial. O programa da estimativa inicial feito em Matlab pode ser visualizado no Apêndice B.

5.1 Estimativas iniciais do controlador

Para a modularização da máquina será feito um controle térmico fora da forma construtiva *bath heating*. Um aquecedor será adicionado para aumentar a temperatura do fluido de troca de calor quando for necessário o controle de temperatura para manter sua temperatura de trabalho constante em 28°C. A modelagem desse aquecedor foi obtido de Ogata (1998) e pode ser visto na Figura 15.

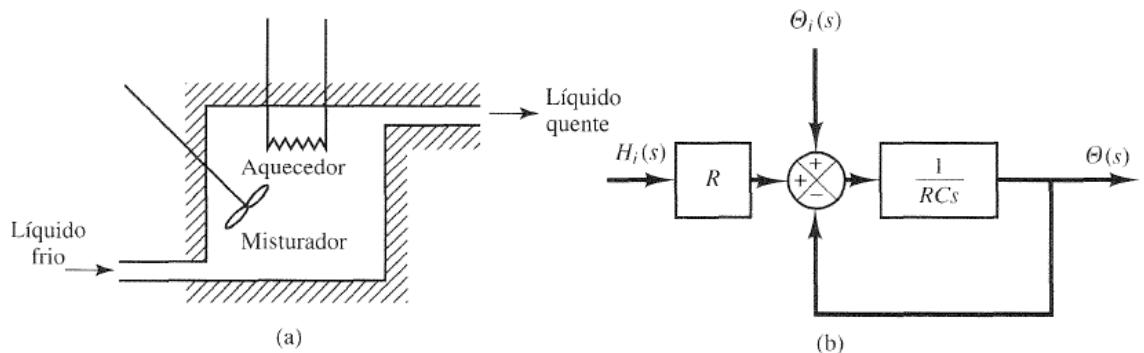


Figura 15- (a) Sistema térmico; (b) diagrama de blocos do sistema. Fonte: Ogata (1998)

Onde h_i representa uma pequena variação na taxa de entrada de calor em kJ/s, θ_i a temperatura de entrada do fluido em °C, θ a temperatura de saída do fluido em °C, R a resistência térmica em °Cs/kJ e C a capacitância térmica em kJ/°C.

Para esse modelo a resistência e a capacitância térmica são descritas como:

$$R = \frac{1}{Gc} \quad (9)$$

Onde G é a vazão mássica em kg/s , e c o calor específico em $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$.

$$C = mc \quad (10)$$

Onde m é a massa do líquido presente no reservatório em kg .

A função de transferência relacionando θ e h_i é:

$$\frac{\Theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (11)$$

Onde as letras maiúsculas são a transformada de Laplace das variáveis descritas. A função de transferência relacionando θ e θ_i é:

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (12)$$

À partir da modelagem feita no capítulo 4, da equação 2, obtemos:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{hA}{\rho V c} (T_{\infty} - T) \quad (13)$$

Em que obtemos as funções de transferência:

$$\frac{T}{T_{\infty}} = \frac{\frac{hA}{\rho V c}}{\frac{hA}{\rho V c} + s} \quad (14)$$

Combinando as equações 14 com 5 obtemos a função de transferência do sistema:

$$\frac{T}{T_{\infty}} = \frac{1}{1 + \tau_t s} \quad (15)$$

No espaço de estados as matrizes ficam:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{\infty} \\ \dot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ \frac{hA}{\rho V c} & -\frac{hA}{\rho V c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{\infty} \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & \frac{1}{RC} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_i \\ T_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Onde os estados são T_∞ e T . As entradas são h_i e T_0 , que é a temperatura de entrada do fluido. A matriz de saída C é uma matriz identidade, pois no projeto final terá 2 sensores para medir a temperatura do fluido e a temperatura do chocolate e a matriz de transmissão direta D será considerada uma matriz nula pois a entrada não influí na medição.

Devido à necessidade de precisão do controle térmico do chocolate, acima de 48°C ele descaracteriza e perde propriedades enquanto abaixo de 27°C apresenta maior dificuldade para manuseio e pode começar a se solidificar, foi escolhido o controle PID (Proporcional Integral Derivativo) para o controle de temperatura. O controle PID é exemplificado na Figura 16. A principal vantagem do controlador PID para esse projeto é a sua capacidade de ser ajustada mais facilmente em campo, em comparação a outros métodos como o Regulador Quadrático Linear (LQR), por exemplo.

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s^2 \right) \quad (17)$$

A fórmula 17 descreve o controlador PID com K_p sendo o ganho integral, o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d .

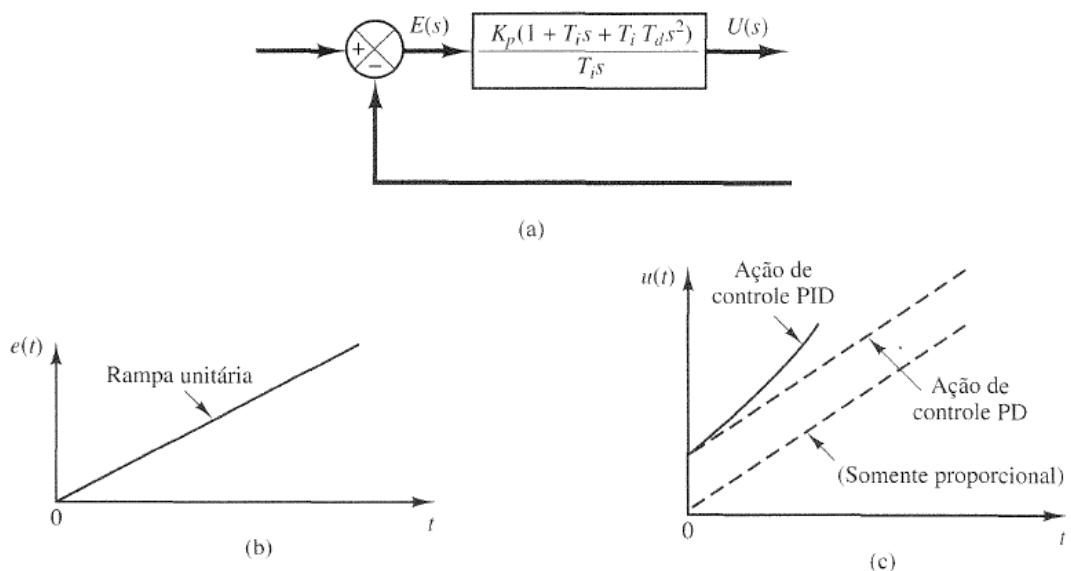


Figura 16 - (a) Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral-derivativo: (b) e (c) diagramas esboçando uma rampa unitária e o correspondente sinal de saída do controlador. Fonte: (Ogata, 1998)

