



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE**  
**CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CEAU**



**MARCO AURELIO REIS LIMA MENEZES**

**ANÁLISE DA DINÂMICA E PROJETO DE CONTROLADORES DE**  
**TEMPERATURA PARA CHUVEIROS ELÉTRICOS**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E**  
**AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2018**

MARCO AURELIO REIS LIMA MENEZES

## **ANÁLISE DA DINÂMICA E PROJETO DE CONTROLADORES DE TEMPERATURA PARA CHUVEIROS ELÉTRICOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro preto como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro de controle e automação.

Orientador: Ronilson Rocha

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Junho/2018

M543a Menezes, Marco Aurelio.  
Análise da dinâmica e projeto de controladores de temperatura para  
chuveiros elétricos [manuscrito] / Marco Aurelio Menezes. - 2018.

80f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas  
Fundamentais.

1. Controladores de temperatura. 2. Chuveiros elétricos. 3. Chuveiros  
inteligentes. 4. Sistemas de controle. I. Rocha, Ronilson. II. Universidade  
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 658.5

Catlogação: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)

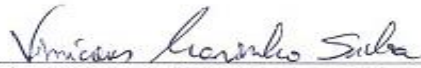
Monografia defendida e aprovada, em 11 de junho de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Ronilson Rocha – Orientador



M.Sc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira – Professor Substituto Convidado



M.Sc. Vinícius Marinho da Silva – Professor Substituto Convidado

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meu pai, por todo empenho, sacrifício e paciência para que eu pudesse prosseguir nos meus estudos e alcançar o título de Engenheiro de Controle e Automação, me dando a possibilidade de fazer algo que gosto e abrindo a possibilidade para que eu possa dar uma vida melhor a minha família.

A meu irmão Marcinho pelo exemplo de pessoa e profissional que se tornou para mim, tendo contribuído bastante para quem sou hoje.

A toda minha família, pelo apoio constante nos anos em que estive na universidade.

A República Pulgatório e aos que moraram comigo por todo aprendizado sobre a vida que obtive nesse lugar, tendo conhecido pessoas maravilhosas que cada uma com sua característica me ensinaram lições que levarei pelo resto de minha vida.

A todos os meus amigos que sempre estiveram presentes, entendendo minhas ambições de vida e me apoiando e mostrando que querem o melhor para mim, mesmo quando eu não soube o que era melhor para mim.

A Fundação Gorceix e a PRACE pela ajuda firme durante muitos anos para que eu pudesse me manter nos estudos. Foi fundamental para que eu alcançasse o lugar em que estou hoje.

A UFOP pelo ensino de qualidade técnica e por todo aprendizado que ela me proporcionou na área de controle e automação e nas experiências acadêmicas e republicanas, algo singular e especial para o que sou hoje.

## RESUMO

Nesse trabalho são abordados os chuveiros elétricos. A partir de estudos sobre a física do processo e dados adquiridos em testes práticos são inferidas informações sobre a dinâmica, validade de modelos matemáticos e parâmetros ligados à construção e projeto de controladores de temperatura para chuveiros elétricos. A planta é modelada como sistema SISO, sendo a tensão elétrica eficaz e a temperatura de saída, a entrada e saída do processo respectivamente. Para obter resultados e fundamentar conclusões foram realizadas simulações do sistema de atuação e das respostas do sistema de controle mais a planta. Através de estudos sobre efeitos causados por alterações na vazão sobre o controle da temperatura da água na saída do dispositivo, são embasadas conclusões importantes para o projeto de controladores para chuveiros elétricos seguidores de referência de temperatura para água na saída, que gerem economia de água e eletricidade e ofereça conforto térmico ao usuário.

***Palavras-chave:*** *chuveiros elétricos, Controle de temperatura, dinâmica, economia de água e eletricidade, projeto de controladores, seguidores de referência.*

## ABSTRACT

In this work the electric showers are approached. From the studies on process physics and data acquired in practical tests, information about the dynamics, validity of mathematical models and parameters related to the construction and design of temperature controllers for electric showers is inferred. The plant is modeled as SISO system, with the electrical voltage being effective and the output temperature, the process input and output respectively. To obtain results and to base conclusions were carried out simulations of the actuation system and the responses of the control system plus the plant. Through studies of effects caused by changes in flow rate on the control of the water temperature at the outlet of the device, important conclusions are based on the design of controllers for electric showers, system trackers for temperature output water, which generate water and electricity economy, providing thermal comfort to the user.

***Palavras-chave:*** *Electric showers, design of controllers, dynamic, systems trackers, water and electricity economy, temperature control.*

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

$Q$  = quantidade de calor sensível (*cal* ou *J*).

$c$  = calor específico da substância que constitui o corpo (*cal/g°C* ou *J/kg°C*).

$m$  = massa do corpo (*g* ou *kg*).

$\Delta\theta$  = variação de temperatura (*°C*).

$dq_{condução}$  = Taxa de transferência de calor por condução;

$k_{condução}$  = Constante de condutividade térmica, encontrada experimentalmente para cada material;

$A$  = Área de seção transversal a condução de calor;

$\partial T/\partial x$  = Gradiente de temperatura unidirecional (HOLMAN, 1983).

$q$  = Fluxo de calor, dado em *W/m<sup>2</sup>*,

$t_s$  = Temperatura da superfície de contato com o fluido,

$t_\infty$  = Temperatura do fluido na camada limite térmica,

$h$  = Coeficiente de transferência de calor por convecção dado em *W/m<sup>2</sup> \* K*.

$q_{radiação}$  = Taxa de transferência de calor por radiação térmica.

$\sigma$  = Constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann, determinada experimentalmente como  $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$ .

$\epsilon$  = Emissividade do corpo,

$\phi$  = Relação das áreas que recebem radiação.

$q$  = Taxa de fluxo de calor, *kcal/s*

$\tau$  = Constante de tempo.

$V_{rms}$  = Tensão eficaz.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fornecimento consolidado de energia elétrica (%), por classe consumidora em 2010 (ELETROBRÁS – Relatório de sustentabilidade) e Consumo de equipamentos residenciais (%). Fonte: Pesquisa na Classe residencial Procel-Eletróbrás 2007..	14
Figura 1.2 - Fonte: casa&construção Chuveiro elétrico 5500 W 220V Max Ducha Branco. .	15
Figura 1.3 - Preço da energia elétrica. Fonte: Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica).	15
Figura 1.4 - Ducha Digital Hydra Star Music sem Turbo 5500W 127V Branca. Fonte: Lojas Americanas. ....	16
Figura 2.1 - Forno resistivo. Fonte: Anluz, resistência cerâmica. ....	18
Figura 2.2 - Chuveiro elétrico e resistência. Fonte: Blukit Produtos. ....	19
Figura 2.3 – Calor liberado pelo efeito Joule. Fonte: Alienware. ....	21
Figura 2.4 - Tensão elétrica alternada. Fonte: eFísica.if.usp. ....	26
Figura 2.5 – Sinal distorcido por harmônicos. Fonte: Focus Engenharia elétrica. ....	27
Figura 2.6 - Ação de tiristores e TRIACs. Fonte: Radio Eletronics. ....	28
Figura 2.7 - Optoacoplador ou isolante ótico. Fonte: Bod Garage. ....	29
Figura 2.8 - Representação de um sistema dinâmico. Fonte: Research Gate. ....	29
Figura 2.9 - Sistema em malha fechada. Fonte: Ebah, Função de transferência. ....	33
Figura 2.10 - Sistema de controle. Fonte: Engenharia e Arquitetura. ....	34
Figura 2.11 - Curva de resposta em S adaptada. Fonte: Ogata (1982). ....	36
Figura 2.12 - Esquema de aquecedor por efeito Joule. Fonte: Ogata, 1982. ....	39
Figura 2.13 - Resposta de um sistema de 1ª ordem a um degrau unitário. ....	41
Figura 2.14 - Curva relacionando a temperatura medida e a tensão gerada por essa temperatura. Fonte: Termopares.com. ....	44
Figura 2.15 - Sinal senoidal contínuo em vermelho e valores amostrados em azul. Fonte: Embarcados.com: Entenda o processo de amostragem. ....	45
Figura 2.16 - Sinal amostrado e segurado por um segurador de ordem zero. Fonte: Embarcados.com: Entenda o processo de amostragem. ....	46
Figura 3.1 - Representação de um termopar genérico. Fonte: Embarcados.com	48
Figura 3.2 - Ligação termopar tipo K – CI. Fonte: Datasheet MAX6675. ....	49
Figura 3.3 - TRIACs de alta potência. Fonte: Anterwell Technology. ....	49
Figura 3.4 - Isolamento elétrico entre os circuitos de comando e de potência. ....	50
Figura 3.5 - Arduino UNO. Fonte: Module143. ....	51

Figura 4.1 - Calibração dos termopares.....	53
Figura 4.2 - A Termopar acoplado a saída do chuveiro. B- Termopar acoplado a saída de torneira.....	54
Figura 4.3 - Curvas de resposta de temperatura da saída para entrada em degrau de tensão elétrica para diferentes vazões.....	55
Figura 4.4 - Curvas de temperatura para vazão inferior.....	56
Figura 4.5 - Curvas de temperatura para vazão superior.....	57
Figura 4.6 - Validação do modelo para limite superior de vazão.....	60
Figura 4.7 - Validação do modelo para limite inferior de vazão.....	60
Figura 4.8 - Circuito elétrico no Proteus.....	61
Figura 4.9 - Resposta do circuito de acionamento no software Proteus.....	62
Figura 4.10 - Resposta para degrau sobre o sistema em malha aberta.....	64
Figura 4.11 - Simulação do chuveiro em malha aberta sujeito a um distúrbio de vazão.....	65
Figura 4.12 - Resposta do chuveiro em vazão máxima a um degrau de tensão de 220 Vrms sujeito a distúrbio que o altera para vazão mínima no instante de 100 segundos.....	66
Figura 4.13 - Simulação do sistema de controle implantado ao chuveiro elétrico sujeito a distúrbio.....	67
Figura 4.14 - Sinal de temperatura de saída do chuveiro no tempo para o chuveiro sujeito a uma entrada de referência de 40°C e sujeito a distúrbio no instante de 100 segundos.....	67
Figura 4.15 - Sinal de entrada no chuveiro para ganho fixo.....	68
Figura 4.16 - Simulação da planta juntamente com o sistema de controle no Simulink.....	68
Figura 4.17 - Temperatura da água na saída do chuveiro controlado.....	69
Figura 4.18 - Sinal de entrada (Tensão eficaz) a que o chuveiro é submetido.....	69
Figura 6.1 - Registro de pressão para chuveiros e motor de passo. Fontes: Casa&Construção e Filipeflop.....	75
Figura 6.2 - Sistema de aquecimento solar de água. Fonte: Universidade do sol.....	76

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2-1 - Propriedades físicas de elementos resistivos. ....	22
Tabela 2-2 - Sintonia por 1º método de Ziegler-Nichols.....	37
Tabela 4-1 - Cálculo de ganhos para diferentes vazões.....	58
Tabela 4-2 - Cálculo de constantes de tempo para diferentes vazões. ....	58

## SUMÁRIO

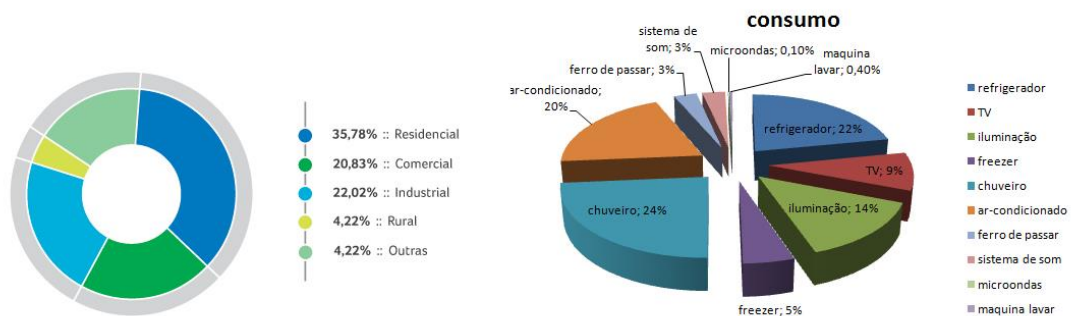
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	9
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	11
<b>SUMÁRIO</b> .....	12
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Objetivo geral .....	16
1.2 Objetivos específicos .....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1 Aquecedores e fornos elétricos .....	18
2.1.1 Fornos resistivos .....	19
2.2 O efeito Joule .....	20
2.2.1 Resistência elétrica .....	21
2.3 Transferência de calor do elemento resistivo para o sistema.....	22
2.3.1 Condução .....	22
2.3.2 Convecção .....	23
2.3.3 Radiação .....	24
2.4 Controle de potência de aquecedores resistivos .....	25
2.4.1 Tensão Alternada.....	26
2.4.2 Controle de potência aplicado a corrente alternada.....	27
2.5 Análise de sistemas dinâmicos e projetos de controle .....	29
2.5.1 Modelagem matemática de sistemas .....	29
2.5.2 A transformada de Laplace e suas aplicações .....	30
2.5.3 Sistemas de controle .....	32
2.5.4 Compensação de sistemas .....	33
2.5.5 Ações de controle .....	34
2.5.6 Sintonia de controladores PID.....	36
2.6 Modelagem matemática aplicada a sistemas térmicos.....	37
2.6.1 Modelagem matemática para sistemas térmicos baseada na física do processo	37
2.6.2 Modelagem matemática por identificação de sistemas .....	40
2.6.3 Identificação de sistemas térmicos .....	42
2.7 Medição e aquisição de temperatura.....	43
2.8 Processamento de sinais e sistemas discretos .....	44
2.8.1 Transformada Z e período de amostragem .....	46
<b>3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS</b> .....	48

3.1	Chuveiro elétrico.....	48
3.2	Aquisição de temperatura .....	48
3.3	Circuito Dimmer (controle de potência para tensão alternada) .....	49
3.4	Arduino UNO .....	50
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>52</b>
4.1	Medição de temperatura na prática .....	52
4.2	Ensaio com degrau de tensão máxima como entrada.....	53
4.3	Atuador no controle de potência para o chuveiro .....	61
4.4	Transformação do sinal de pulso em valor de Tensão eficaz .....	62
4.5	Projeto do controlador PI.....	63
4.6	A simulação do sistema do chuveiro elétrico sujeito a distúrbio.....	64
4.6.1	Simulação sistema em malha aberta.....	64
4.6.2	Simulação da planta controlada.....	66
4.6.3	Sistema de controle para chuveiro com troca de ganhos em controladores .....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
5.1	Considerações sobre a vazão .....	70
5.2	Projeto de controlador SISO .....	71
5.3	Conclusões sobre eletrônica e instrumentação .....	72
5.4	Geral.....	73
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
6.1	Acionamento e comunicação com o chuveiro .....	74
6.2	Controle de vazão de água .....	75
6.3	Maximização da temperatura do líquido na entrada em regime permanente .....	76
6.4	Aplicação de IoT para gerar inteligência sobre o processo .....	77
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No mundo contemporâneo os sistemas de aquecimento de água são utilizados em diferentes setores da sociedade. Desses, o âmbito residencial consome uma parte considerável de recursos. O estudo sobre aquecimento de água para banho conduz pesquisas e dita diretrizes que visam economia de energia e redução do consumo nas horas de sobrecarga da rede elétrica. Existem diversos fatores que influenciam no consumo de água quente no Brasil, não somente fatores como condições climáticas e expansão de novas tecnologias, mas também o hábito dos consumidores. O fator “humano” tem grande peso no consumo de energia (BRECHT, 2016).

Aquecedores elétricos, especialmente os resistivos, têm maior eficiência energética e oferecem benefícios também na parte de operação, acionamento e controle. Eles operam tendo como fundamento o Efeito Joule e os benefícios de um controle adequado de temperatura da água, é legítimo avaliar o quanto esse dispositivo impacta no consumo de energia elétrica nacional.



**Figura 1.1 - Fornecimento consolidado de energia elétrica (%), por classe consumidora em 2010 (ELETROBRÁS – Relatório de sustentabilidade) e Consumo de equipamentos residenciais (%). Fonte: Pesquisa na Classe residencial Procel-Eletróbrás 2007..**

Analisando os gráficos apresentados na figura 1.1 é possível observar o quanto cada setor da sociedade contribui em média no consumo da energia elétrica total produzida no Brasil. O setor residencial foi o que mais consumiu, com 35,78% em 2010 e o consumo de eletricidade por equipamento é mostrado também na figura 1. O chuveiro elétrico é o maior consumidor e isso é um excelente indicador de onde engenheiros e pesquisadores podem atuar para obter economia de energia.

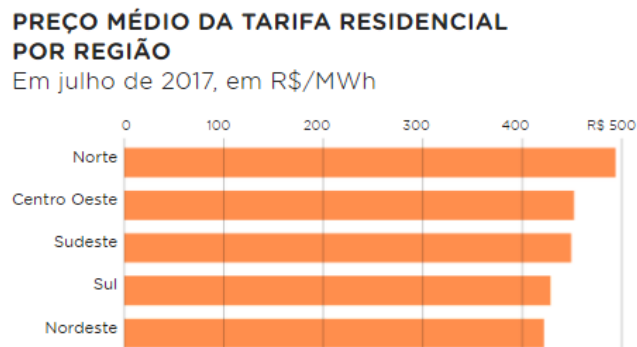
Na maioria dos chuveiros elétricos é possível realizar um ajuste de temperatura alterando a posição da chave que se encontra na frente do dispositivo. Isso é exemplificado na figura 1.2. Assim a resistência do chuveiro é alterada e ele passa a operar dissipando com valores diferentes de potência.



**Figura 1.2 - Fonte: casa&construção Chuveiro elétrico 5500 W 220V Max Ducha Branco.**

Além disso, normalmente o usuário realiza um ajuste fino variando a vazão de água por regulagem do registro. O resultado dessa ação é o uso de energia e água, sem qualquer controle e conseqüentemente desperdícios.

Um chuveiro com sistema de controle de temperatura difundido traria economia de eletricidade e água, gerando ganhos ao consumidor. O preço médio da energia elétrica por região em julho de 2017 é apresentado na figura 1.3.



**Figura 1.3 - Preço da energia elétrica. Fonte: Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica).**

Assim sendo, o dispositivo proposto neste trabalho, embora necessite de desenvolvimento, pode se tornar viável no futuro. Com a implementação de sistemas de controle adequados, aquisição e transmissão de dados e com funções de inteligência sobre o processo é possível tornar um banho mais confortável, flexível e econômico.

A capacidade do sistema de fornecer a escolha da temperatura da água para um banho é atraente e um dispositivo que agrega essa função pode ajudar inclusive na saúde de pele do

usuário. Um fato conhecido pelos médicos é que banhos a altas temperaturas prejudicam a epiderme, desidratando-a.

Atualmente é possível encontrar duchas e chuveiros elétricos no mercado com controle de temperatura e as mais variadas funções. Um exemplo é o chuveiro mostrado na figura 1.4. Ele possui display, controle remoto para comunicação e funções como o controle de temperatura e vazão. Apesar da existência de tecnologias para o que é proposto aqui, um estudo do processo e construção modular do sistema oferece grandes vantagens para o desenvolvimento da tecnologia.



**Figura 1.4 - Ducha Digital Hydra Star Music sem Turbo 5500W 127V Branca. Fonte: Lojas Americanas.**

Um sistema de controle de temperatura para chuveiros composto de circuito de acionamento e controle de potência elétrica, sensor de temperatura e microcontrolador pode ser alterado com adição de hardware e alterações no software. Isso abre caminho para evolução do projeto, podendo este ter a adição de válvulas controladoras de vazão e transmissores Wi-Fi para enviar e receber dados, oferecendo infinitas aplicações no campo da Internet das coisas e controle ótimo.

### 1.1 Objetivo geral

Nesse trabalho pretende-se fazer uma ampla pesquisa sobre a análise de sistemas dinâmicos com ênfase em aquecedores resistivos. Através de estudos sobre o processo e comportamento de sistemas térmicos, aquecedores elétricos e escoamento de fluidos, embasar conclusões sobre o processo, estrutura dos modelos matemáticos e identificação destes. Por fim almeja-se aqui aplicar as informações obtidas na análise de um caso prático para obter o modelo matemático e a partir dele projetar um controlador de temperatura para um chuveiro elétrico,



considerando os parâmetros consumo de eletricidade, água e o conforto térmico oferecido ao usuário do chuveiro.

## 1.2 Objetivos específicos

De forma mais detalhada os objetivos deste trabalho são:

- Realizar um estudo sobre análise de sistemas de controle genéricos, parâmetros envolvidos no processo de aquecimento de água em chuveiros elétricos e modelos matemáticos associados e projeto de compensadores, através de material disponível na bibliografia.
- Utilizar de estudos teóricos, ensaios práticos, análise de dados obtidos e comportamentos resultantes para aumentar o conhecimento sobre dispositivos e circuitos eletrônicos de alta e baixa potência, circuitos de acionamento, aquisição de temperatura e aplicação de microcontroladores.
- Projetar controlador discreto de temperatura para um chuveiro para este seguir uma referência com erro em regime permanente nulo e rejeição a distúrbios de vazão.
- Analisar o sistema de controle mais a planta, ambos construídos por simulação com uso do software MATLAB e sua ferramenta SIMULINK.
- A partir dos resultados e conclusões obtidas na construção deste trabalho, embasar trabalhos futuros que melhorem quesitos como economia de eletricidade, água e melhoria do conforto térmico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aquecedores e fornos elétricos

Aquecedores são dispositivos que têm a função de aquecer um fluido para ser utilizá-lo em diferentes finalidades. Eles costumam ser caracterizados pela forma de energia que produz o calor ou pelo processo envolvido. Em muitos casos a eletricidade é usada como fonte de energia, devido a características de emissões de gases, controle e outros. Um equipamento que faz uso de aquecedores para suas finalidades são os fornos. Estes são projetados para gerar calor e transferi-lo a corpos posicionados no interior destes. Além de fornecer calor aos corpos no interior do forno os aquecedores devem ser capazes de suprir as perdas para o ambiente externo, ocasionadas por vazamentos (GAIEWSKI, et al., 2015).



**Figura 2.1 - Forno resistivo. Fonte: Anluz, resistência cerâmica.**

A figura 2.1 mostra um forno elétrico aquecido por resistências (filamento incandescente em seu interior) e vedado ao vazamento de calor por um material cerâmico.

Existem três formas de aquecimento que utilizam a energia elétrica como fonte. São elas:

- Aquecimento com uso de elementos resistivos (Fornos resistivos);
- Aquecimento por arco elétrico (Fornos de arco direto);
- Aquecimento por correntes induzidas (Fornos de indução).

O que diferencia cada um desses fornos é o modo de aquecimento. Apesar do fundamento em ambos serem o efeito Joule cada um deles utiliza processos diferentes e isso modifica substancialmente as características e modos de operação para cada um.

### 2.1.1 Fornos resistivos

Os fornos resistivos são formados por três elementos principais, a câmara de aquecimento, os elementos resistivos e a carcaça metálica. Cada um desses elementos deve possuir características específicas, de acordo com as aplicações do forno (GUERRA, 2006).

Um forno nada mais é do que um aquecedor envolvido de uma câmara vedada a fuga de calor e, por consequência diversas considerações feitas aqui sobre fornos resistivos também são válidas para aquecedores resistivos.

Os dispositivos que utilizam o efeito Joule como mecanismo de aquecimento podem ser divididos em dois grupos. No primeiro o elemento resistivo é o material que se deseja aquecer e por isso essa forma de aquecimento é chamada direta. Nesse tipo de equipamento as características elétricas do material têm relação direta com o processo de aquecimento e seu desempenho. O segundo grupo de dispositivos utiliza-se do aquecimento indireto. Neste o elemento resistivo é um componente do aquecedor. Ele tem a função de produzir calor e transmiti-lo ao corpo alvo do aquecimento. Neste caso a transferência de calor entre o elemento resistivo e o corpo que se deseja aquecer se dá através dos mecanismos de transferência de calor (GAIEWSKI, et al., 2015).

O aquecimento direto tem aplicação restrita, devido à dependência de propriedades elétricas do material a ser aquecido. Por outro lado, no aquecimento indireto a dependência de propriedades elétricas do elemento a ser aquecido não existe, dando a esse dispositivo um número maior de aplicações.



**Figura 2.2 - Chuveiro elétrico e resistência. Fonte: Blukit Produtos.**

O aquecimento resistivo indireto é o princípio de dos chuveiros elétricos, (figura 2.2). A resistência elétrica é aquecida por efeito Joule e a temperatura da água que circula através dela tende a aumentar para se igualar a temperatura da mesma. A forma de energia que é transportada de corpos de temperatura maior para corpos de temperatura menor, para que

esses atinjam o equilíbrio térmico, é denominada calor. A ciência que estuda os mecanismos de transferência é chamada Transferência de Calor (CENGEL, et al., 2012).

## 2.2 O efeito Joule

Para Potter (2017), a termodinâmica é a área da ciência que estuda o armazenamento, a transformação e a transferência de energia entre as diferentes formas em que esta se manifesta. Um dos cientistas que mais contribuiu para termodinâmica foi James Prescott Joule (1818 – 1889). Ao longo de 35 anos ele desenvolveu métodos científicos, buscando encontrar a quantidade de energia mecânica equivalente ao calor. Durante esse tempo ele aperfeiçoou metodologias para dar maior precisão a seus resultados.

O parâmetro Calor específico ( $c$ ), tido com uma propriedade de meios materiais ou substâncias é a dado como a quantidade de calor necessária para alterar a temperatura de uma quantidade específica de massa. Isso fica evidente após a observação da grandeza e sua unidade de medida,  $1 \frac{cal}{g \cdot ^\circ C}$ . Logo, que para elevar em  $1^\circ C$  a quantidade de 1 grama de água, é necessária 1 caloria.

A equação fundamental da Calorimetria relaciona a quantidade de calor sensível ( $Q$ ) ao produto entre as parcelas massa do corpo, variação da temperatura e a constante de proporcionalidade dependente da natureza de cada corpo. Este último termo corresponde ao calor específico (SOFISICA, 2017). A representação matemática disso em vista na equação 2.1.

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta \quad (2.1)$$

Para redução na incerteza do valor de energia mecânica equivalente ao calor a precisão cada vez maior dos calores específicos de diferentes substâncias era fundamental. Assim, o método encontrado com melhores resultados por James P. Joule e que levou seu nome, Efeito Joule, consistia na dissipação de calor de um corpo atravessado por uma corrente elétrica (MARTINS, 2013).

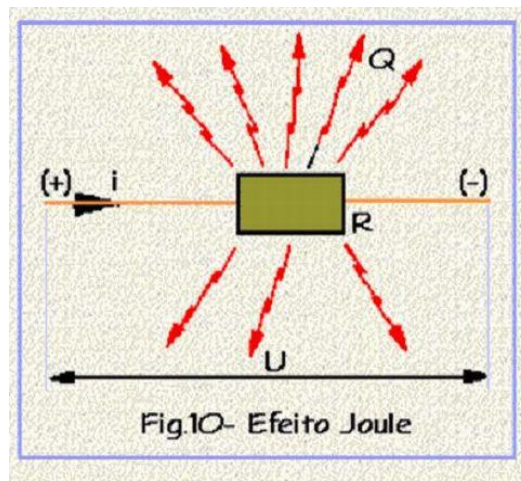
A quantidade de calor  $Q$  dissipada por uma corrente elétrica de intensidade  $i$  que flui por um fio de resistência elétrica  $R$ , durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  é dada pela equação 2.2.

$$Q = Ri^2\Delta t \quad (2.2)$$

A equação de dissipação de calor em um condutor devido ao efeito Joule pode ser expressa pela equação integral (2.3), podendo assim descrever situações nas quais a corrente elétrica varia no tempo.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} R * i(t)^2 * dt \quad (2.3)$$

A figura 2.3 mostra como a dissipação de calor por efeito Joule ocorre, esquematicamente.



**Figura 2.3 – Calor liberado pelo efeito Joule. Fonte: Alienware.**

O tempo decorrido entre a descoberta de Joule e o surgimento dos primeiros aquecedores resistivos justifica-se pela necessidade de avanços tecnológicos em outras áreas.

### 2.2.1 Resistência elétrica

No campo a engenharia de materiais, foi preciso desenvolver ligas metálicas com características específicas, que suportassem altas temperaturas e tensões.

Em 1905, Albert Marsh descobriu o Nicromo, sendo esta primeira liga metálica usada como elemento resistivo. Essa liga era trezentas vezes mais forte do que elementos resistivos encontrados até então. Ainda hoje a liga Nicromo é usada em inúmeros aquecedores elétricos, tais como chuveiros e ferros elétricos, fornos e outros (Marathonheater, 2009).

A tabela 2-1 mostra a resistividade e o ponto de fusão de diferentes materiais, auxiliando engenheiros e projetistas na escolha de qual material utilizar como elemento resistivo para uma aplicação específica, pesando os fatores cumprimento de critérios de desempenho do

processo, condições as quais o material é submetido, durabilidade e custo de cada material (CESTILE, 2012).

**Tabela 2-1 - Propriedades físicas de elementos resistivos. Fonte: Cestile, 2012.**

Material	Composição	Resistividade	Ponto de fusão (°C)
Nicromo	Ni-Fe-Cr	1,1221	1350
Nicromo V	Ni-Cr	1,0806	1400
Cromax	Fe-Ni-Cr	0,9975	1380
Nirex	Ni-Cr-Fe	0,9809	1395
Nilvar	Fe-Ni	0,8046	1425
Bronze comercial	Cu-Zn	0,0415	1040
Ni puro	Ni	0,0997	1450
Platina	Pt	0,1060	1773
Aço	Fe	0,0999	1535
Zinco	Zn	0,0592	419
Molibdênio	Mo	0,0569	2625
Tungstênio	W	0,0552	3410
Alumínio	Al	0,0267	660
Ouro	Au	0,0242	1063
Cobre	Cu	0,0172	1083
Prata	Ag	0,0163	960

Fonte: Cestile, 2012.

### 2.3 Transferência de calor do elemento resistivo para o sistema

A termodinâmica estuda quantidades de energia necessárias para mudança de estado em um sistema. Contudo as taxas de transmissão desse calor no tempo, ou seja, a velocidade na qual o processo acontece é detalhada na ciência da Transferência de calor. Essa área suplementa a primeira e segunda lei da termodinâmica com leis empíricas e teóricas sobre mecanismos de transferência de calor que descrevem quantitativamente o processo de transporte (HOLMAN, 1983).

Aquecedores devem produzir calor e transmiti-lo a um fluido. Para uma análise desses dispositivos a abordagem mais comum e eficaz é balanço de energia do sistema. Uma análise em cima das quantidades de calor gerado e das taxas de transferência envolvidas no processo apontam caminhos para equipamento ótimo em termos de custo e eficiência.

#### 2.3.1 Condução

Em um corpo rígido regiões onde existe gradiente de temperatura, ou seja, variações desse parâmetro ao longo do corpo possibilitam o transporte de calor da região mais quente para região mais fria, para que o corpo atinja o equilíbrio térmico. Esse mecanismo é denominado condução e a taxa de transferência de calor por unidade de área nesse mecanismo é

proporcional ao gradiente normal de temperatura. Essa relação é descrita, considerando-se um problema unidimensional como está expresso na equação 2.4 (HOLMAN, 1983).

$$\partial q = -k * A * \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Convecção

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. O primeiro deles corresponde ao movimento molecular aleatório (difusão) e o segundo envolve o transporte macroscópico de porções do fluido. Este movimento macroscópico está associado a escoamentos forçados, causados por fatores externos como ventiladores, bombas ou compressores, ou naturais, consequência de alterações em propriedades do fluido e forças de empuxo. Essa porção de fluido em movimento, quando submetido a diferenças de temperatura, contribui na transferência de calor no sistema (INCROPERA, et al., 2008).

Como a convecção abrange o amplo campo de estudos, a análise de casos diferentes dos aplicados aqui é desnecessária. Para a convecção forçada a transferência de calor é dada pela equação 2.5.

$$q = h(t_s - t_\infty) \quad (2.5)$$

Portanto, o coeficiente de transferência  $h$  é fundamental na taxa de transporte de calor. Contudo, segundo Incropera et al. (2008), o problema é complexo, já que envolve inúmeros parâmetros dos fluidos, tais como a massa específica, viscosidade, condutividade térmica, calor específico, e também funções da geometria da superfície aquecida e condições de escoamento. No caso de um escoamento forçado, uma tarefa importante é a análise do tipo de escoamento, se laminar ou turbulento.

Para Holman (1983), o fluido pode se comportar de maneira aleatória dependendo de suas propriedades e das condições de escoamento. Esse comportamento está associado as camadas limite de velocidade e térmica do escoamento. Ele passa de um escoamento laminar, no qual os vetores de velocidade das partículas de fluido são paralelos, para condições nas quais pequenas perturbações são amplificadas, sendo propagadas de maneira não linear através do fluido. Esse tipo de escoamento é denominado turbulento. Uma maneira empírica encontrada para determinar o tipo de escoamento é através do número de Reynolds, uma grandeza

adimensional desde que as unidades de medidas sejam coerentes. Esse número relaciona os parâmetros velocidade além da camada limite ( $u_{\infty}$ ), a massa específica ( $\rho$ ) e a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e o diâmetro do tubo no qual ocorre o escoamento ( $x$ ). Essa grandeza é dada pela equação 2.6.

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot x \cdot \rho}{\mu} \quad (2.6)$$

Com experimentos efetuados e a análise do escoamento resultante quando o sistema é submetido a determinadas situações, foram obtidas faixas nas quais o número de Reynolds determina se o escoamento é laminar, está em transição ou é turbulento. Além dos parâmetros vistos acima devem ser consideradas também características como a superfície, geometria e rugosidade do tubo no qual ocorre o escoamento. No caso em que o escoamento é turbulento, ocorrem alterações expressivas em propriedades do fluido tais como a viscosidade, condutividade térmica, difusividade e outros parâmetros (HOLMAN, 1983).

Portanto, em aquecedores onde há escoamento forçado do fluido sobre o aquecedor parâmetros do escoamento são fundamentais. Eles influenciam diretamente no coeficiente de transferência e podem alterar caoticamente o desempenho do escoamento caso o regime deste seja alterado. Os modelos matemáticos que descrevem o processo devem levar isso em conta, preservando assim sua validade.

### 2.3.3 Radiação

O terceiro mecanismo de transferência de calor é a radiação térmica. Neste a transferência de calor é feita por ondas eletromagnéticas, não havendo a necessidade de um meio natural (matéria) para que ele ocorra. A radiação eletromagnética que é propagada devido à diferença de temperatura entre dois corpos é denominada radiação térmica. Através de leis termodinâmicas é possível mostrar que, para um corpo negro a emissão de calor por radiação é proporcional à diferença de temperatura em sua quarta potência (HOLMAN, 1983).