Das funções de transferência cria-se o diagrama de blocos, Figura 17, onde a função de transferência do aquecedor descrita na equação 9, é representada na como G_a e a função transferência da planta, equação 12, representada como G . Para esta etapa adotou-se a dinâmica do sensor desprezível,

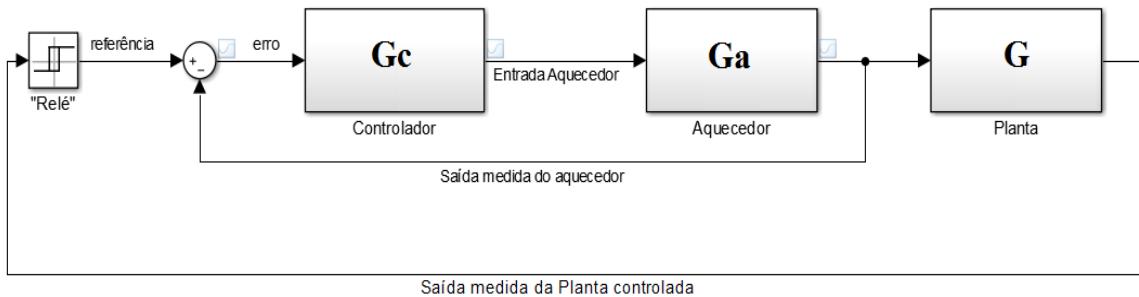


Figura 17 - Diagrama de blocos

Foi feita então uma simulação com entrada degrau na função de transferência definida pela equação 11, que pode ser visualizada na Figura 18.

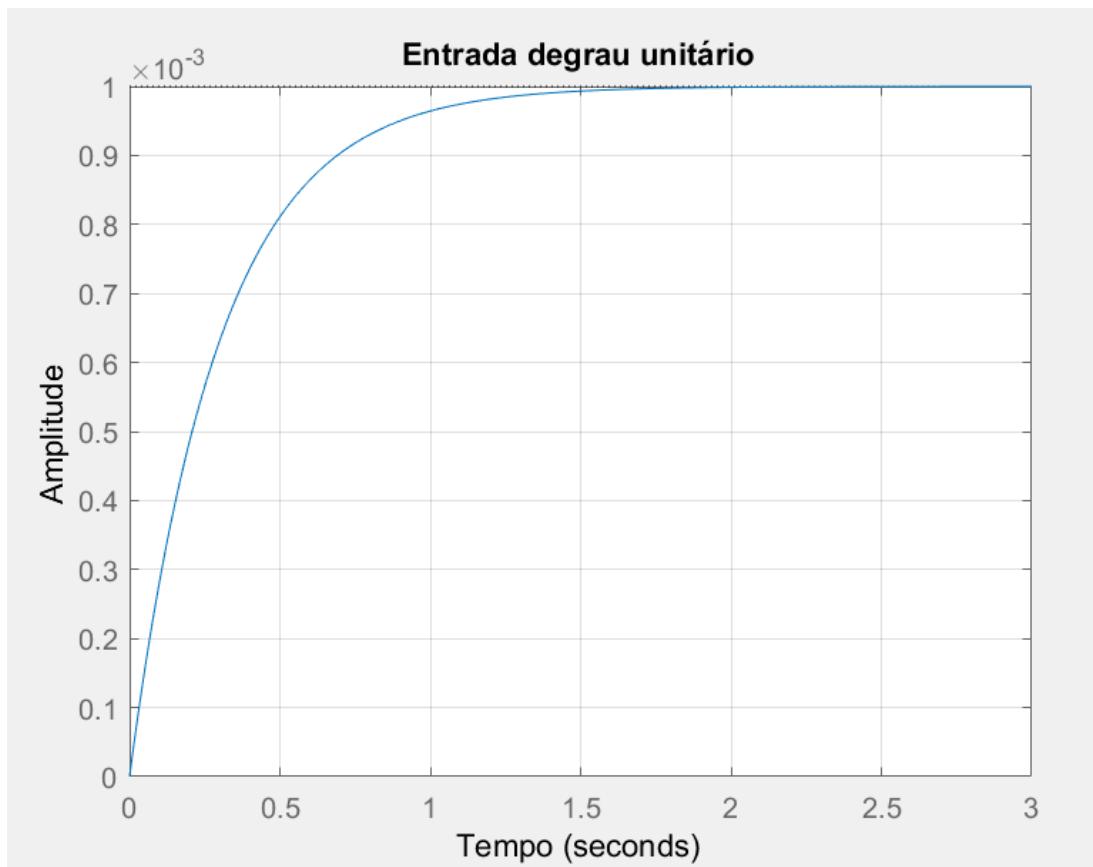


Figura 18 - Entrada degrau na função de transferência do aquecedor

Através da ferramenta *pidTuner* do Matlab foram calculados os ganhos do controlador PID, e posteriormente simulados como pode-se ver na Figura 19.