Portanto a taxa de transferência por radiação de um corpo negro pode ser expressa pela equação 2.7.

$$q = \sigma(\Delta T)^4 \quad (2.7)$$

Um corpo negro pode ser definido, segundo Antunes (2012), como um meio ou substância no qual toda e qualquer radiação incidente é absorvida, ou seja, não importando o ângulo de



incidência, comprimento de onda ou polarização da radiação recebida. Assim qualquer onda eletromagnética que incide sobre um corpo negro é absorvido pelo corpo e nada é refletido.

É importante salientar que um corpo negro é algo ideal, ou seja, na realidade existem apenas aproximações deste. Portanto, deve-se considerar a natureza cinzenta dos corpos. Para isso o termo emissividade, representado pelo parâmetro  $\epsilon$  na equação 2.8 foi incluído. Outro fator de influência sobre o fenômeno de radiação térmica está relacionado ao fato de que parte da radiação emitida por um corpo não atinge a segunda superfície. Isso porque acontecem perdas para o ambiente causadas por características da propagação de ondas eletromagnéticas e fatores geométricos das superfícies. Logo, é necessário levar essa questão também em conta para os cálculos da transferência de calor por radiação (HOLMAN, 1983).

Assim sendo, são incorporados na equação de transferência de calor por radiação os termos,  $\epsilon$  para emissividade e  $\phi$  para o fator geométrico.

$$q = \epsilon \cdot \phi \cdot \sigma \cdot (\Delta T)^4 \quad (2.8)$$

A análise dos mecanismos de transferência de calor descritos acima é de suma importância porque contribuem significativamente para compreensão dos aquecedores resistivos indiretos. É válido lembrar que o calor proveniente do elemento resistivo, devido ao efeito Joule, em aquecedores, é transmitido a um fluido e, portanto o conhecimento dos meios de transferência é essencial para tornar o processo mais eficiente.

#### 2.4 Controle de potência de aquecedores resistivos

Em fornos elétricos, nos quais o objetivo é controlar a temperatura em seu interior o ideal é criar-se um sistema de controle realimentado. Para Guerra (2006) um forno com temperatura interna controlada deve conter os três elementos listados abaixo.

- Sensores para medir a temperatura no interior do forno. Geralmente são usados termopares, devido a características vistas mais adiante neste trabalho.
- Controladores que leiam o sinal de saída (temperatura) enviado pelo sensor, calculem o sinal de erro, utilizando-se do valor lido e da referência, e gerem o sinal de saída para o atuador.
- Atuadores que recebam o sinal de controle proveniente do controlador e ajam sobre o elemento resistivo do forno controlando a tensão elétrica aplicada. Geralmente são usados relés, tiristores, transistores.

### 2.4.1 Tensão Alternada

Um sinal elétrico pode apresentar diferentes formas, dependendo de sua fonte ou uso. Na maioria das aplicações usa-se corrente contínua, na qual o sinal possui valor constante ao longo do tempo. Outra forma de sinal muito comum é a alternada ou CA. Esse nome se deve a característica do sinal em alternar o módulo e sentido ao longo do tempo. O sinal fornecido pelas concessionárias de energia é alternado e possui a forma de uma senóide. Isso é conveniente já que os alternadores presentes nas usinas geram sinais nesse formato, não havendo necessidade de alterar a forma da onda. As redes de transmissão de eletricidade também apresentam menores perdas por efeito Joule (ALMEIDA, 2009).

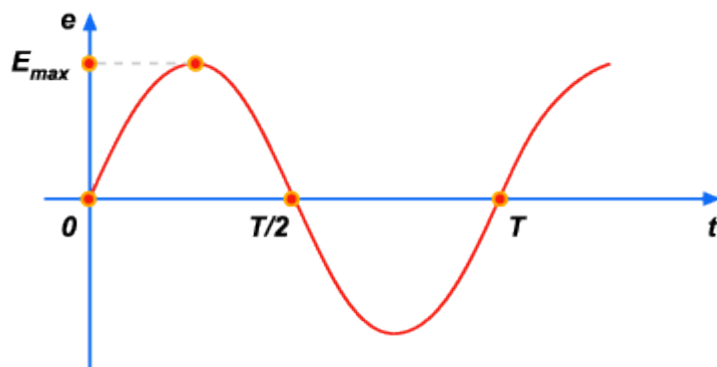


Figura 2.4 - Tensão elétrica alternada. Fonte: eFísica.if.usp.

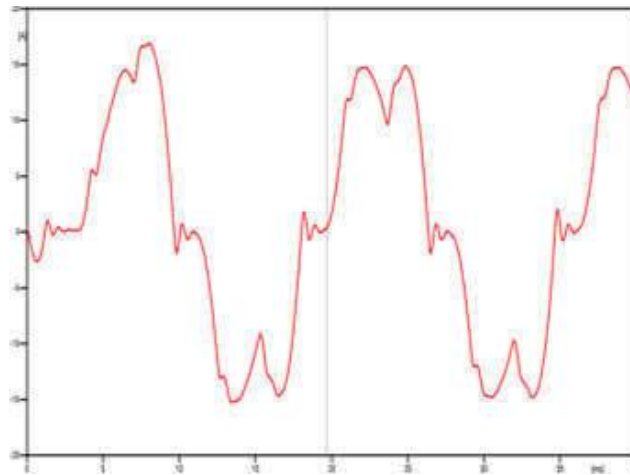
Na figura 2.4 é representada uma tensão elétrica senoidal, que possui valor de pico  $V_{pico}$ , um período de  $t$  unidades de tempo e uma frequência  $f = 1/t$ . Em sinais periódicos o valor eficaz corresponde ao valor de tensão contínua que dissipa a mesma quantidade de calor por efeito joule que o sinal periódico correspondente. Esse valor eficaz é dado pelo valor médio quadrático do sinal da tensão de pico pela equação 2.9. Para sinais senoidais com a tensão eficaz é dada por  $V_{ef} = V_p / \sqrt{2}$  (MATTEDE, 2018).

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{V_p^2}{T} \int_{\alpha}^{\pi} (\sin \theta)^2 d\theta} \quad (2.9)$$

No Brasil, devido a sua extensão territorial, a tensão fornecida pelas concessionárias possui a característica de tensão eficaz de 220 volts e frequência de 60 hertz. No trajeto da energia elétrica, entre a usina e uma residência, para reduzir as perdas por efeito Joule e custos com condutores, a tensão é elevada. Na transmissão de uma mesma potência elétrica por uma rede

elétrica, portanto, linhas com tensões elevadas oferecem menor custo de transmissão. Contudo, esse sinal pode ser distorcido, causando problemas como ruídos audíveis, irritação visual, aquecimento em transformadores e geradores e ressonância elétrica em linhas de distribuição (Marathonheater, 2009).

A ocorrência de harmônicos altera a forma de sinais senoidais provenientes da rede. Segundo Silva (2004) estes são compreendidos como sinais de menor amplitude e frequência múltipla inteira da componente fundamental do sinal senoidal. Os harmônicos têm como causa o uso de cargas não lineares como motores elétricos e chaves estáticas. A figura 2.5 mostra um sinal proveniente da rede distorcido por componentes harmônicos.



**Figura 2.5 – Sinal distorcido por harmônicos. Fonte: Focus Engenharia elétrica.**

#### 2.4.2 Controle de potência aplicado a corrente alternada

Para o controle de potência elétrica sobre um elemento resistivo as equações de Ohm são usadas. A equação 2.10 apresenta as relações da potência ( $Pot$ ) com a tensão fornecida  $V$  e a resistência  $R$ .

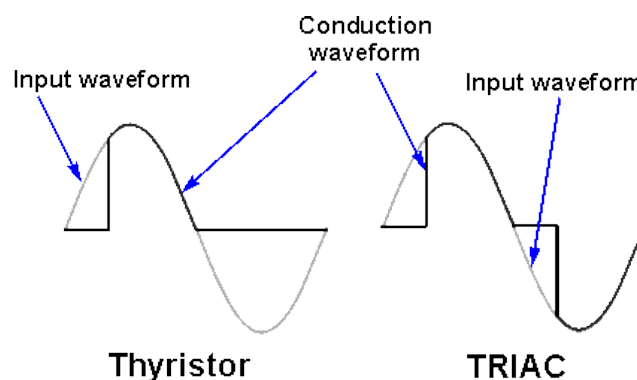
$$Pot = \frac{V^2}{R} \quad (2.10)$$

A potência elétrica é diretamente proporcional ao quadrado da tensão eficaz a que o elemento resistivo é submetido. Portanto, deve-se focar no estudo de métodos para controlar a tensão elétrica alternada, sinal alimentado pela rede.

Um dispositivo utilizado para controle de potência elétrica dissipada em lâmpadas são os Dimmers. As lâmpadas consistem em cargas resistivas e a tensão elétrica eficaz aplicada sobre elas tem relação direta com a intensidade de seu brilho. Assim sendo, o dimmer atuando

sobre a tensão elétrica eficaz viabiliza o controle sobre de luminosidade e podendo fornecer economia de eletricidade (MUNDO DA ELÉTRICA, 2017).

Os dimmers atuais utilizam um dispositivo denominado TRIAC (Triodo de corrente alternada). Um TRIAC é um semicondutor que atua como interruptor de sinais alternados. Ele permite a condução do sinal somente após o pulso de controle e a interrompe no momento que a tensão passa pelo nível zero volts, sendo necessário outro pulso para que o dispositivo conduza novamente. O TRIAC é um semicondutor bidirecional, ou seja, permite a condução nos dois sentidos, o que o difere de um tiristor comum (MUNDO DA ELÉTRICA, 2017).

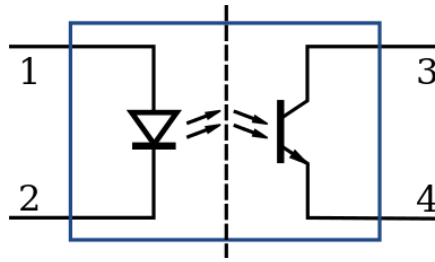


**Figura 2.6 - Ação de tiristores e TRIACs. Fonte: Radio Eletronics.**

O TRIAC, devido a suas características, é adequado para tarefa de controle de cargas elétricas de alta potência, pois comporta a passagem de altas correntes e valores elevados de tensão, sendo controlado por sinais de pequena amplitude. Eles são usados geralmente para acionamento de motores de indução de baixa potência e para controle de luminosidade em lâmpadas e de aquecimento em dispositivos que se utilizam do efeito Joule para isso (NOVA ELETRÔNICA, 2017). Tiristores e de TRIAC são comparados em seu funcionamento na figura 2.6.

Um TRIAC pode ser utilizado para fazer o controle de potência de grandes cargas. Porém, deve ser considerada a necessidade de isolar o circuito de potência e o circuito de controle, para maior segurança contra surtos de tensão e corrente.

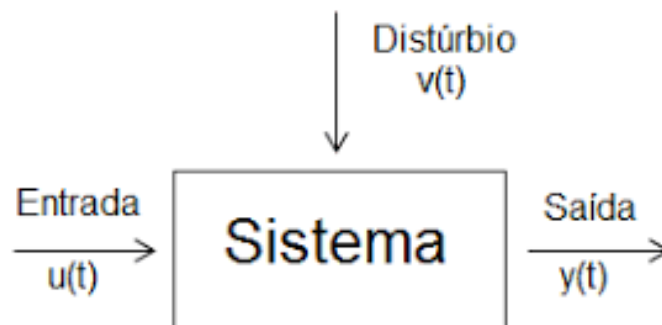
Uma maneira de proteger o circuito de controle é através de acopladores ópticos ou optoacopladores. Esses dispositivos têm a característica de transmitir sinais elétricos por meio de sinais ópticos. Um diodo emissor gera sinais de luz quando submetido a sinais de tensão. Esse sinal de luz é capturado do outro lado, fazendo com que o circuito de alta potência conduza. Esse fato acarreta no isolamento contra surtos entre um lado e outro do dispositivo (FUTURE ELETRONICS, 2017). A figura 2.7 ilustra essa ação.



**Figura 2.7 - Optoacoplador ou isolante óptico. Fonte: Bod Garage.**

## 2.5 Análise de sistemas dinâmicos e projetos de controle

Para Rodrigues (1996), sistemas dinâmicos são aqueles nos quais o sinal de saída  $y(t)$  é dependente do sinal de entrada no tempo atual,  $u(t)$ , mais a evolução temporal dos sinais de saída e de entrada. A figura 2.8 mostra um sistema dinâmico genérico que também pode estar sujeito a sinais de distúrbio  $v(t)$ .



**Figura 2.8 - Representação de um sistema dinâmico. Fonte: Research Gate.**

Quando se trata da análise de sistemas dinâmicos, uma ferramenta muito útil são os modelos matemáticos. Estes são constituídos por equações que conseguem descrever matematicamente como a saída de um sistema se comportará ao longo do tempo. Modelos matemáticos são capazes de descrever a maioria dos sistemas dinâmicos, sejam eles mecânicos, hidráulicos, elétricos, térmicos, biológicos ou econômicos. Conhecendo a entrada e o modelo matemático do sistema é possível encontrar o sinal de saída no tempo  $y(t)$ , bastando resolver as equações diferenciais (OGATA, 1982).

### 2.5.1 Modelagem matemática de sistemas

Para análise de sistemas dinâmicos existem duas maneiras de obter os modelos matemáticos. Pode ser feita com o auxílio de conhecimentos sobre a física do processo ou pelo uso de técnicas de identificação de sistemas. Na primeira abordagem o analista trabalha com leis

teóricas consolidadas e aplicação de ferramentas matemáticas de áreas como a geometria, para encontrar as equações diferenciais que descreverão o comportamento do sistema. Na identificação de sistemas faz-se aquisição de dados do processo em questão e utiliza estruturas matemáticas mais as informações recolhidas para construção do modelo matemático. Na busca por modelos matemáticos que descrevam o processo com boa precisão, tenham ampla faixa de validade e complexidade baixa, as duas abordagens acima são complementares. Isso porque, quando usadas individualmente, a primeira pode se tornar uma tarefa extremamente difícil e trabalhosa e a segunda pode não ser suficiente (RODRIGUES, 1996).

Sistemas dinâmicos têm sua saída composta por duas partes, a resposta transitória,  $c_{tr}(t)$ , e a resposta estacionária  $c_{ss}(t)$ . A resposta transitória é a parte na qual o sinal está se movendo do estado inicial para o estado final. A resposta estacionária ou em regime permanente corresponde ao comportamento do sistema quando ele atinge um estado de equilíbrio, para tempos grandes quando comparados a parâmetros da dinâmica do sistema (OGATA, 1982).

$$c(t) = c_{tr}(t) + c_{ss}(t) \quad (2.11)$$

Ainda segundo Ogata (1982), o aspecto essencial de um sistema dinâmico é a estabilidade absoluta, ou seja, se a saída do sistema converge para um valor ou não. Para sistemas lineares e invariantes no tempo, ou sistemas LIT, a saída é estável se este retorna ao estado de equilíbrio quando submetido a distúrbios. Além de ser estável o sistema pode se comportar de maneira criticamente estável, na qual as oscilações causadas por uma perturbação são mantidas, ou ainda ser instável, situação na qual a saída diverge. Estes dois últimos comportamentos descritos são indesejáveis e em sistemas instáveis o valor de saída, ao divergir, submete a planta a condições prejudiciais, podendo esta ser danificada ou colocada em condições nas quais os modelos matemáticos não são capazes de representa-lo. O método de transformada de Laplace conduz a solução completa (solução complementar e solução específica) de equações diferenciais lineares e invariantes no tempo (OGATA, 1982).

### 2.5.2 A transformada de Laplace e suas aplicações

A operação conhecida como Transformada de Laplace é utilizada na resolução de equações diferenciais ordinárias LIT. Inicialmente no domínio do tempo esta operação transforma funções transcendentais e operações de diferenciação e integração em equações algébricas de uma variável complexa  $s$ . Após manipulações convenientes e a aplicação da transformada inversa de Laplace obtém-se então a resposta temporal do sistema. Na análise de sistemas LIT

é definido o termo Função de Transferência. Este relaciona a transformada de Laplace da entrada e da saída do sistema, considerando-se todas as condições iniciais da planta como nulas (OGATA, 1982).

Portanto a função transferência de um sistema, representada como  $G(s)$ , é dada em termos da saída  $C(s)$  e da entrada  $R(s)$ , como ilustra a equação 2.12.

$$C(s) = G(s)R(s) \quad \Rightarrow \quad \frac{C(s)}{R(s)} = G(s) \quad (2.12)$$

Na análise da função de transferência de sistemas, os pontos da função nos quais a função é analítica são denominados pontos ordinários. Os valores para os quais essa condição não é verdadeira, ou seja, os pontos não são analíticos, são denominados pontos singulares. A análise dos pontos singulares é de suma importância para inferir conhecimento sobre a dinâmica do sistema tratado. Os teoremas do valor inicial e do valor final relacionam o comportamento temporal, inicial ou final, para sistemas LIT, com informações obtidas no domínio complexo de Laplace (OGATA, 1982).

$$\text{Teorema do valor inicial} \quad \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s) \quad (2.13)$$

$$\text{Teorema do valor final} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) \quad (2.14)$$

A relação entre os polos de uma função transferência e a estabilidade foi enunciada pela primeira vez por James Clark Maxwell em 1868 seu artigo On Governors. Foi a primeira descrição matemática para sistemas de controle usando equações diferenciais LIT. Em sua análise ele determinou uma condição necessária para que um dispositivo regulador de velocidade denominado governador, convirja para um valor final único.