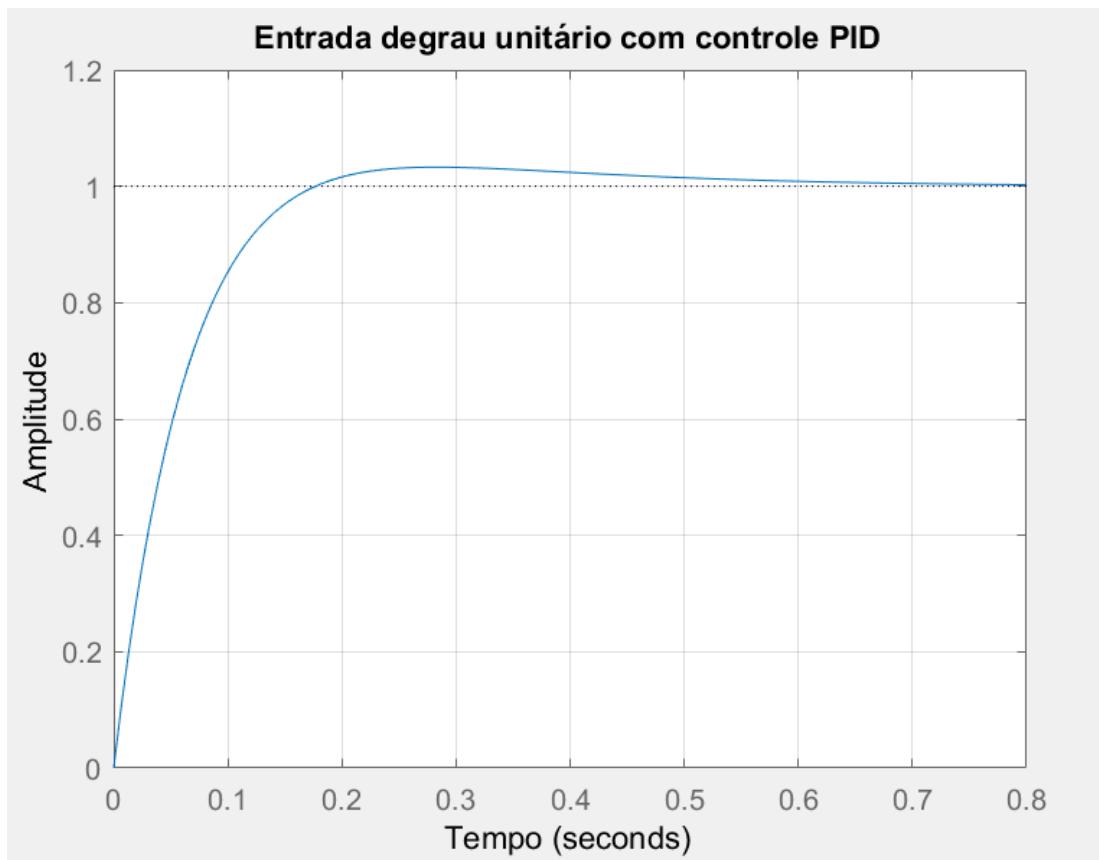


Figura 19 - Entrada degrau controlada por PID da função de transferência G_a

Os ganhos calculados foram: $K_p = 5029,8$ de ganho proporcional, $K_i = 24721,5$ de ganho integral e $K_d = 0$ de ganho derivativo. O valor convergiu em 0,44 segundos e teve um *overshoot* (sobressinal) de 3,3%. Do ganho proporcional foi estimada a potência necessária para o aquecedor, tendo em vista que a curva de resposta da Figura 18 seria uma entrada degrau para 1 W. Portanto o aquecedor adquirido para o protótipo foi de 5500W que satisfaz o ganho proporcional.

5.2 Dinâmica do sensor por controle discreto

Após estimada a potência do aquecedor, o sensor, o aquecedor e o microcontrolador descritos no capítulo 6.1 foram testados associados para obter a curva experimental do sensor e aquecedor por amostragem.

Segundo Lima (2014), no controle digital de plantas que são contínuas no tempo é necessário converter modelos de tempo contínuo em modelos de tempo discreto. Do ponto de vista físico admite-se a existência de um amostrador e de um segurador de ordem zero no sistema. Do ponto de vista matemático trata-se de uma operação de integração de t a $t + T$, onde T denota o intervalo de amostragem.

Da equação de espaço de estados no domínio discreto:

$$x(k + 1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (18)$$

Onde:

$$G = e^{At} \quad (19)$$

$$H = \int_0^T e^{A(T-\lambda)t} B d\lambda \quad (20)$$

Sendo A a matriz de estados e B a matriz de alimentação.

Do sensor de temperatura DS28B20 com um invólucro de inox para impermeabilização. Foi feito um ensaio ao submergir o sensor em água fervente para tirar sua curva de resposta simulando o que seria a entrada tipo “degrau”. A temperatura em regime permanente mensurada foi de 96,5 °C e o sensor possui uma incerteza de 0,5°C, que está dentro do valor previsto pois a temperatura de ebulação da água na cidade de São Paulo, onde foi feito este ensaio é de 97°C, esta curva de resposta pode ser vista na Figura 20. O intervalo de amostragem foi de 750 ms, estipulada pelo fabricante do sensor para garantir maior precisão nas medições.