Seja a solução de uma equação diferencial linear invariante no tempo dada por:

$$x(t) = A_1 e^{n_1 t} + A_2 e^{n_2 t} + A_3 e^{n_3 t} + V(t) \quad (2.15)$$

Após aplicação da transformada de Laplace em  $x(t)$  os expoentes  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  se transformam nos polos da função transferência. Portanto, para que o sistema seja estável é necessário que os polos tenham parte real negativa. Caso contrário, a função  $x(t)$  tenderá ao infinito quando  $t$  crescer. Também é possível ver que quanto maior for essa parte real negativa, maior será a velocidade de resposta.

### 2.5.3 Sistemas de controle

Para discutir sistemas de controle é necessária a definição de uma terminologia básica.

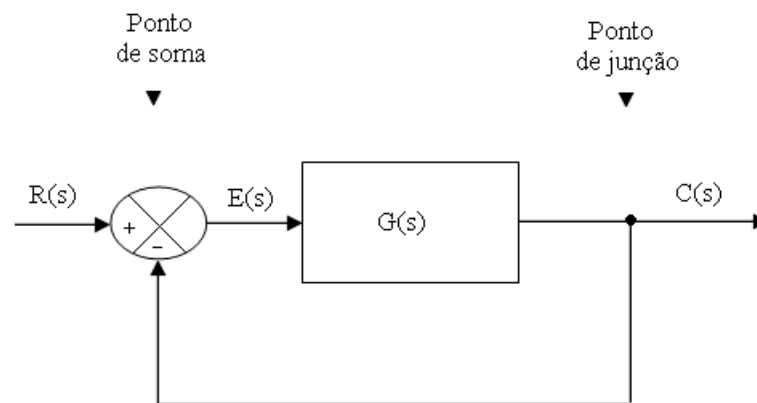
**Variável controlada e variável manipulada:** A variável controlada corresponde na maioria das vezes a saída do sistema e é o parâmetro medido pelo controlador. Já a variável manipulada corresponde à grandeza na qual o controlador atua para modificar a variável controlada. Portanto, para executar a tarefa de regular uma variável controlada, de acordo com os requisitos de desempenho desejáveis, o sistema deve atuar na variável manipulada.

**Sistemas de malha aberta:** São aqueles nos quais a saída não está relacionada com a entrada do sistema. Nesses não é possível comparar os valores de saída com referências desejadas, podendo o sistema apresentar erros que não podem ser corrigidos. Apesar de serem menos eficientes para questões de controle, devido a seu baixo custo, para tarefas simples eles podem ser aplicados a um baixo custo.

**Sistemas de controle com realimentação:** Estes correspondem a plantas em que o sinal de saída retroalimenta a entrada, gerando um sinal de erro que, dependendo de características da dinâmica da planta, tenderá a um erro nulo. Esses também são comumente definidos como sistemas de malha fechada (OGATA, 1982).

Sistemas de malha fechada, devido às características citadas acima, têm a particularidade de ajustar sua resposta, de acordo com o sinal de referência desejado, podendo regular a resposta transitória e estacionária de acordo com o projeto. No projeto de controladores para estes é necessária a definição de critérios de desempenho e também a analisar respostas do sistema, de maneira a detectar características temporais do sinal de saída (DORF, et al., 2001). Um sistema em malha fechada é mostrado na figura 2.9.





**Figura 2.9 - Sistema em malha fechada. Fonte: Ebah, Função de transferência**

Quando é incluída uma malha de realimentação em planta  $G(s)$  sua função transferência é modificada.

$$C(s) = G(s)[R(s) - C(s)] \quad \Rightarrow \quad \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (2.16)$$

Conseqüentemente uma planta que em malha aberta com função transferência dada pela equação 2.13, em malha fechada tem sua função transferência dada pela equação 2.16. Portanto, o comportamento de uma planta é alterado ao se fechar uma malha.

Ainda segundo Ogata (2012), nesse contexto de sistemas de malha fechada, os controladores automáticos são aqueles que realizam cálculos com os sinais de saída e de referência do sistema para gerar um sinal de erro e tentar reduzi-lo a zero ou valores próximos. A ação desses controladores automáticos é denominada ação de controle.

#### 2.5.4 Compensação de sistemas

A compensação de sistemas corresponde à alteração de parâmetros, com a inclusão de funções de transferência que modificarão a dinâmica do sistema. De acordo com requisitos de desempenho pré-estabelecidos e de conhecimentos sobre a dinâmica da planta, os compensadores podem ser projetados para alterar características da saída do sistema como tempo de resposta, sobressinal máximo ou erro em regime permanente quando o sistema é submetido a entradas de referência ou distúrbios na saída, seguindo assim os requisitos impostos no início. Portanto, é importante a definição das especificações as quais o sistema de controle deverá satisfazer. O agente dessa compensação no sistema recebe o nome de controlador (OGATA, 1982).

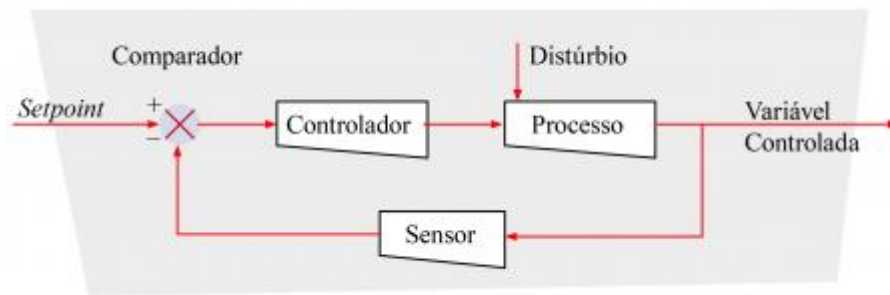


Figura 2.10 - Sistema de controle. Fonte: Engenharia e Arquitetura.

A figura 2.10 ilustra um processo submetido a uma entrada de referência  $R(s)$  ou setpoint. O sinal de saída do sistema ou variável controlada  $Y(s)$  é lida pelo sensor que também possui uma dinâmica  $F(s)$ . Este realimenta o bloco do controlador com um sinal de erro, aqui representado como  $E(s) = F(s) \cdot Y(s) - R(s)$ . Esse controlador então age sobre o erro de modo a minimizá-lo atendendo aos requisitos de desempenho.

Existem inúmeras técnicas de projeto para compensadores tais como o Lugar da Raízes e a Resposta em Frequência. Na abordagem do modelo matemático como função transferência um método bastante utilizado é o controlador ou compensador PID a partir da sintonia de Ziegler-Nichols.

### 2.5.5 Ações de controle

Para Ogata (1982) os controladores industriais podem ser classificados de acordo com suas ações de controle.

**Ação Proporcional:** Controladores com essa característica geram um sinal de controle  $u(t)$  proporcional ao sinal de erro  $e(t)$ . As duas equações abaixo mostram como essa ação de controle ocorre, no domínio do tempo, e também a função de transferência correspondente.

$$u(t) = K_p e(t) \qquad \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \qquad (2.17)$$

Controladores proporcionais, devido a suas características, melhoram o comportamento do sistema em regime permanente e podem diminuir o tempo de resposta do sistema. Em contrapartida eles podem tornar o sistema instável na presença de ruídos ou com sobressinais indesejáveis quando estes controladores possuem um ganho elevado.

**Ação integral:** Na ação de controle integral o sinal resultante é proporcional a integral da função de erro  $e(t)$  com intervalos de integração do início do processo até o instante mais atual. Essa integral corresponde à área abaixo da curva da função erro e essa característica da ao controlador o poder de eliminar erros em regime permanente para entradas em degrau, inibindo a influência de erros residuais. A representação matemática dessa ação de controle no domínio do tempo e sua função de transferência estão descritas abaixo.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) \partial t \qquad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \qquad (2.18)$$

**Ação de controle derivativo:** O controle derivativo gera um sinal proporcional a derivada da função de erro do sistema. Assim, para situações nas quais a função erro  $e(t)$  adquire um alta taxa de variação, sua derivada também apresentará um valor elevado, influenciando diretamente no valor do sinal de controle como está mostram as equações abaixo. Isso da a um sistema de controle que contém a ação derivativa uma sensibilidade. A ação de controle derivativa deve ser usada como complemento a ação de controle proporcional.

$$u(t) = K_p T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \qquad \frac{U(s)}{E(s)} = K_p T_d s \qquad (2.19)$$

A combinação das três formas de controle descritas acima é denominada ação de controle proporcional-integral-derivativa ou ação PID. Controladores com essas características são amplamente usados na indústria, nos mais diferentes processos, oferecendo as vantagens de cada ação ao sistema e sendo uma solução de baixo custo e complexidade (OGATA, 1982). A equação de um controlador com essas ações é dada por:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \partial t + K_p T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \qquad (2.20)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \qquad (2.21)$$

Onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_i$  é o tempo integral e  $T_d$  é o tempo derivativo.

O sinal de controle  $u(t)$  e a função de transferência  $U(s)/E(s)$  para controladores PID estão descritos matematicamente nas equações 2.20 e 2.21.

### 2.5.6 Sintonia de controladores PID

Dado um processo, em malha fechada, se o seu modelo matemático pode ser encontrado, então é possível inferir informações sobre o desempenho da planta e encontrar os parâmetros para um controlador PID que satisfaça os requisitos de projeto. Em casos nos quais obtenção do modelo matemático é complexa torna-se uma tarefa difícil a realização de uma abordagem analítica. Para esses casos podem ser aplicados métodos gráficos, com base em dados obtidos experimentalmente para conseguir encontrar tais parâmetros do controlador (OGATA, 1982).

Na tarefa de sintonia de controladores, para os parâmetros proporcional, derivativo e integrativo, são muitos os métodos aplicáveis. Entre os mais usados se destacam os métodos de Ziegler-Nichols. Em casos nos quais a planta está sujeita a não linearidades ou condições espúrias como ruídos de medição e de processo, talvez seja necessária a aplicação de métodos mais robustos para projeto do compensador (CAMPEZATTO, 2014).

Segundo Ogata (2012), os pesquisadores Ziegler e Nichols através do empirismo conseguiram determinar características presentes em sistemas para que, quando submetidos à entrada em degrau unitário, forneçam informações fundamentais na sintonia de controladores, facilitando a determinação dos parâmetros ganho proporcional  $K_p$ , tempo integral  $T_i$  e tempo derivativo  $T_d$  para um controlador PID.

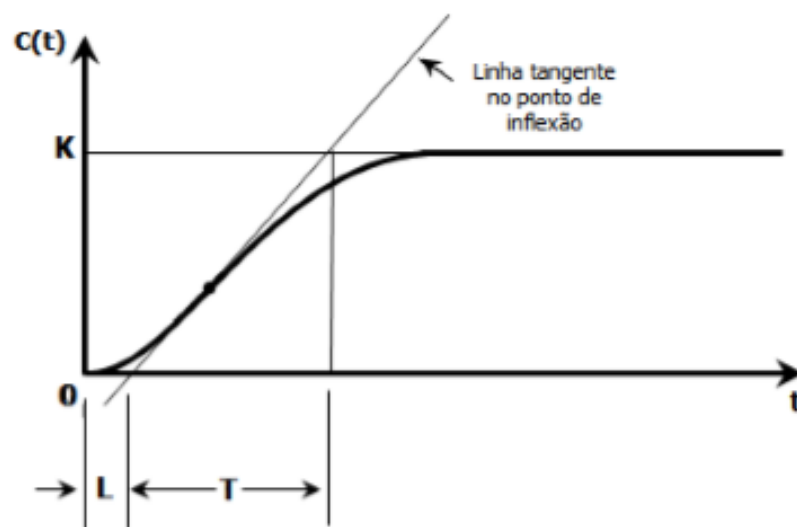


Figura 2.11 - Curva de resposta em S adaptada. Fonte: Ogata (1982).

Ainda segundo Ogata (2012), para aplicação do primeiro método de Ziegler-Nichols, a curva do sinal de saída no tempo, quando o sistema é sujeito a uma entrada em degrau, deve ter o formato semelhante à letra S. Esse aspecto pode ser reconhecido através de testes ou simulações e está representado na figura 2.11.

Nesse método os parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são obtidos de acordo com as fórmulas da tabela 2.2

**Tabela 2-2 - Sintonia por 1º método de Ziegler-Nichols.**

<b>Tipo de controlador</b>	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
<b>PID</b>	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

## 2.6 Modelagem matemática aplicada a sistemas térmicos

### 2.6.1 Modelagem matemática para sistemas térmicos baseada na física do processo

A modelagem matemática pela física do processo busca adquirir conhecimento sobre parâmetros que estarão presentes no modelo matemático de sistemas térmicos. Mesmo que o modelo matemático de uma planta qualquer seja obtido por identificação de sistemas, através de estudos sobre a física do processo o projetista irá adquirir melhor compreensão sobre:

- A estrutura do modelo matemático.
- A relação entre diferentes grandezas físicas e parâmetros do modelo matemático
- O que é possível modificar na planta, caso o controlador não seja capaz de atender aos critérios de desempenho requerido no projeto ou mesmo para validação de um modelo.

Para Ogata (1982), os modelos matemáticos de sistemas térmicos, caso uma maior precisão seja necessária, devem ter seus parâmetros distribuídos. Isso porque os parâmetros de sistemas térmicos, devido à dinâmica lenta de sistemas desse tipo, variam ao longo do espaço. Contudo, para modelos simplificados, que possam ser tratados de forma analítica, trabalhar com modelos matemáticos de parâmetros concentrados se faz satisfatória. Neste trabalho o

modelo matemático de parâmetros concentrados foi utilizado para descrever o comportamento de um chuveiro elétrico. Por isso o estudo da física do processo é analisada abaixo.

Como visto na seção 2.3 o calor em um sistema térmico é transferido por meio dos mecanismos condução, convecção e radiação. Devido ao fato de que a resistência de um chuveiro não adquirir altas temperaturas, condição que faria com que o mecanismo de transferência por radiação se tornasse relevante na dinâmica do processo, neste estudo sobre o modelo matemático para aquecedores a radiação é desconsiderada.

.....  
 Para essa situação, Ogata (1982) desenvolveu um modelo matemático de parâmetros concentrados, baseado em duas grandezas definidas por ele, a resistência e capacitância térmica. Esse modelo e está detalhado abaixo.

$$q = K \cdot \Delta\theta \quad (2.22)$$

O coeficiente K é dado por:

$$K = \frac{k \cdot A}{\Delta X} = \underbrace{H \cdot A}_{\text{Condução} \quad \text{Convecção}} \quad (2.23)$$

Onde:

$H$  = Coeficiente de convecção,  $kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ .

$K$  = Coeficiente de transmissão por condução ou por convecção,  $Kcal/s \cdot ^\circ C$ .

A Resistência térmica ( $R$ ) e a Capacitância Térmica ( $C$ ) são apresentadas matematicamente nas equações 2.24 e 2.25.

$$R = \frac{\text{Variação na diferença de temperatura, } ^\circ C}{\text{Variação na taxa de fluxo de calor, } kcal/s} = \frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial q} = \frac{1}{K} \quad (2.24)$$

$$C = \frac{\text{Variação no calor, } kcal}{\text{Variação na temperatura, } ^\circ C} = mc \quad (2.25)$$

Onde:

$R$  = Resistência térmica,  $^\circ Cs/kcal$ ,

$C$  = Capacitância térmica,  $kcal/^\circ C$ ,

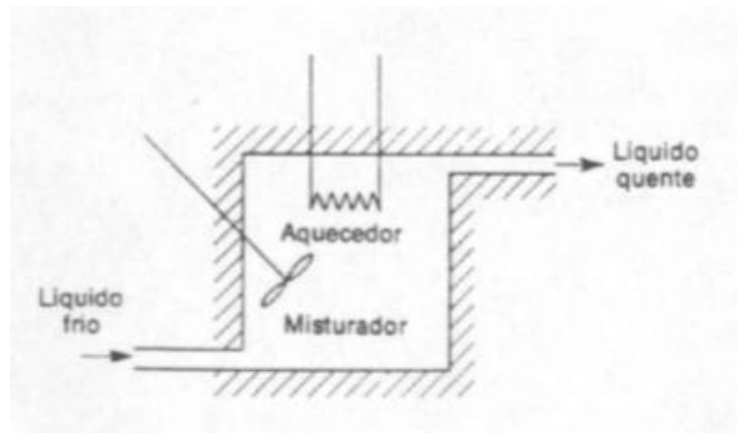


Figura 2.12 - Esquema de aquecedor por efeito Joule. Fonte: Ogata, 1982.

Onde:

$\bar{\Theta}_i$  = Temperatura em regime permanente do líquido de entrada, °C

$\bar{\Theta}_o$  = Temperatura em regime permanente do líquido de saída, °C

$G$  = Vazão em massa do líquido em regime permanente,  $kg/s$ ,

$M$  = Massa do líquido no reservatório,  $kg$ ,

$\bar{H}$  = Taxa de entrada de calor em regime permanente,  $kcal/s$ .

A ilustração de um aquecedor é apresentada na figura 2.12. Supondo que a temperatura do líquido entrante seja mantida constante e que a taxa de entrada de calor seja subitamente variada de  $\bar{H}$  para  $\bar{H} + h_i$ , onde  $h_i$  representa uma pequena variação na taxa de entrada de calor. A taxa de saída de calor variará então gradualmente desde  $\bar{H}$  até  $\bar{H} + h_o$ . A temperatura do líquido que sai também variará desde  $\bar{\Theta}_o$  até  $\bar{\Theta}_o + \theta$ . Para este caso,  $h_o$ ,  $C$  e  $R$  são obtidos, respectivamente pelas equações abaixo (OGATA, 1982).

$$h_o = Gc\theta \quad (2.26)$$

$$C = Mc \quad (2.27)$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc} \quad (2.28)$$

A equação diferencial para o sistema é dada pela equação 2.29. Após sucessivas substituições a partir das equações mostradas obtêm-se a equação diferencial 2.30.