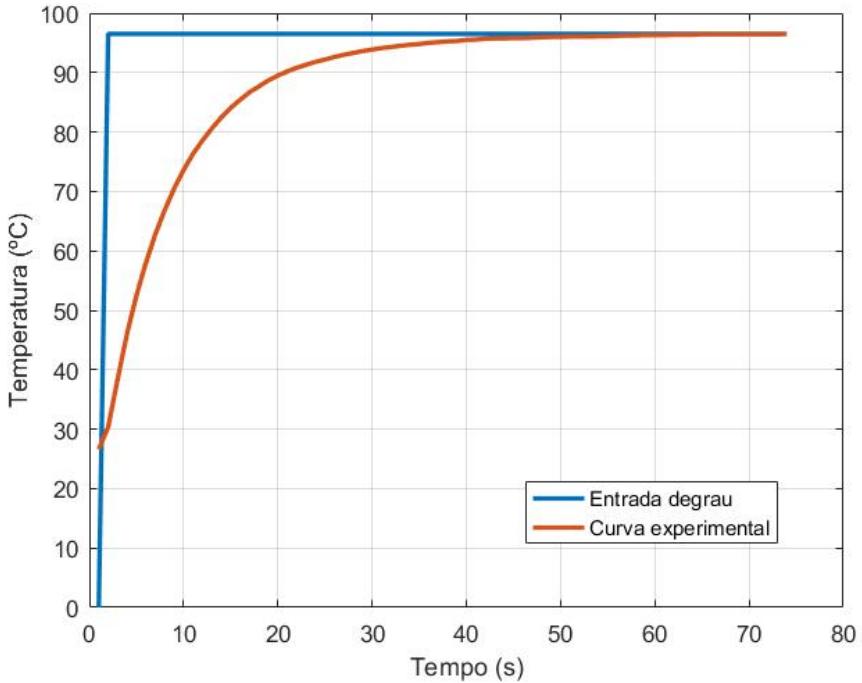


Figura 20 - Curva experimental com entrada degrau

Para a obtenção da função de transferência no contínuo definiremos a matriz θ de dados coletados do sensor. No domínio esta equação se torna:

$$\theta(k+1) = G\theta(k) + Hu(k) \quad (21)$$

Como as matrizes θ e u são conhecidas pois foram medidas, u é admitido degrau unitário com valor final da temperatura que o sensor estabiliza, 96,5°C. Para isolar G e H que são valores desconhecidos e do vetor com dimensão 1 x n da medidas aferidas definindo $\theta(k+1)$ como θ_d , um vetor das medições que vai de 2 a n e θ um vetor que vai de 1 a n-1 do vetor de temperatura medida, dedução pode ser vista no Apêndice C .

$$\begin{bmatrix} G^T \\ H^T \end{bmatrix} = [\theta^T \quad u^T]^+ \times [\theta_d^T] \quad (22)$$

Onde o índice + é a inversa de Moore-Penrose.

A temperatura inicial foi subtraída dos sensores, para cumprir a hipótese de condição inicial começando da origem, Figura 21. A função de transferência do sensor térmico foi então obtida através da transformada de discreto para contínua de G e H .

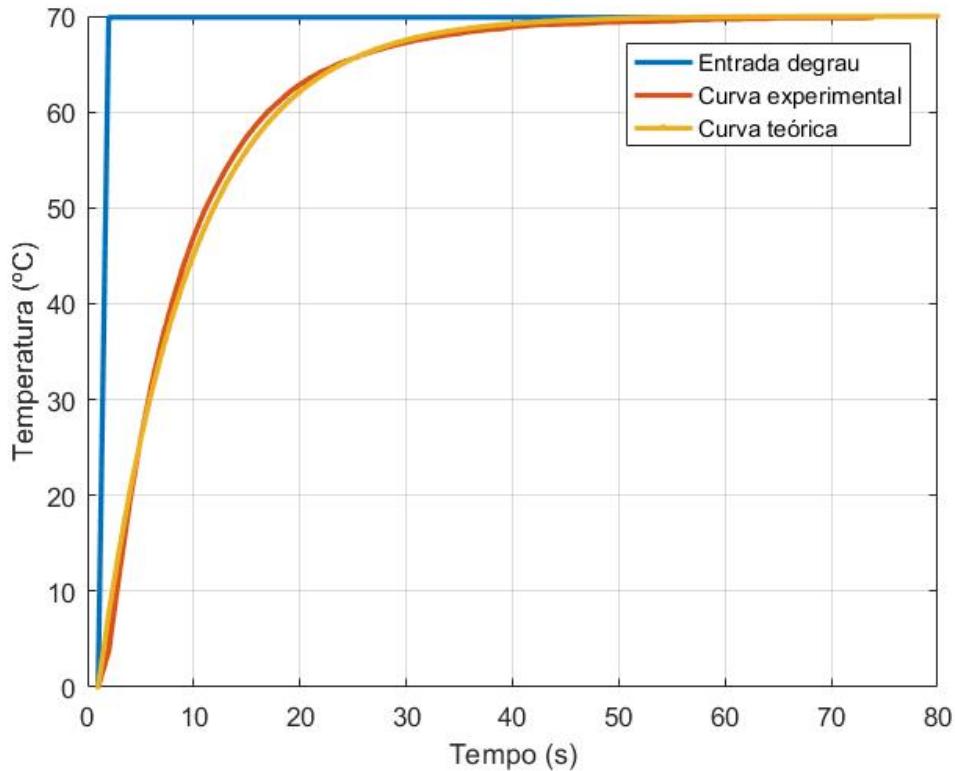


Figura 21 - Curva diferença da temperatura inicial com curva experimental e teórica estimada

A função de transferência obtida das transformadas de G e H é:

$$\frac{\theta_{sensor}}{\theta} = \frac{1}{6.515 s + 1} \quad (23)$$

5.3 Dinâmica aquecedor com sensor

No ensaio com o aquecedor, foi deixado água escoar pela tubulação até o sensor estabilizar com a temperatura de água corrente e então foi ligado o aquecedor simulando uma entrada degrau de potência. O degrau utilizado como teórico será o de temperatura, pois para obter o de potência basta aplicar um ganho proporcional da potência igual ao inverso da resistência térmica descrito na equação 11. A curva experimental pode ser vista na Figura 22.

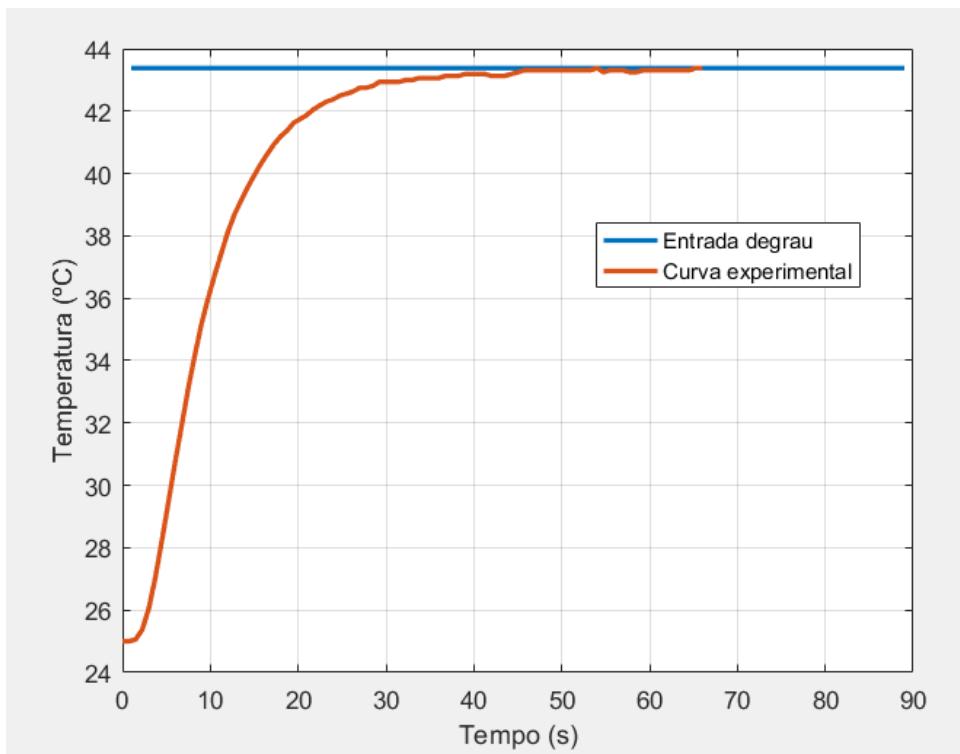


Figura 22 - Curva experimental do aquecedor com sensor térmico

Adotando a função de transferência do sensor térmico, equação 23, multiplicada com a equação do aquecedor, equação 11. Obteve-se o gráfico simulado com a dinâmica de sensor comparando o modelo estimado com os dados experimentais, Figura 23. A função de transferência experimental do aquecedor associado ao sensor de temperatura é descrita na equação 24.

$$GH = \frac{18.38}{36.6s^2 + 12.13s + 1} \quad (24)$$

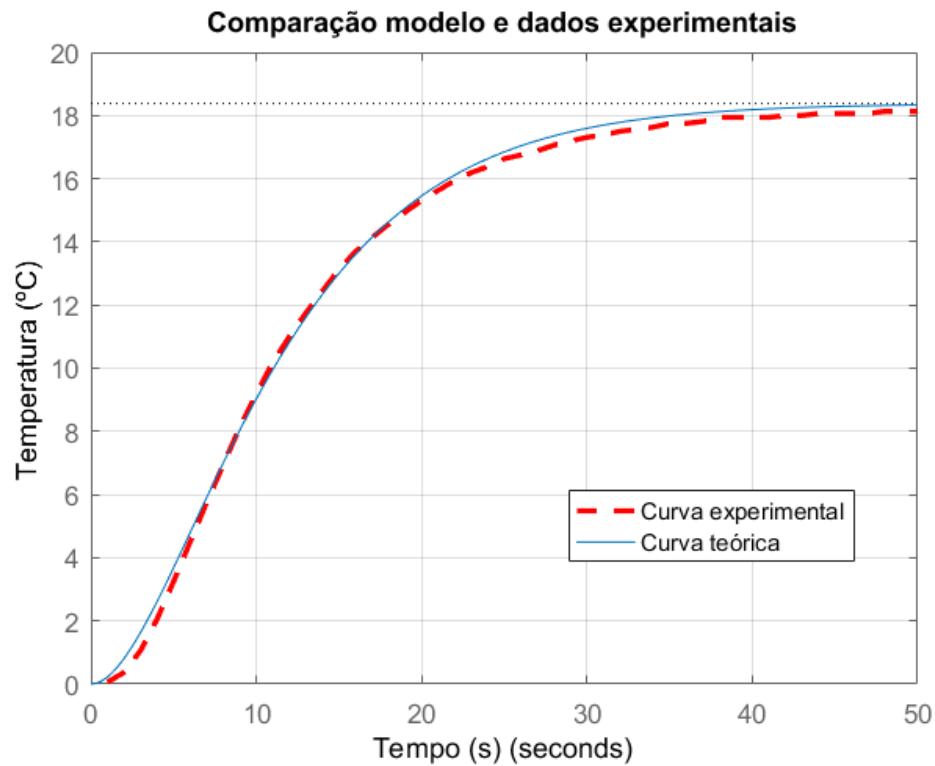


Figura 23 - Comparação modelo com sensor

Os ganhos do controlador PID, utilizando a ferramenta *pidTuner* do Matlab, com o aquecedor com potência de 5500W foram: $K_p = 0,440$ de ganho proporcional, $K_i = 0,047$ de ganho integral e $K_d = 1,032$ de ganho derivativo. O valor convergiu em 13,2 segundos e teve um *overshoot* (sobressinal) de 5,07%.