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} = h_i - h_0 \quad \Rightarrow \quad C \frac{\partial \theta}{\partial t} = h_i - Gc\theta \quad (2.29)$$

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} + Gc\theta = h_i \quad \Rightarrow \quad RC \frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta = Rh_i \quad (2.30)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação 2.30 tem-se a equação 2.31. Com algumas substituições chega-se a equação 2.32, função transferência do sistema que tem como entrada o calor  $h_i(t)$  e como saída a temperatura de saída  $\theta(t)$ . Ambas representadas no domínio de Laplace por  $H_i(s)$  e  $\Theta(s)$ , respectivamente.

$$RCs\Theta(s) + \Theta(s) = RH_i \quad \Rightarrow \quad \Theta(s)(RCs + 1) = RH_i(s) \quad (2.31)$$

$$\frac{\Theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (2.32)$$

Caso o sistema térmico apresentado esteja sujeito tanto a variações na temperatura do líquido que flui na entrada como na taxa de entrada de calor, enquanto a taxa do fluxo de líquido é mantida constante, a variação teta na temperatura do líquido que flui na saída pode ser dada pela seguinte equação 2.33.

$$RC \frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta = \theta_i + Rh_i \quad (2.33)$$

Portanto o sistema térmico analisado possui entradas, a taxa de calor de entrada no sistema  $h_i(t)$  e a temperatura do líquido entrante  $\theta_i(t)$ . Note que a constante de tempo é  $RC$  ou  $M/G$  segundos.

## 2.6.2 Modelagem matemática por identificação de sistemas

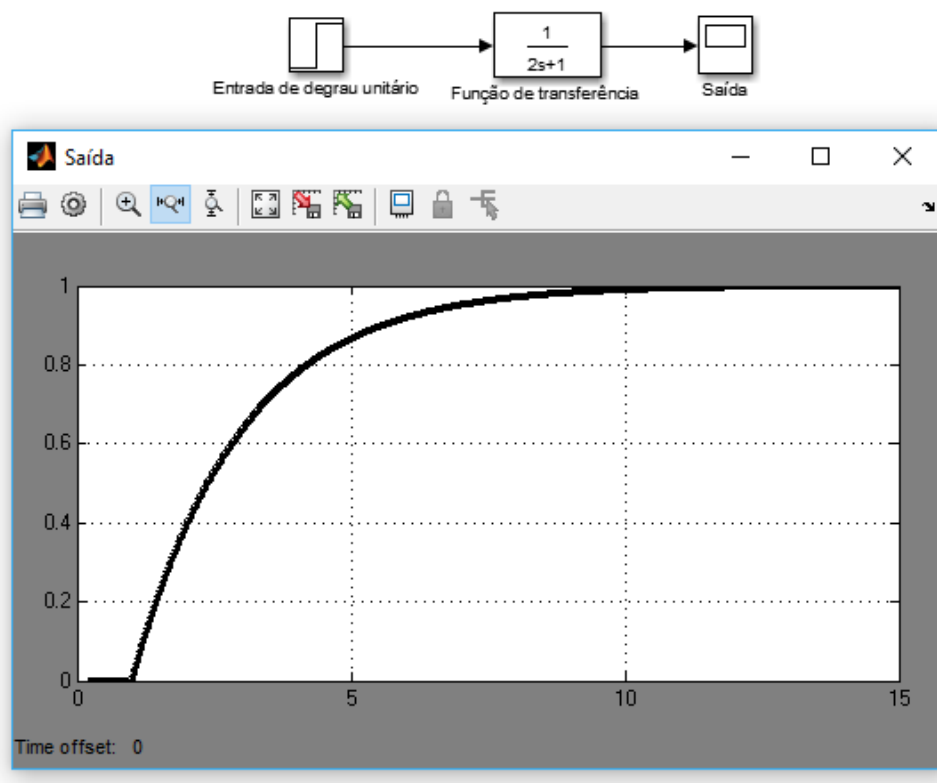
Para contornar esse problema da complexidade e satisfazer as especificações de desempenho, técnicas de identificação de sistemas foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas.



Dessa maneira, com a realização de ensaios é possível criar um modelo que representa com precisão satisfatória uma determinada planta física.

Os sinais de entrada de teste geralmente utilizados são as funções degrau, rampa, parábola de aceleração, impulso, senoidais e outras. Com esses sinais de teste, tanto a análise experimental como a análise matemática dos problemas de controle podem ser obtidas facilmente, uma vez que esses sinais são funções de tempo muito simples. Pode-se determinar quais desses sinais típicos de entrada devem ser utilizados na análise das características do sistema, pelo comportamento da entrada a que o sistema será submetido com maior frequência, sob condições normais de temperatura (OGATA, 1982).

Em sistemas térmicos dois tipos de entrada recorrentes são as funções degrau e rampa. Na figura 17 é mostrado o diagrama de blocos para um sistema de 1ª ordem simplificado (no qual a malha de realimentação está oculta) e sua resposta a um degrau unitário.



**Figura 2.13 - Resposta de um sistema de 1ª ordem a um degrau unitário.**

Tomando o coeficiente que acompanha a variável  $s$  no denominador da função transferência  $G(s)$ , mostrada na figura 2.13, como um parâmetro genérico  $T$ , Ogata (1982) apresenta a

transformada de Laplace da função degrau unitário como  $1/s$ . Por consequência, a saída do sistema no domínio de Laplace tem a forma da equação 2.34.

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \times \frac{1}{s} \quad (2.34)$$

Após a expansão em frações parciais e a aplicação da transformada inversa de Laplace, Ogata (1982) obtém a resposta temporal para sistemas de primeira ordem. Portanto o sistema alcança no tempo  $T$  o valor de 63.2% como é mostrado na equação 2.35.

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad c(T) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (2.35)$$

Na figura 2.13 é possível notar que a resposta temporal para a função que tem constante de tempo de 2 segundos alcança 0,632% de seu valor exatamente após decorrido esse intervalo de tempo.

Em duas constantes de tempo a resposta atinge 86,5% da resposta final. Para  $t = 3T$ ,  $4T$  e  $5T$ , a resposta alcança 95%, 98,2% e 99,3%, respectivamente, da resposta final (OGATA, 1982).

É possível notar que, quanto menor for o valor da constante de tempo, mais rápido o sistema de 1ª ordem alcançará seu valor em regime permanente, quando submetido a uma entrada em degrau.

### 2.6.3 Identificação de sistemas térmicos

Sabe-se que durante o período de aquecimento, o forno possui uma resposta livre típica de um sistema de segunda ordem superamortecido. É comum modelar um sistema de segunda ordem superamortecido como um sistema de primeira ordem com atraso.

Sistemas de primeira ordem podem ser modelados, de acordo com a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2.36)$$

Em alguns sistemas ocorre o atraso de transporte que representa o tempo após a ocorrência de uma perturbação na entrada até que seja notada uma mudança na saída (CORDEIRO, et al., 2017).

Logo, a função transferência com atraso de transporte assumirá a forma da equação 2.37.

$$G(s) = \frac{ke^{-Ts}}{\tau s + 1} \quad (2.37)$$

Onde T mostrado na equação representa o atraso de transporte. Esse atraso é mostrado na figura 2.11 como L.

A resposta (típica) no domínio do tempo de sistemas de primeira ordem com atraso de transporte pode ser determinada pela equação 2.38.

$$\begin{cases} 0 & \text{se } t \leq T \\ kU \left( 1 - e^{-\frac{1}{\tau}(T-t)} \right) & \text{se } t \geq T \end{cases} \quad (2.38)$$

Os parâmetros necessários para modelagem do forno como constante de tempo  $\tau$  e atraso T podem ser estimados traçando uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva, como ilustrado na Figura 2.11, referente ao primeiro método de Ziegler-Nichols. (CORDEIRO, et al., 2017).

## 2.7 Medição e aquisição de temperatura

Segundo Ogata (1982), o sensor ou elemento de medição é um dispositivo que converte a variável de saída em outra variável conveniente, como deslocamento, pressão ou tensão, que pode ser utilizada para comparar a saída ao sinal de referência. Esse elemento está no ramo de realimentação do sistema de malha fechada.

Pode-se medir temperatura de muitas formas, as quais variam em preço e precisão do equipamento. Os modelos mais comuns de sensores são termopares, resistências metálicas (RTDs), e termistores. A utilização dos termopares é vantajosa devido a sua confiabilidade, precisão e baixo custo. O seu princípio físico baseia-se em três efeitos: os efeitos Seebeck, Peltier e Thomson (GAIEWSKI, et al., 2015).

Termopar é o mais conhecido entre os métodos de medição de temperatura por ser o mais barato e cobrir também uma maior faixa de temperatura. Uma das extremidades de suas junções chamamos de junta quente e, a outra extremidade onde ligamos os aparelhos ou cabos de compressão é chamada de junta fria. A quente quando submetida a uma fonte de calor faz com que seja gerada uma tensão pequena, na casa dos milivolts, que é proporcional a sua junta fria, este efeito é chamado de Seebeck (MUNDO DA ELÉTRICA, 2017).

O termopar do tipo K é formado por fios de Alumel, como termo elemento negativo, e Chromel, como termo elemento positivo. É o termopar mais adequado para medições contínuas entre  $-200^{\circ}\text{C}$  até  $1260^{\circ}\text{C}$ . É recomendado para uso contínuo em atmosferas

oxidantes ou completamente inertes. Devido a sua alta resistência à oxidação, o termopar do tipo K deve ser utilizado em temperaturas superiores a 60 °C, e apenas ocasionalmente em temperaturas inferiores a 0 °C. Não deve ser utilizado em atmosferas redutoras e sulfurosas. A força eletromotriz produzida varia de -6.458 mV até 48,838 mV (GAIEWSKI, et al., 2015).

Técnicas devem ser adotadas para assegurar que os níveis de incerteza nas medições sejam compatíveis com as tolerâncias do processo, possibilitando o controle. Dentre os aspectos mais relevantes, os fios, cabos e outros dispositivos de interligação devem seguir critérios técnicos conhecidos, que levem em conta o tipo do termopar e a qualidade dos produtos, de modo a inibir o aparecimento de leituras espúrias. Essas interconexões também devem ser feitas de modo a minimizar a captura de ruídos eletromagnéticos que possam interferir nos resultados das medições (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

Na figura 2.14 é possível analisar os valores de tensão elétrica gerada para diferentes tipos de termopares quando submetidos a diferença de temperatura entre a junta quente e a junta fria.

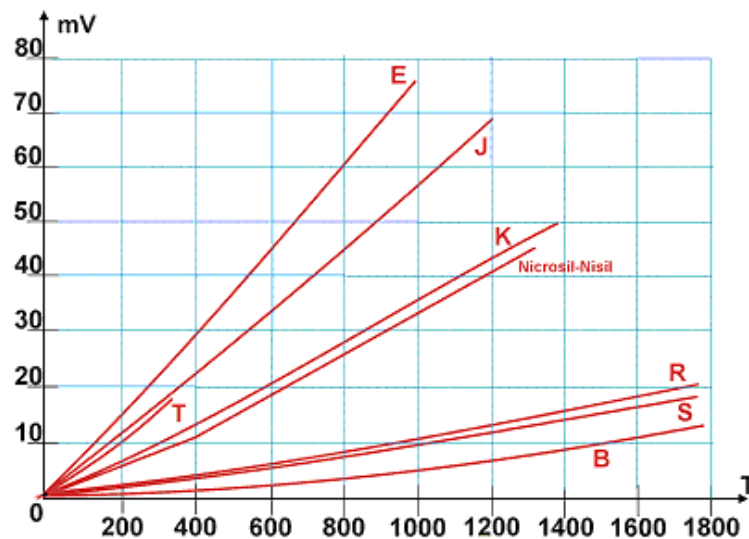


Figura 2.14 - Curva relacionando a temperatura medida e a tensão gerada por essa temperatura. Fonte: Termopares.com.

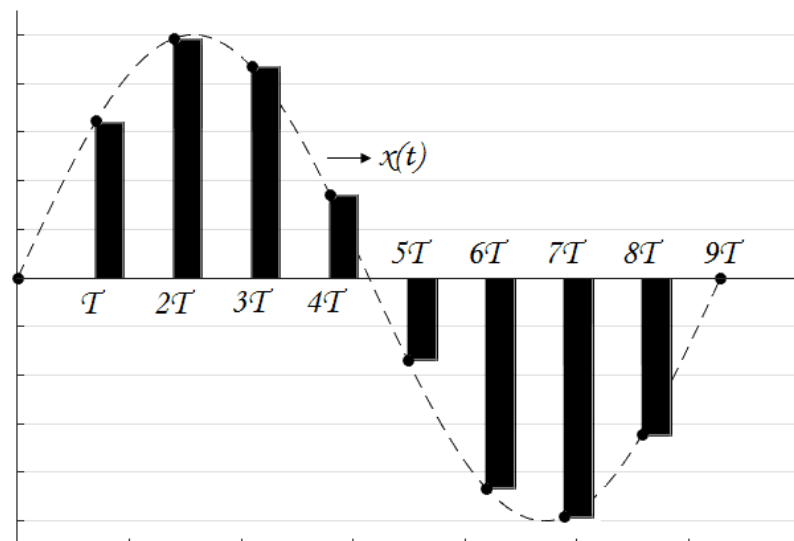
## 2.8 Processamento de sinais e sistemas discretos

Até a invenção dos computadores, o processamento analógico era o mais utilizado para efetuar cálculos, para os mais diversos fins, incluindo controle de processos. Com o desenvolvimento da computação o processamento digital adquiriu grande importância, tendo aplicações em grande parte da área da eletrônica e sistemas de controle.

Segundo Tocci et. Al. (2001), quando comparados os sistemas de processamento analógico, os digitais oferecem as vantagens citadas abaixo.

- Facilidade de processo,
- Grande capacidade de armazenamento de dados e acesso a estes,
- Ótima precisão,
- Menor influência de ruídos,
- Operações programadas,
- Capacidade de efetuar operações mais complexas.

Um sinal analógico variante no tempo, para ser utilizado em sistemas digitais precisa ser modulado para faixas de valores lidas pelo dispositivo digital utilizado. Muitos sistemas digitais utilizam, por exemplo, a faixa de 0 a 5 Volts ou de 4 a 20 miliampères. Nessas condições os valores do sinal no tempo devem ser amostrados em diferentes instantes, criando uma sequência de valores. O período entre a operação de amostragem e sua sucessora é denominado período de amostragem (ASSUNÇÃO, 2013). Um exemplo desse processo de amostragem está apresentado na figura 2.15, onde o período de amostragem é representado por  $T$ .

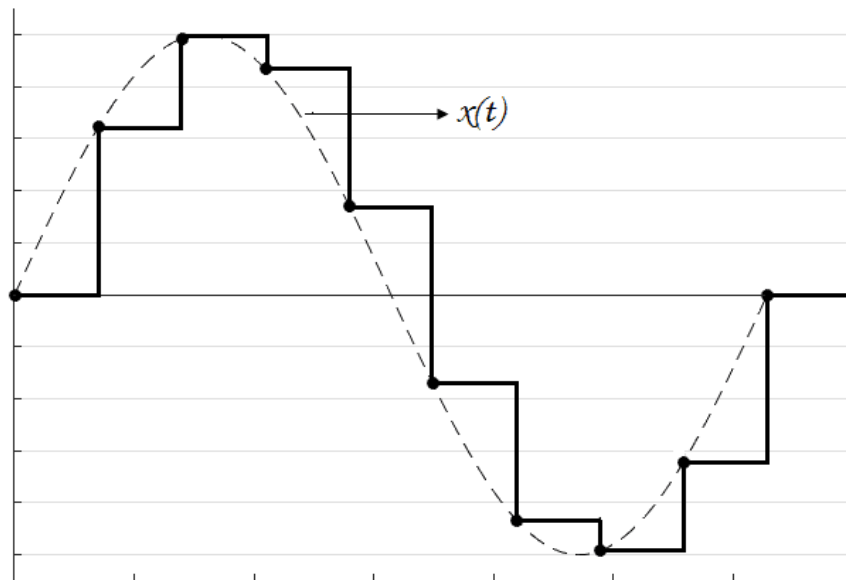


**Figura 2.15 - Sinal senoidal contínuo em vermelho e valores amostrados em azul. Fonte: Embarcados.com: Entenda o processo de amostragem.**

Após a amostragem o sinal precisa ser transformado novamente em um valor contínuo e os dispositivos que realizam essa função são denominados seguradores. O segurador mais

simples existente atua mantendo a amplitude do sinal amostrado até o instante em que a próxima amostra é obtida (OGATA, 1982).

Na figura 2.16 é apresentado um sinal analógico amostrado e transformado novamente em um sinal contínuo, utilizando-se um segurador idêntico ao descrito no último parágrafo.



**Figura 2.16 - Sinal amostrado e segurado por um segurador de ordem zero. Fonte: Embarcados.com: Entenda o processo de amostragem.**

### 2.8.1 Transformada Z e período de amostragem

Sistemas analógicos podem ser analisados utilizando-se de equações no espaço de estados para resolver os problemas no domínio do tempo, e também com o uso da transformada de Laplace para sistemas lineares invariantes no tempo. O uso de métodos no espaço de estados também se aplica a sistemas discretos. A forma análoga à transformada de Laplace para sistemas analógicos, em sistemas digitais, é a transformada Z (OGATA, 1982).