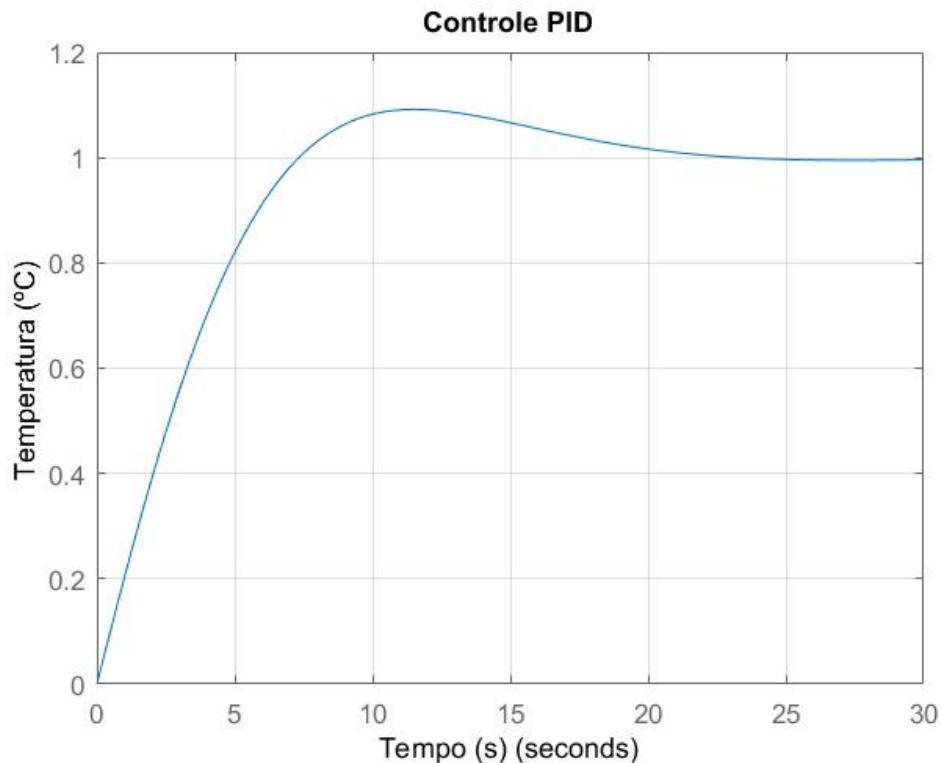


Figura 24 - Controle PID na função de transferência GH

6 PROTOTIPAGEM

Em empreendedorismo e principalmente no atual contexto de *startups*, empresas emergentes que podem ser definidas como empresas iniciantes de tecnologia, um *MVP* (Minimum Viable Product, traduzido como produto mínimo viável) é a versão mais simples de um produto que pode ser lançada com uma quantidade mínima de esforço e desenvolvimento. O objetivo do *MVP*, portanto, é começar o processo de aprendizagem, e não o finalizar (Ries, 2011). O objetivo da prototipagem, assim como o *MVP*, é começar o processo de aprendizagem e validar hipóteses, com a diferença que o protótipo deve ser feito antes do *MVP* com o propósito de prova de conceito apresentada ao cliente. A prototipagem deste trabalho foi dividida em duas partes: estudo dos componentes necessários e teste.

6.1 Estudo dos componentes

6.1.1 Sensor

O sensor escolhido foi o sensor de temperatura DS18B20, parte das características fundamentais desse sensor foi ser à prova d'água, com ponta de aço inox e ter uma precisão de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ na faixa de operação de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$. Sua tensão de operação é de 3 a 5.5V, que torna possível seu uso em conjunto com um microcontrolador Arduino ou Raspberry Pi.

6.1.2 Relé

Foi estudada a possibilidade de usar um relé para fazer um controle de potência por PWM (Pulse-Width Modulation, modulação por largura de pulso), ou seja estabelecer um ciclo, em Reglopas (1998) é exemplificado um ciclo com tempo de 20s, onde 20% da potencia calculada no controlador, seria que o aquecedor fica ligado 4s dos 20s do ciclo.

Um relé industrial tem uma vida útil de 10 milhões de ciclos e o máximo de 4 operações por segundo. O relé industrial também possui o problema de ter uma voltagem de controle de 12 a 24V, tensão típica de CLP (Controlador Lógico Programável) e não adequado para a tensão de saída de microcontroladores.

O relé de estado sólido, por outro lado possui uma tensão de entrada de 3 a 32V, podendo ser utilizado em conjunto tanto de CLP como microcontroladores comuns. Seu tempo de ativação e de desligamento varia de 1 a 40 ms, dependendo da marca e da corrente de operação, porém este possui a desvantagem de ser duas a três vezes mais caro que o relé comum além de precisar de aletas de refrigeração.

O relé de estado sólido foi escolhido por se adequar mais ao projeto.

6.1.3 Aquecedor e Disjuntor

A potência do aquecedor foi de 5500W como calculado no capítulo 5.1. Foi escolhida uma torneira elétrica devido à sua praticidade e já vir com a resistência

isolada eletricamente do meio e por utilizar uma resistência típica de chuveiros elétricos o que facilita sua reposição. O disjuntor escolhido para proteger o dispositivo aquecedor foi um disjuntor de 32A, com curva de proteção B, típica para circuitos que alimentam cargas predominantemente resistivas como lâmpadas, chuveiros e aquecedores.

6.1.4 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido foi o Arduino UNO, pois apesar de ser mais caro que o microcontrolador PIC16F84A, o Arduino UNO possui uma vasta biblioteca de soluções disponíveis em seu site para utilização de bibliotecas de sensores e inclusive bibliotecas prontas de controle PID.

6.1.5 Componentes utilizados

Os componentes e sua quantidade utilizados no projeto podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – componentes utilizados.

Item	Qtde
Relé estado sólido	1
torneira elétrica 5500W	1
disjuntor monopolar 32A	2
Plugue 30A	1
Arduino Uno	1
Bomba	1
Sensor de Temperatura DS18B20	2

6.2 Testes experimentais

Um dos modelos de misturadores testado foi o que raspa todo o contorno do recipiente do chocolate. Foi feito através de uma placa de plástico com o tamanho para

quase entrar em contato com o recipiente de Inox. Por ser uma placa sólida e devido ao caráter viscoso do chocolate ele vazou para os lados durante seu movimento. A adição de cortes internos, Figura 25, para escoar através do misturador resolveu o problema de escoamento para fora do recipiente além de melhorar seu processo de mistura.



Figura 25 – Modelo de misturador

O aquecedor por ter sido adaptado de uma torneira elétrica apresentou o problema de possuir um diafragma que impede a circulação de corrente caso a pressão da água esteja abaixo da mínima estipulada pelo fornecedor que é de 2 m.c.a. (metros de coluna d'água). O problema foi resolvido comprando-se uma bomba mais potente para atribuir a pressão mínima requerida pelo fornecedor, a associação desses componentes pode ser visto na Figura 26.



Figura 26 - Associação bomba e aquecedor

Por uma facilidade construtiva do protótipo, o motor elétrico com redutor foi colocado junto com o misturador acima do recipiente de chocolate. Essa forma construtiva se mostrou de qualidade insuficiente para o *MVP* devido a um vazamento de óleo do retentor ao deixar o protótipo montado parado por alguns dias.