Ele ainda define a transformada z de uma função  $x(t)$  contínua como mostrado na equação 2.40.

$$Z\{x(t)\} = X(z) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)e^{-k} \quad (2.39)$$

Um controlador ou compensador PID para sistemas de controle discretos é descrito pela equação 2.40 e a ação de controle é representada pela equação de diferença 2.41.

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + K_i \frac{zT}{z-1} + K_d \frac{z+1}{zT} \quad (2.40)$$

$$u(k) = (K_p + K_i T + K_d/T)e(k) - (2\frac{K_d}{T} + K_p)e(k-1) + \frac{K_d}{T}e(k-2) + u(k-1) \quad (2.41)$$

### 3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Características dos componentes utilizados neste trabalho são apresentadas a seguir.

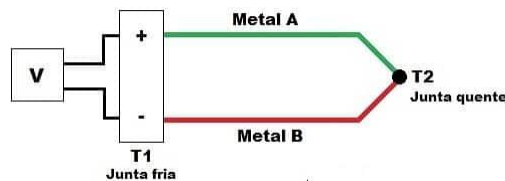
#### 3.1 Chuveiro elétrico

Para estudo de caso neste trabalho é utilizado uma ducha Lorenzetti. Ele possui as seguintes características:

- Tensão nominal de 220 V;
- Potência = 6800 W;
- Corrente elétrica para tensão nominal = 32 A;

#### 3.2 Aquisição de temperatura

Na aquisição de temperatura foi utilizado um termopar do tipo K. Ele consegue medir temperaturas de  $-200^{\circ}\text{C}$  até  $1260^{\circ}\text{C}$  com tensões que variam de  $-6.458\text{ mV}$  até  $48,838\text{ mV}$ .



**Figura 3.1 - Representação de um termopar genérico. Fonte: Embarcados.com**

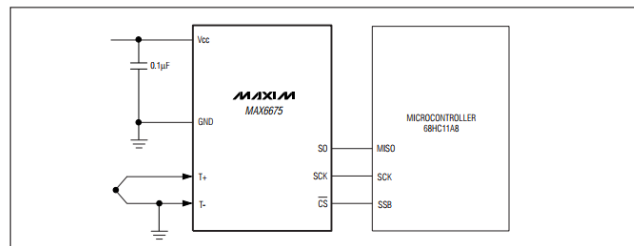
A figura 3.1 ilustra esquematicamente um termopar. A junta quente T2 é onde se pretende medir a temperatura. Para aferir a tensão entre os polos positivos e negativos de um termopar é necessário realizar uma tarefa denominada compensação de junta fria, para que um terceiro metal (os condutores do medidor de tensão) seja conectado a eles. O MAX6675 é um circuito integrado que possui as seguintes funções:

- Uma junta fria de compensação;
- Digitalizador para o sinal analógico lido por termopares do tipo K;
- Saída de dados com resolução de 12 bits e protocolo de comunicação SPI.
- Dados de 12 bits possuem resolução de  $0.25^{\circ}\text{C}$  e faixa de medição de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1024^{\circ}\text{C}$ .

O termopar que possui dois fios de conexão, um positivo e outro negativo. Para montagem deve-se sempre observar a polaridade do CI e do termopar. A tensão de alimentação ( $V_{cc}$ ) do CI pode variar de  $+3,3\text{V}$  a  $+5,5\text{V}$ , sendo nesse presente trabalho utilizado  $+5\text{V}$ . O esquema de



montagem apresentado na figura 3.2 possui um capacitor de  $0.1\mu F$ , utilizado para evitar ruídos provenientes da fonte de alimentação.



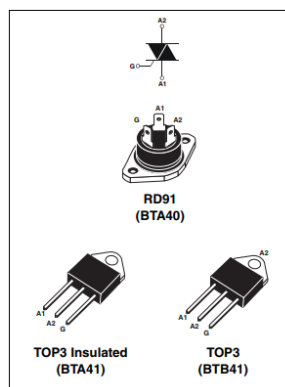
**Figura 3.2 - Ligação termopar tipo K – CI. Fonte: Datasheet MAX6675.**

Os pinos SO, SCL e CS são conectados ao microcontrolador, que recebe o pacote de dados de 12 bits contendo o valor de temperatura e trata esses dados com software adequado.

### 3.3 Circuito Dimmer (controle de potência para tensão alternada)

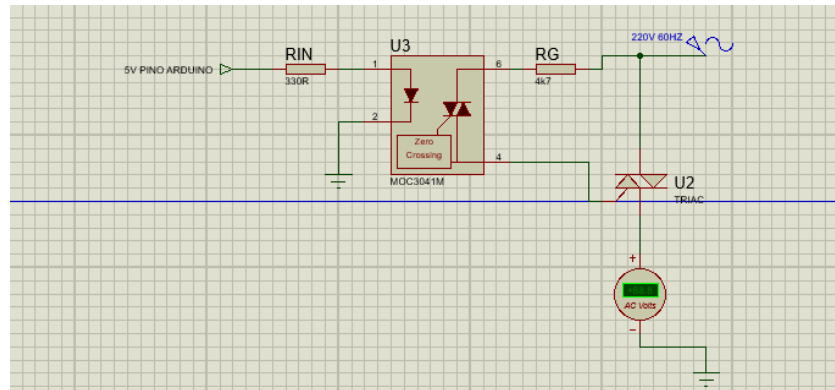
O controle de potência elétrica fornecida ao chuveiro (variável manipulada) é feito utilizando-se um TRIAC como interruptor. O princípio de funcionamento do TRIAC é visto na seção 2.4.2. Na figura 3.3 são apresentados 3 tipos de tiristores bidirecionais, todos com as seguintes características:

- Corrente máxima  $I_T = 40A$  (RMS);
- Tensão de pico de máxima entre os terminais A1 e A2  $T = 800 Volts$  (RMS)
- Corrente na porta para acionamento  $I_{GT} = 50mA$ .
- Velocidade de variação na corrente do TRIAC  $= \frac{\partial i}{\partial t} = 50$  Ampères/segundo



**Figura 3.3 - TRIACs de alta potência. Fonte: Anterwell Technology.**

O sinal aplicado na porta GATE do TRIAC provém do circuito de controle. Como visto na subseção 2.4.2, um isolamento elétrico entre os circuitos de controle e de potência dá maior segurança ao sistema. Para tanto, optocopladores do tipo MOC3041 foram utilizados.



**Figura 3.4 - Isolamento elétrico entre os circuitos de comando e de potência.**

O acionamento do TRIAC, por meio de um acoplador MOC3041 e um sinal digital fornecido por microcontrolador é mostrado na figura 3.4. Características retiradas do datasheet e importantes para uso do optoacoplador são:

- Temperatura de operação entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $85^{\circ}\text{C}$ .
- Isolamento contra surto de tensão de  $7500\text{ V}_{\text{AC peak}}$ ;
- Total de potência dissipada a  $25^{\circ}\text{C}$  de  $250\text{ mV}$ .
- Corrente no emissor necessária para que ele emita sinal ótico de  $I_{\text{emissor}} = 15\text{ mA}$ .
- Tensão do terminal de saída de  $400\text{ V}$ .
- Pico de surto de corrente de  $1\text{A}$ .
- Velocidade de variação da tensão no MOC3041  $= \frac{\partial V}{\partial t} = 1000\text{V}/\mu\text{s}$ .

As resistências mostradas na figura 24 foram calculadas de acordo com as correntes  $I_{\text{emissor}}$  e  $I_{\text{GT}}$ .

$$RIN = \frac{5\text{ volts}}{0,015\text{ mA}} = 333,33\ \Omega \quad RG = \frac{220\text{ volts}}{0,050\text{ mA}} = 4400\ \Omega$$

Na prática foram usados valores de  $RIN = 330\ \Omega$  e  $RG = 4700\ \Omega$ , disponíveis comercialmente.

### 3.4 Arduino UNO

ARDUINO UNO é uma placa composta por um microcontrolador Atmel, circuitos de entrada/saída e que pode ser facilmente conectada à um computador e programada via IDE ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado. Utiliza uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB. Nesse trabalho o ARDUINO UNO tem as seguintes funções:

- Ler uma temperatura de referência para saída da água, fornecida pelo usuário;
- Ler a temperatura fornecida pelos 2 dispositivos MAX6675, que possui protocolo de comunicação SPI;
- Processar um algoritmo de controle para fornecer o período de tempo que o timer do ARDUINO ativar o gatilho do TRIAC,
- Ler o circuito Zero-crossing e ativar uma interrupção externa INT0 (porta 2) do arduino do tipo CHANGE para disparar um timer toda vez que a tensão da rede passar por 0V.
- Construir uma rotina de interrupção que inicia um timer e a partir do valor calculado pelo algoritmo de controle compute o valor do ângulo de disparo da senóide.



**Figura 3.5 - Arduino UNO. Fonte: Module143.**

## 4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para o projeto de um sistema de controle, de antemão, é preciso estabelecer critérios de desempenho desejados. As especificações para esse trabalho são de controlar a temperatura de saída da água no chuveiro fazendo-a seguir uma referência, ter erro nulo em regime permanente mesmo quando a planta é sujeita a alterações na vazão de água.

Nesse caso a variável manipulada (entrada) é a tensão elétrica alternada e a variável controlada (saída) é a temperatura da água na saída do chuveiro.

### 4.1 Medição de temperatura na prática

A leitura de temperatura através do termopar do tipo K contém a presença de ruídos de medição. Para identificar características desses ruídos foi ligado o sistema, com 2 termopares utilizados nos testes. A temperatura foi medida por 15 minutos e registrados o maior e menor valor de amplitude.

Para ambos os termopares foram registradas amplitudes de 2,25 °C. Por isso, uma média de três valores reduz a faixa de erros de 2,25 para 0,75 °C.

O datasheet do MAX6675 informa que o tempo de conversão da temperatura para este é de 0,17 a 0,22 segundos. Foi aderido o tempo de 0,20 segundos de amostragem e, a partir disso, foi implementada uma estrutura do tipo fila, alimentada pelos valores de temperatura lidos. Assim é possível calcular médias sem aumento do tempo de amostragem. Foi praticada a média entre 3 valores. Os termopares utilizados foram calibrados em testes realizados no laboratório de Metrologia e Instrumentação da Escola de Minas – UFOP. Quando o sistema atinge a fase de regime permanente, registrando leituras estáveis, são anotados os valores medidos pelo termopar descalibrado e pelo sensor de referência para o cálculo do erro. Foi utilizado um sensor de temperatura Infotherm como referência.



**Figura 4.1 - Calibração dos termopares.**

O erro corrigido em software foi calculado através da média  $X$ , função de 20 valores de temperatura dentro do ponto de operação do chuveiro.

$$X = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \varepsilon_i$$

Onde  $\varepsilon$  = erro de temperatura em °C e  $i$  = índice da leitura.

#### 4.2 Ensaio com degrau de tensão máxima como entrada

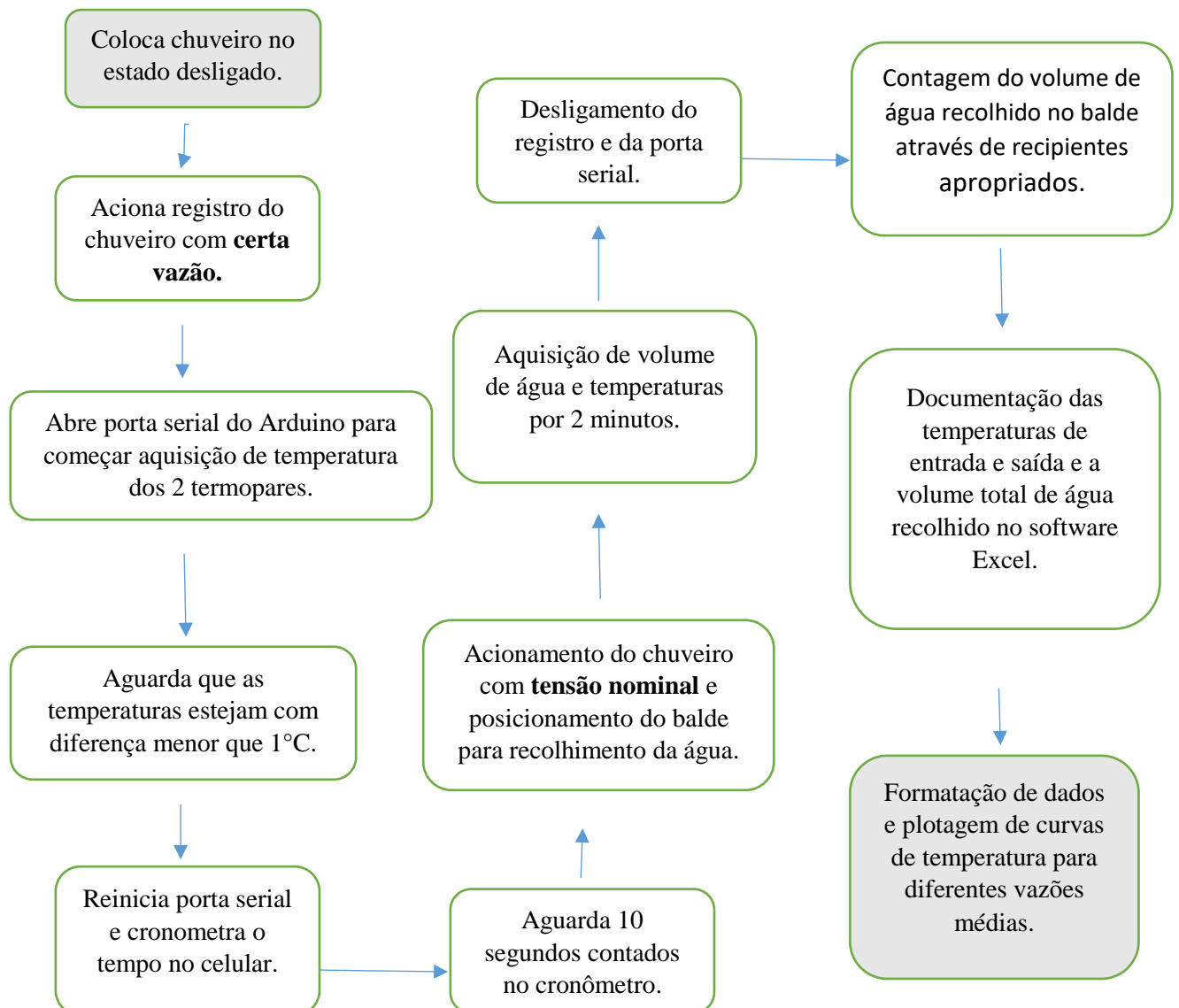
A temperatura de saída e de entrada da água no chuveiro foram medidas para o caso em que potência elétrica é máxima. Antes de se realizar os ensaios foi medida a resistência elétrica do chuveiro para diferentes posições do interruptor dele. A tensão de alimentação medida com uso de um Multímetro foi de 224 V<sub>rms</sub>.

A figura 27 ilustra como foram medidas as temperaturas de saída do (A) e de entrada (B) da água do chuveiro.

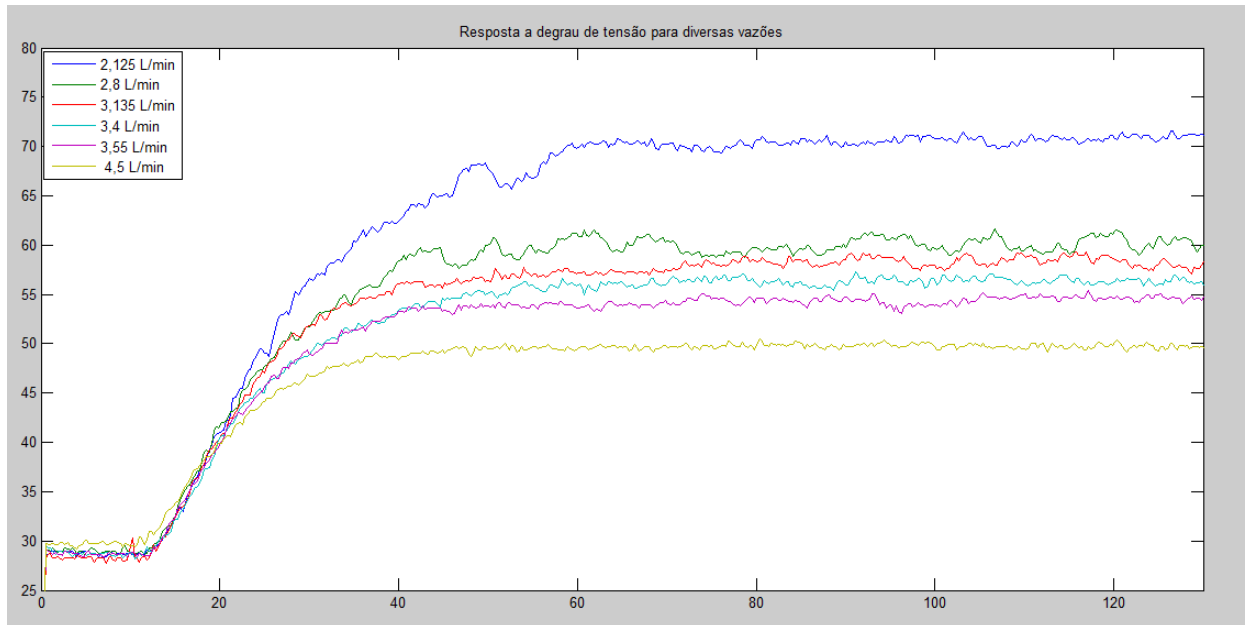


**Figura 4.2 - A Termopar acoplado a saída do chuveiro. B- Termopar acoplado a saída de torneira.**

Os testes feitos para obtenção do modelo matemático da planta foram feitos com a seguinte metodologia:



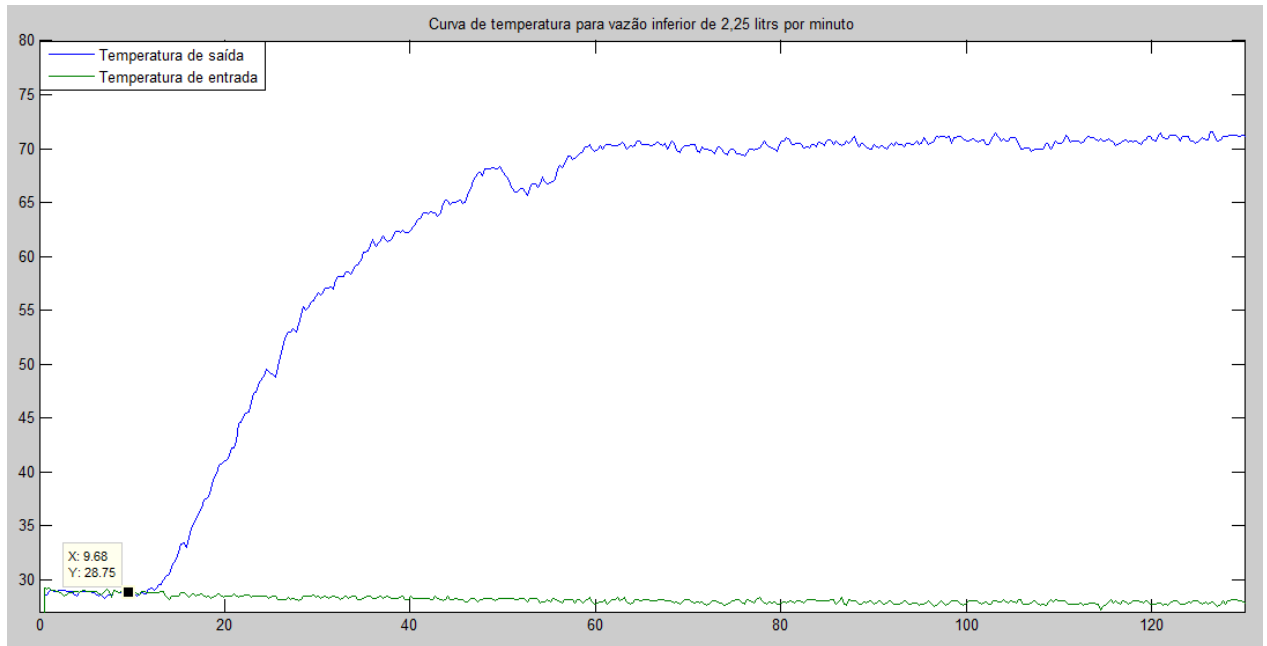
As curvas para as temperaturas de saída e entrada da água foram obtidas com o chuveiro é ligado em tensão elétrica nominal e a vazão alterada para os diferentes testes. Na figura 28 são mostradas essas curvas, plotadas no software MATLAB.



**Figura 4.3 - Curvas de resposta de temperatura da saída para entrada em degrau de tensão elétrica para diferentes vazões.**

Nas curvas acima nota-se que a medida que a vazão aumenta o valor da temperatura de saída em regime permanente diminui. É possível notar também que o tempo de resposta é menor. Essa percepção analítica é descrita nos modelos matemáticos, permitindo uma análise mais rigorosa. Têm-se como limites inferior e superior as vazões de 2,125 e 4,5 litros por minuto, respectivamente.

Para extrair os parâmetros necessários a modelagem matemática da planta para diferentes vazões serão analisadas individualmente algumas das curvas vistas acima. Na figura 4.4 são apresentadas as curvas de temperatura de entrada e saída da água no chuveiro para vazão inferior.



**Figura 4.4 - Curvas de temperatura para vazão inferior.**

Com a curva acima é possível obter o modelo matemático que descreve o comportamento da planta para vazão dada. Os parâmetros extraídos dos testes e utilizados na obtenção do modelo matemático da planta, projeto do controlador são:

- **Tempo inicial do ensaio:**  $T_i = 10,22$  segundos
- **Temperatura de saída média em regime permanente:** Esse valor é obtido através de uma média entre os valores que estão em um intervalo de  $3^\circ\text{C}$ .

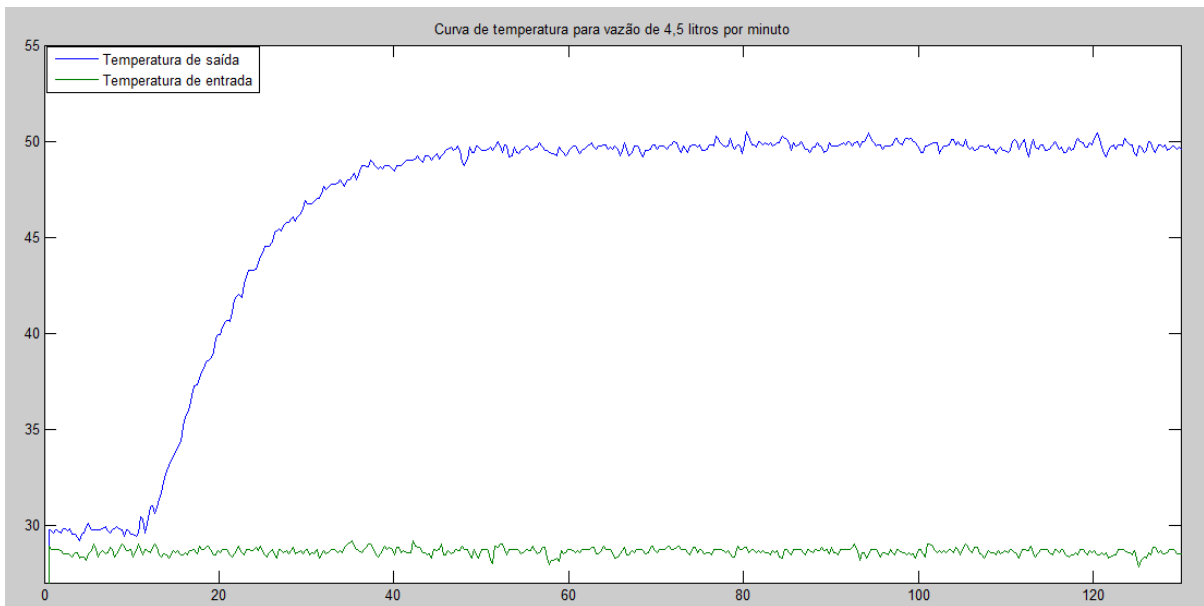
$$Temp_{media\ saida\ ss} = 70,12\ ^\circ\text{C}$$

- **Temperatura de entrada média:** Medida pelo sensor que está acoplado a torneira. Como a água que alimenta a torneira e o chuveiro provém da mesma fonte elas possuem temperaturas semelhantes, se tornando essa uma boa estimativa para temperatura de entrada da água no chuveiro elétrico.

$$Temp_{entrada\ media} = 28,08\ ^\circ\text{C}$$



A figura abaixo representa as curvas de temperatura para vazão superior de 4,5 litros por minuto.



**Figura 4.5 - Curvas de temperatura para vazão superior.**

- **Tempo inicial do ensaio:**  $T_i = 9,95 \text{ segundos}$
- **Temperatura de saída média em regime permanente:**  $Temp_{media\ ss} = 49,48^\circ\text{C}$
- **Temperatura média de entrada:**  $Temp_{entrada\ media} = 28,62^\circ\text{C}$

Na seção 2.6.3 foi visto que um sistema térmico pode ser modelado da seguinte forma:

$$G(s) = \frac{ke^{-Ts}}{\tau s + 1}$$

Os cálculos dos ganhos de temperatura, constantes de tempo do sistema e constantes de atraso para diferentes vazões foram feitos através dos dados obtidos na seção anterior e de uma análise das curvas mostradas nas figuras 30 e 31.

$$K = \frac{T_f - T_i}{V} \quad (5.1)$$

$$T(\tau) = (T_f - T_i) \cdot 0,632 + T_i \quad (5.2)$$

Tabela 4-1 - Cálculo de ganhos para diferentes vazões.

Cálculo de ganhos								
Volume escoado (l)	Vazão (l/min)	Temperatura de saída em regime permanente em °C	Temperatura inicial em °C	Ganho de temperatura em °C	Tensão eficaz em Vrms	(Ganho de temperatura)/(Ganho de tensão eficaz)	Ganho para vazões	Razão de ganhos para distúrbios
4,25	2,125	67,521	28,08	39,44	224	0,17609	18,6	1,891
5,6	2,8	59,917	28,24	31,68	224	0,14143	11,3	1,518
6,3	3,135	57,853	28,09	29,76	224	0,13286	9,49	1,427
6,8	3,4	56,119	28,29	27,83	224	0,12424	8,18	1,334
7,1	3,55	54,194	28,51	25,68	224	0,11465	7,23	1,231
9	4,5	49,485	28,62	20,86	224	0,09314	4,64	1

Para uma vazão de 4,5 litros por minuto, ou seja, a vazão máxima, o sistema tem o menor ganho ( $K=0,09$ ). Por outro lado, para vazão de 2,125 litros por minuto tem-se o maior ganho ( $K = 0,19$ ). Como visto no modelo desenvolvido por Ogata e visto na seção 2.6.1 o ganho do sistema corresponde a resistência térmica  $R$  ou  $1/Gc$ . Logo para vazões variação da vazão tem-se um efeito inversamente proporcional no ganho do sistema.

A razão de ganhos mostrada na ultima coluna da tabela 4.1 é usada para representar distúrbios de vazão no chuveiro quando este está em funcionamento. Como os limites inferiores e superiores de vazão de água ao qual o chuveiro é submetido estão representados na tabela acima pode-se considerar que em uma alteração da vazão máxima para vazão mínima acarreta um ganho de temperatura de 1,89.

As constantes de tempo para diferentes vazões foram obtidas da seguinte forma:

Tabela 4-2 - Cálculo de constantes de tempo para diferentes vazões.

Cálculo de constantes de tempo						
Vazão (l/min)	Temperatura de saída em regime permanente em °C	Temperatura inicial em °C	Temperatura T*	Tempo inicial	Tempo T*	Constante de tempo
2,125	70,12183735	28,08	54,65	10,22	28,22	18
2,8	59,91702413	28,24	48,26	10,75	26,06	15,31
3,135	57,85272973	28,09	46,9	11,56	25	13,44

3,4	56,11928775	28,29	45,88	12,1	25,27	13,17
3,55	54,19421053	28,51	44,74	11,29	24,19	12,9
4,5	49,484707320	28,62	41,81	11,56	22,58	11,02

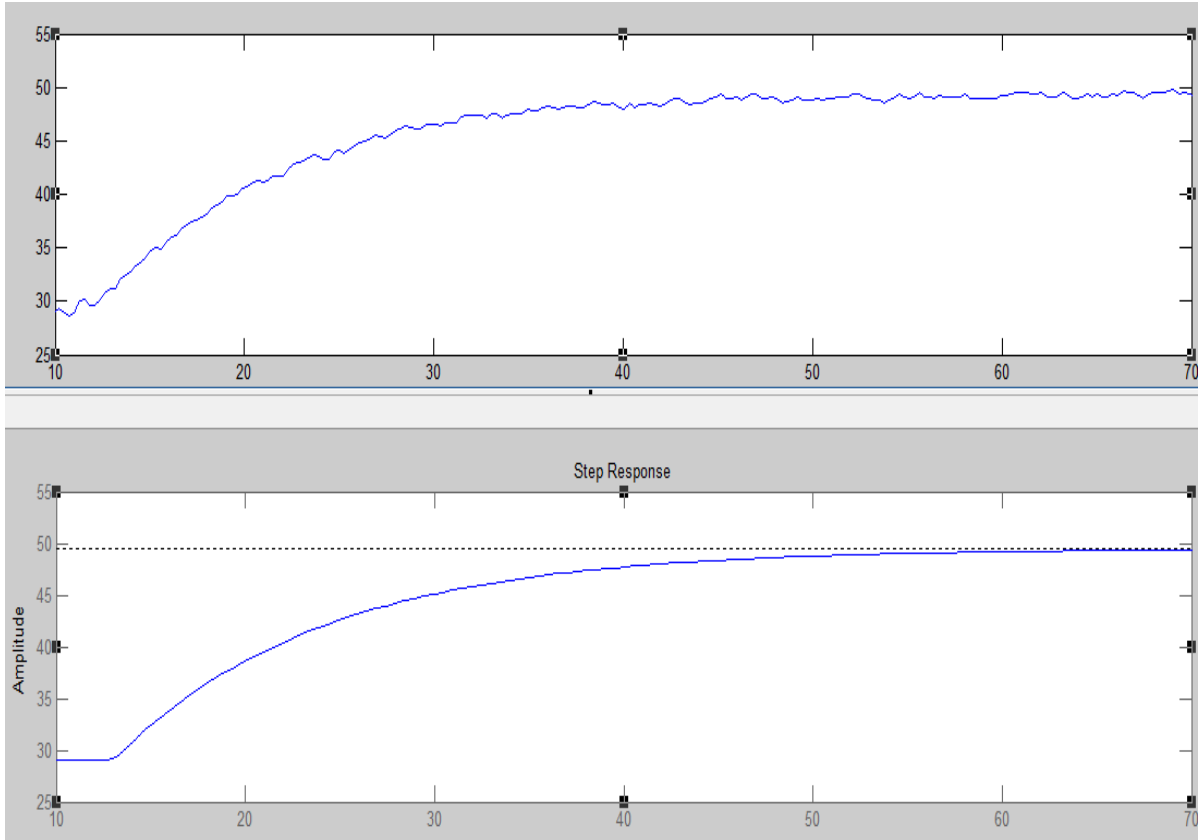
Esses dados também estão em consonância com o modelo desenvolvido pelo Ogata. Nele a constante de tempo de um aquecedor resistivo é dada pela razão  $M/G$ , onde  $M$  é a massa do líquido no reservatório e  $G$  é a vazão do líquido em regime permanente. Por  $M$  ser praticamente constante, a vazão  $G$  é inversamente proporcional a constante de tempo da função de transferência.

É importante notar que tanto o ganho quanto a constante de tempo da planta, modelada como sistema SISO, tendo como entrada a tensão eficaz e como saída a temperatura de saída, estão relacionados à vazão de água. Portanto, alterações na vazão alteram diretamente a função de transferência.

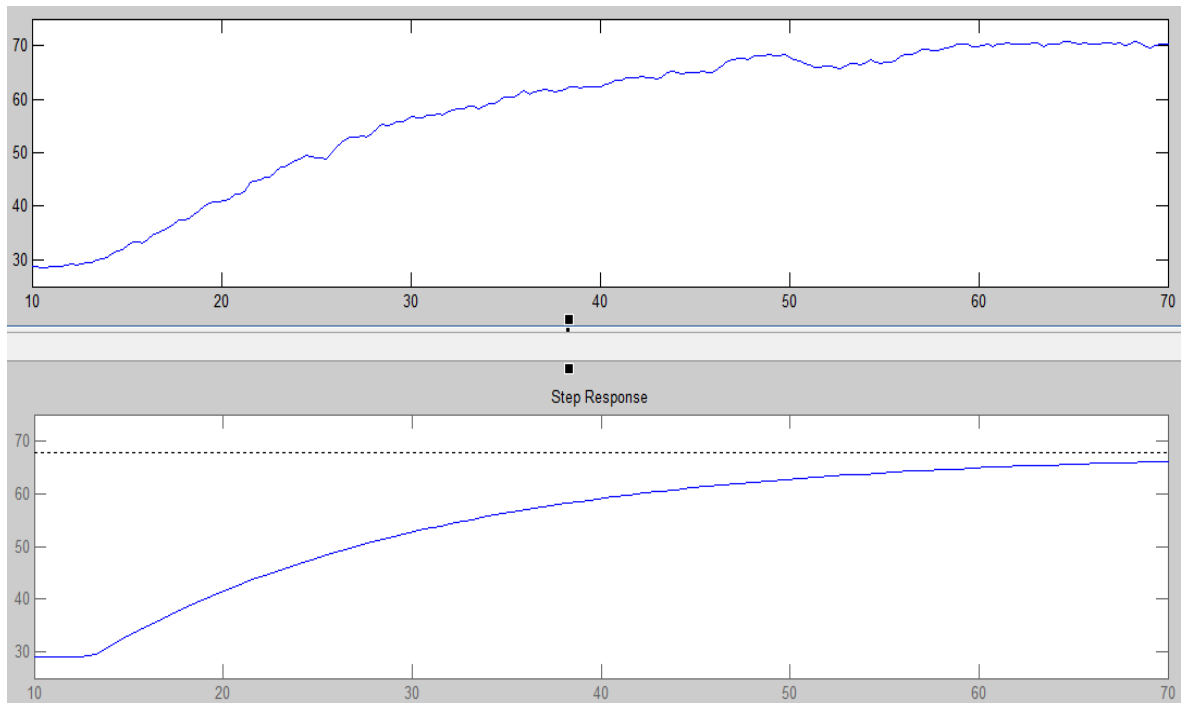
Através de uma análise do gráfico, uma simplificação de um sistema superamortecido por um de 1ª ordem com atraso foi estimado um valor para constante de atraso de tempo de 3 segundos. As funções transferência para os limites inferior e superior de vazão de água são mostrados abaixo.