7 CONCLUSÃO

As necessidades e critérios foram estabelecidas na primeira parte do trabalho em conjunto com a análise de viabilidade econômica do projeto e a escolha de melhor alternativa, que concluiu o estudo de viabilidade. Na primeira entrega do trabalho, foi feito o estudo técnico do projeto para a análise numérica e quantitativa dos fenômenos de transferência de calor foi feita e mostrou um resultado promissor: já nessa primeira iteração o processo mostrou um tempo de preparo de 6 minutos e 22 segundos para 3,125 kg de chocolate, enquanto o processo manual e artesanal seria de meia hora, extrapolado do tempo de preparo de 20 minutos para 2 kg de chocolate. O dimensionamento do consumidor para a primeira iteração de prototipagem foi estabelecido.

Após um dimensionamento inicial, foi feita a pesquisa e compra dos componentes para a prototipagem e alguns testes preliminares. Utilizando controle discreto foi obtida a função de transferência que representa a dinâmica do sensor térmico e o modelo do aquecedor com a dinâmica do sensor foi obtida e comprovada com dados experimentais. Através do software Matlab foram simuladas entradas degrau para o sistema e foi projetado o controlador PID utilizando a ferramenta *pidTuner* para os dados estipulados.

Apesar do PID do bloco do aquecedor com sensor de dinâmica desprezível convergir em menos de 1 segundo na estimativa inicial, isso se mostrou de difícil execução na hora de fazer o PID com sensor, então para manter o sobressinal baixo, em torno de 5%, foi decidido manter o tempo de convergência de 13,2 segundos, tendo em vista que o processo como um todo tem tempo total maior que 10 minutos o tempo de convergência pode ser suficiente para o projeto.

A forma construtiva do misturador foi obtida através de testes experimentais, onde foi necessária a adição de cortes internos para melhorar o escoamento do chocolate. Devido à alta viscosidade e baixa difusividade térmica do chocolate não pode ser utilizada uma forma construtiva da indústria química.

8 DISCUSSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

Para a etapa de prototipagem, falta a implementação do controle PID através da programação de um microcontrolador com testes para averiguação se o aquecedor é suficiente ou sofre saturação na atuação.

Após validado o controle na prototipagem, o prosseguimento para a criação de um produto que traz o valor desejado ao cliente, é necessário modificação da forma construtiva, a começar pela localização do motor e redutor que deve ficar ao lado do recipiente para evitar contaminação no produto, em caso de falha do anel retentor. O controle de fluxo do fluido de transferência de calor pode ser implementado através de válvulas solenoides. A estrutura da máquina é recomendada de perfil estrutural de alumínio que possui versatilidade na montagem e desmontagem, é um material que possui uma película de óxido estável e impede a deterioração do material como ocorre na maioria dos aços e possui um menor custo em comparação ao aço inoxidável.

Caso queira implementar uma interface homem-máquina ao projeto, é recomendável a utilização de um microcontrolador com maior processamento, como o Raspberry Pi por exemplo, este possui é compatível com diversos sistemas operacionais, além de possuir entradas para monitores e pinos de I/O que podem atuar em dispositivos de 5 V de corrente contínua. Caso não seja possível adaptar as bibliotecas dos sensores feitos para arduino, é possível estabelecer uma conexão serial através da conexão USB com uma programação em Python.

9 REFERÊNCIAS

- ABICAB. O Potencial de Mercado Para o Chocolate.** 2014. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Cacau/30RO/App_Potencial_30RO_Cacau.pdf>. Acesso em: 15 out. 2016.
- BECKETT, S. T. Industrial Chocolate Manufacture and Use.** 4th Ed. Blackwell Publishing Ltd. 2009. 688 p.
- REGLOPLAS. Temperature Control by Means of Fluid Media.** 4th Ed. Zürich: Hüthig. 1998. 228 p.
- Anvisa. Perguntas e Respostas sobre Materiais em contato com alimentos.** 2014. Disponível em: <<http://portal.anvisa.gov.br/duvidas-frequentes-materiais-em-contato-com-alimentos>>. Acesso em: 16 out. 2016
- Caobisco. Statistical Bulletin.** 2013. Disponível em: <<https://www.mah.se/PageFiles/55093/caobisco-statistical%20bulletin%202013.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2016.
- GARCIA, C.** Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. São Paulo: EDUSP, 2005. 678 p.
- INCROPERA, F. P, et al.** **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 6^a Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 638 p.
- KAMINSKI, P. C.** **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2000. 132 p.
- LIMA, R. G.** **PME 2443 Microprocessadores e controle digital.** Universidade de São Paulo. 13 nov. 2014. Apostila de aula da matéria “PME2443 Microprocessadores e Controle Digital”.

MCCABE, W. L. et al. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5th Ed.
Mcgraw-Hill Book Co. 1993. p. 242-243

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3^a Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1998. 813p.

PISO SALARIAL. Tabela Salarial 2016 Setor de Prestação de Serviços
<<http://www.pisosalarial.com.br/servicos/tabela-salarial-2016-servicos/>>. Acesso em 06 dez. 2016.

RIES, E. **The lean startup**. 1st Ed. New York: Crown Business, 2011. p. 77-93.

SEBRAE. Participação das Micro e Pequenas Empresas na Economia Brasileira. 2014. Disponível em:
<<http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Estudos%20e%20Pesquisas/Participacao%20das%20micro%20e%20pequenas%20empresas.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2016.

SEBRAE. Planilhas para a gestão do seu negócio. 2016. Disponível em:
<<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/mg/artigos/planilhas-para-a-gestao-do-seu-negocio,6b926f65a8f3a410VgnVCM2000003c74010aRCRD>>

10 APÊNDICE A

unitSystem SI K kPa J

{propriedades superfície e escoamento}

```
T_s=273,15[K]+48[K]
Fluid$='Water'
T_inf=273,15[K]+14[K]
P=101,3 [kPa]
```

{Dados consumidor}

```
L_consumidor=0,3 [m]
h_consumidor=0,2 [m]
A_consumidor =L_consumidor*h_consumidor
V_consumidor=A_consumidor*L_consumidor
V_ponto=(1/3600) [m^3/s]
u_inf=V_ponto/A_consumidor
```

{Dados recipiente}

```
D=0,23 [m]
L=0,095[m]
A_cil=pi#*D*L
A_circ=pi#*(D^2)/4
A_total=A_cil+A_circ
```

Call external_flow_cylinder(Fluid\$;T_inf; T_s; P; u_inf; D; F_d\L; h; C_d; Nusselt; Re)

Call external_flow_plate(Fluid\$; T_inf; T_s; P; u_inf; D; tau_arrasto; h_placa; C_f; Nusselt_placa; Re_placa)

{cálculo chocolate}

```
T_0=T_s
T_1=273,15[K]+28[K]
rho=1250 [kg/m^3]
c=1590 [J/kg-K]
V=0,0025 [m^3]
```

Delta_E=rho*c*V*(T_1-T_0)

{conservação de energia}

-Q=Delta_E

{Transiente}

```
tau_t=(rho*c*V)/(h*A_total)
Q=((rho*c*V)*(T_0-T_inf))*(1-exp(-t/tau_t)) {obtenho o tempo pra resfriar até o requerido}
```

11 APÊNDICE B

%% Parâmetros

```
k_choc=0.27;%W/m°C
c_choc=1590; %J/kg°C
rho_choc=1250; %kg/m³
V=2.5/1000;%litros -> m³
m_choc=rho_choc*V;%kg

T=28; %temperatura desejada

c_agua=1000;%J/kg
% aquecedor
G=1;%kg/s
m_agua=0.3;%massa de agua do volume morto
H_aq=5500; %W
R_aq=1/(c_agua*G);
C_aq=c_agua*m_agua;
```

%% Funções de transferência

```
% FT do aquecedor
Ganum=R_aq;
Gaden=[R_aq*C_aq 1];
Ga=tf(Ganum,Gaden);

%consumidor
h=104.8; %W/m²K
D=0.23;% [m]
L=0.095;% [m]
A_cil=pi*D*L;
A_circ=pi*(D^2)/4;
A_total=A_cil+A_circ;

tau_t=(rho_choc*c_choc*V)/(h*A_total);

%FT da planta
Gpnum = 1;
Gpden = [tau_t 1];
Gp=tf(Gpnum,Gpden);
```

```

%% Espaço de Estados
A = [-1/(R_aq*C_aq) 0; (1/tau_t) -(1/tau_t)];
B = [1/C_aq 1/(R_aq*C_aq); 0 0];
C = eye(2);
D = zeros(2);

sys_EE = ss(A,B,C,D);

%% PID
% Kp
% Td = Kd/Kp
% 1/Ti = Ki/Kp

figure(101)
step(Ga)
title('Entrada degrau unitário')
xlabel('Tempo')
ylabel('Amplitude')
grid

Kp = 5029.8;
Ki = 24721.5;
Kd = 0;
Gc = pid(Kp,Ki,Kd);
%FT do controlador PID com Gc como FT do controlador
figure(202)
TF_pid = feedback(Gc*Ga, 1);
step(TF_pid)
title('Entrada degrau unitário com controle PID')
xlabel('Tempo')
ylabel('Amplitude')
grid

```

12 APÊNDICE C

Partindo-se de Controle contínuo:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Para controle discreto, no caso x a variável de estado, que neste trabalho representa a temperatura do sensor térmico descrito no problema do capítulo 5.2.

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k)$$

Sendo G e H

$$G = e^{AT}$$

$$H = \int_0^T e^{A(T-\lambda)t} B d\lambda$$

Para o caso de B constante (entrada degrau):

$$H = A^{-1}(e^{AT} - I)B$$

Para as medições de n estados para m entradas:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix}$$

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix}$$

Sendo $x(k+1)$ é uma matriz com n linhas e 1 coluna e $u(k)$ com m linhas e 1 coluna. Portanto as dimensões de G e H são respectivamente, $n \times n$ e $n \times m$.

Pegando a transposta da equação de estados na forma discreta:

$$x^T(1) = x^T(0)G^T + u^T(0)H^T$$

$$x^T(2) = x^T(1)G^T + u^T(1)H^T$$

$$\vdots \quad = \quad \vdots \quad + \quad \vdots$$

Para k medidas, definindo os $k-1$ valores de $x(k+1)$ como X_d e os $k-1$ valores de $x(k)$ como X , sendo X_d e X matrizes $n \times k-1$. A dimensão $k-1$ se deve ao fato das k medidas e a matriz de estado derivado $x(k+1)$, portanto, x vai de 2 a k , enquanto o estado $x(k)$ vai de 1 a $k-1$. A transposta da equação de estados fica:

$$X_d^T = X^T G^T + U^T H^T$$

A equação pode então ser colocada na forma:

$$[X_d^T] = [X^T \quad U^T] \begin{bmatrix} G^T \\ H^T \end{bmatrix}$$

Definindo as matrizes acima como:

$$[X_d^T] = \Psi$$

$$[X^T \quad U^T] = \Gamma$$

$$\begin{bmatrix} G^T \\ H^T \end{bmatrix} = \Lambda$$

Sendo Ψ uma matriz $(k-1) \times n$, Γ uma matriz $(k-1) \times (n+m)$ e Λ uma matriz $(n+m) \times n$. A equação fica:

$$\Psi = \Gamma \Lambda$$

Multiplicando a equação acima pela transposta de Γ obtém-se:

$$\Gamma^T \Psi = \Gamma^T \Gamma \Lambda$$

Onde $\Gamma^T \Gamma$ é uma matriz quadrada. Admitindo-se $\Gamma^T \Gamma$ possuir determinante diferente de zero, ou seja, é uma matriz invertível e multiplicando a equação pelo inverso de $\Gamma^T \Gamma$ obtém-se:

$$\Lambda = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T \Psi$$

A operação que multiplica Ψ é chamada de inversa de Moore-Penrose e é definida como:

$$\Gamma^+ = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T$$

Portanto a equação para se obter G e H desejados é:

$$\Lambda = \Gamma^+ \Psi$$