	<i>Função de transferência</i>	<i>Vazão média em L/min</i>
Limite inferior de vazão	$\frac{Y(s)}{C(s)} = G_1(s) = e^{-3s} \frac{0,176}{18s + 1}$	2,125
Limite superior de vazão	$\frac{Y(s)}{C(s)} = G_2(s) = e^{-3s} \frac{0,0931}{11,02s + 1}$	4,5

Os modelos encontrados foram plotados juntamente aos dados de temperatura no tempo obtidos nos testes para os limites de vazão, de maneira a se investigar o comportamento deles e validá-los. Na figura 4.6 são comparadas as respostas.



**Figura 4.6 - Validação do modelo para limite superior de vazão.**

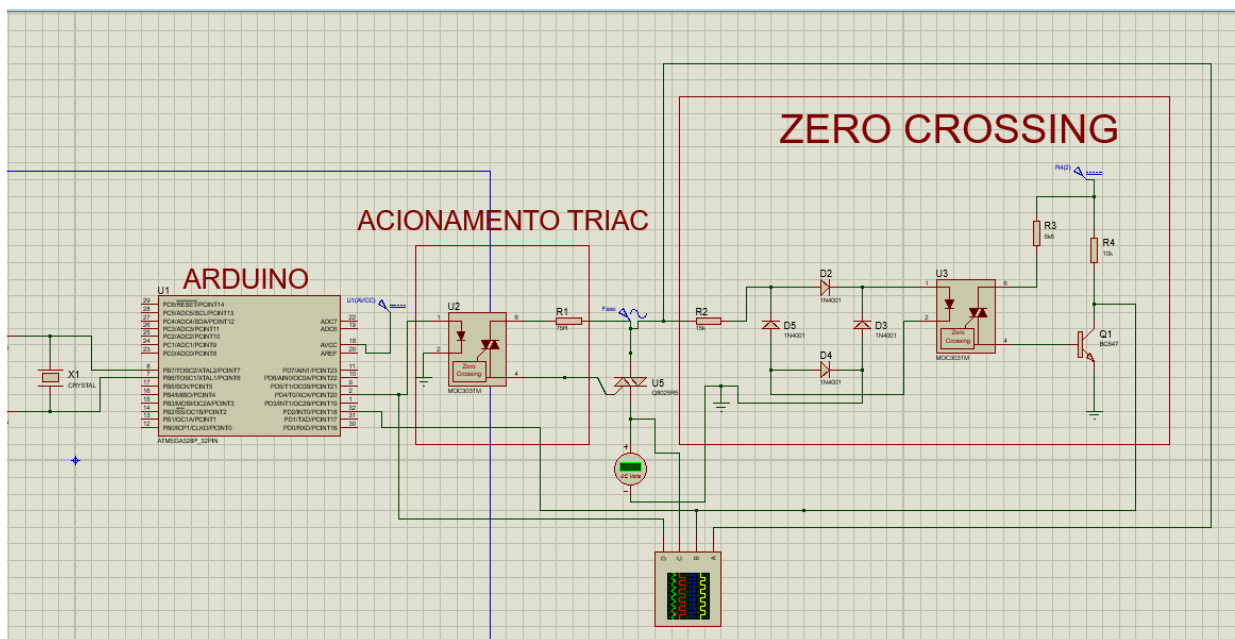


**Figura 4.7 - Validação do modelo para limite inferior de vazão.**

De acordo com o comportamento visto na prática para o chuveiro (para vazão máxima e mínima), e o comportamento para os modelos obtidos, esses foram considerados suficientes para descrever ambos os casos.

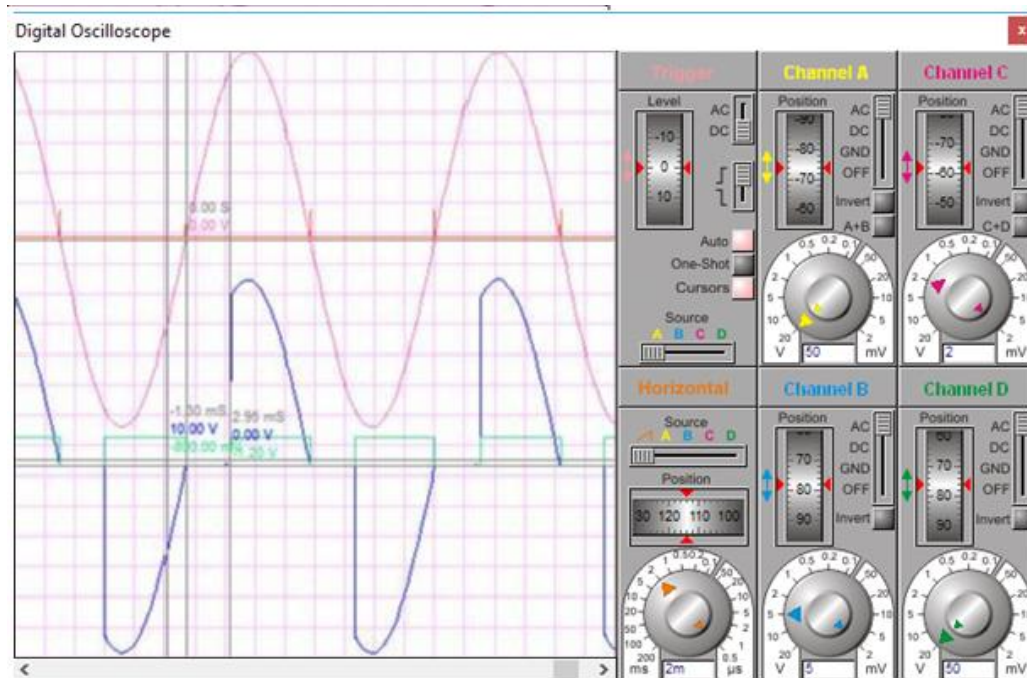
#### 4.3 Atuador no controle de potência para o chuveiro

O circuito elétrico descrito nas seções anteriores foi simulado no software Proteus e pode ser visto na figura 4.8. Nele é mostrado o circuito Zero Crossing, o circuito de acionamento do TRIAC e o arduino.



**Figura 4.8 - Circuito elétrico no Proteus.**

Como descrito nas seções anteriores os resultados obtidos na simulação estão mostrados na figura 4.9.



**Figura 4.9 - Resposta do circuito de acionamento no software Proteus.**

- O sinal senoidal proveniente da rede está ilustrado com a cor verde.
- O circuito de Passagem por Zero (Zero Crossing) gera uma interrupção no microcontrolador a cada passagem da onda senoidal pelo ponto de 0 volts. Esse sinal de interrupção está representado na figura 4.8 pelo pulso em cor azul.
- A partir da interrupção um pulso é dado após alguns milissegundos (sinal de cor rosa). Esse age como gatilho para acionar o TRIAC fazendo-o conduzir até a próxima passagem por zero.
- O sinal resultante de tensão eficaz, aplicado como entrada no chuveiro está representado pela curva em cor amarela.

#### 4.4 Transformação do sinal de pulso em valor de Tensão eficaz

O sinal de saída do ARDUINO que acionará o TRIAC é modulado através da Modulação por Posição de Pulso. É possível notar na figura 33 que a posição do pulso de acionamento, dentro do período da onda senoidal da rede, determinará a tensão eficaz fornecida ao chuveiro.

A expressão que o bloco função de transformação representa é encontrada aplicando-se a equação 4.1.

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{V_p^2}{T} \int_{\alpha}^{\pi} (\sin \theta)^2 d\theta} \quad (4.1)$$

Onde  $\alpha$  é o instante em que o pulso de acionamento do TRIAC é dado.

Desenvolvendo essa equação tem-se que:

$$(V_{ef})^2 = \frac{V_p^2}{T} \int_{\alpha}^{\pi} (\sin \theta)^2 \partial \theta \quad (V_{ef})^2 = \frac{V_p^2}{T} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta) \partial \theta$$

$$(V_{ef})^2 = \frac{V_p^2}{2T} \left[ \theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_{\alpha}^{\pi} \quad (V_{ef})^2 = \frac{V_p^2}{2T} \left[ (\pi - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\pi - \sin 2\alpha) \right]$$

Portanto a expressão de transformação encontrada é mostrada na equação 4.2.

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{V_p^2}{2T} \left[ (\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right]} \quad (4.2)$$

#### 4.5 Projeto do controlador PI

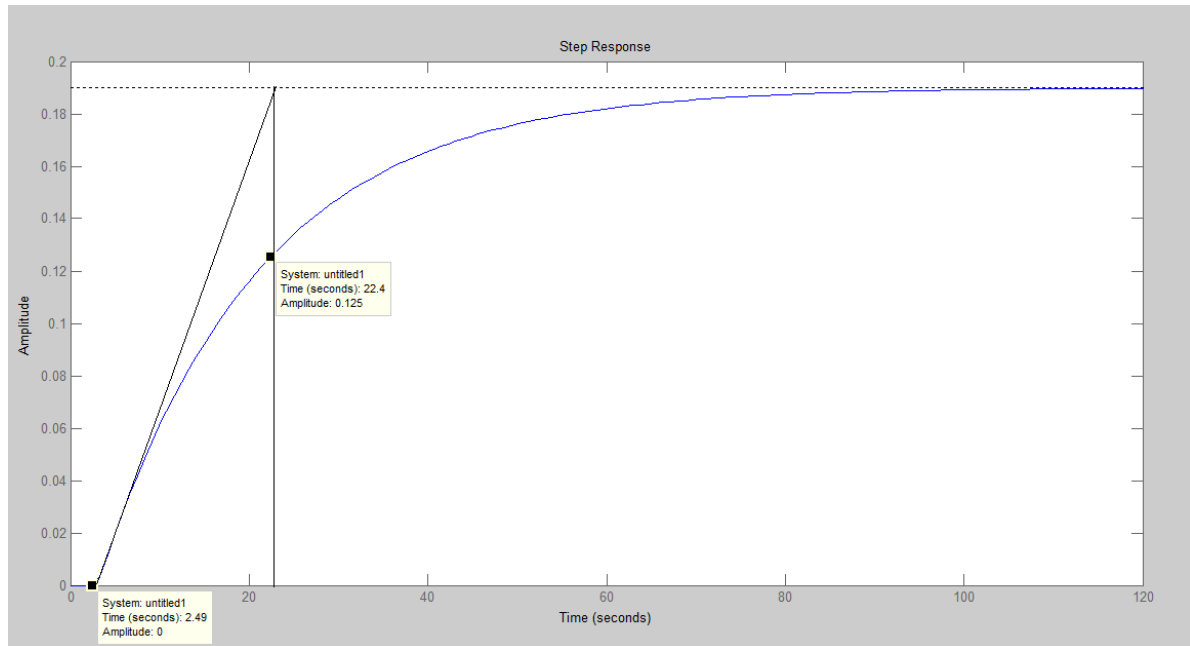
As funções de transferência encontradas foram:

$$G_i(s) = \frac{0,188}{18s + 1}, G_s(s) = \frac{0,093}{11,02s + 1} \quad (5.3)$$

O controlador em malha fechada deve ser capaz de eliminar o erro em regime permanente e rejeitar distúrbios de vazão. Devido às características do modelo e aos critérios de desempenho desejados para o sistema de controle, foi escolhido projetar-se um controlador proporcional integral. A forma desse controlador é mostrada abaixo.

$$K(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

A técnica escolhida devido a sua simplicidade e por ser analítica foi o 1º método de Ziegler-Nichols. O degrau unitário sobre o sistema é apresentado na figura 4.9. O projeto do controlador foi baseado no modelo matemático para vazão inferior. Isso porque este possui maior ganho e por consequência o sobressalto encontrado para esse caso será reduzido para vazões maiores. As funções de transferência para estas situações têm menor ganho.



**Figura 4.10 - Resposta para degrau sobre o sistema em malha aberta.**

Na resposta a um degrau unitário foram obtidos os valores de  $L = 2,49$  segundos e  $T = 22,6$  segundos. Com os valores de  $L$  e  $T$ , e a aplicação deles na tabela 2.2 chegou-se aos valores de  $K_p = 0,9$ ,  $\frac{T}{L} = 8,1686$  e  $T_i = 8,3$ .

#### 4.6 A simulação do sistema do chuveiro elétrico sujeito a distúrbio

A partir das funções de transferência obtidas foram feitas simulações utilizando-se a ferramenta SIMULINK do software MATLAB para o chuveiro operando em malha aberta e com dois sistemas de controle agindo, quando a planta é submetida a um distúrbio máximo de vazão. As respostas na saída e os sinais de controle oriundos dos controladores são mostrados a seguir.

##### 4.6.1 Simulação sistema em malha aberta

Na simulação feita no Simulink e mostrada na figura está representado o chuveiro em malha aberta quando sujeito a distúrbio de vazão.



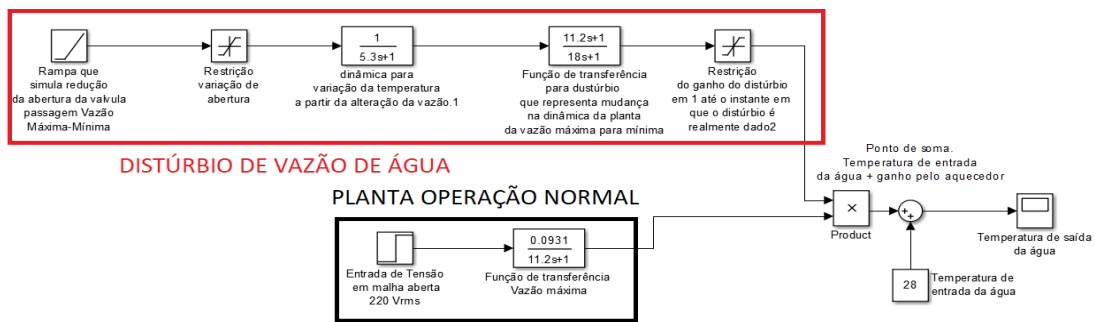


Figura 4.11 - Simulação do chuveiro em malha aberta sujeito a um distúrbio de vazão.

A Entrada em degrau de 220 V<sub>rms</sub> no instante inicial e a **Função de transferência Vazão Máxima** representam o chuveiro quando ligado na vazão máxima. Esses blocos estão no conjunto Planta em condições normais.

A **simulação do distúrbio** é feita da seguinte forma:

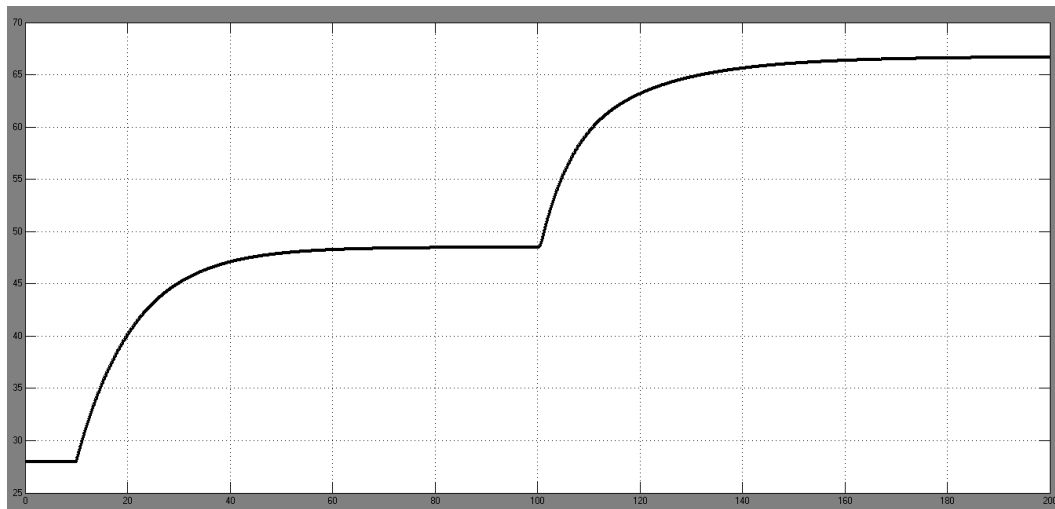
- Uma rampa é utilizada para representar o fechamento da válvula, ocorrido no intervalo de 2 segundos.
- O bloco **Restrição variação de abertura** limita o fechamento da válvula para que o chuveiro continue funcionando. O valor de saída desse bloco pode ser analisado pelo arquivo Simulink.
- O bloco **Dinâmica na Variação de Temperatura** representa a variação do parâmetro de acordo com a alteração da vazão.
- O bloco **Função de transferência para distúrbio** tem a função de alterar a dinâmica da planta quando o distúrbio é dado. Em regime permanente ele tem a função de alterar a constante de tempo da planta.
- O bloco **Restrição de ganho de distúrbio em 1** têm a função de manter esse distúrbio no valor 1 como limite inferior. Dessa maneira, no período em que o distúrbio é unitário a planta se comporta nas condições normais (Vazão máxima), pois este está associado por um bloco Product.

Após a ocorrência do distúrbio a rampa começa a atuar, subindo em um intervalo de 2 segundos até o valor de 1,89. Esse valor representa o ganho de temperatura no qual o chuveiro é submetido ao variar a vazão máxima para vazão mínima.

O quadro vermelho representa o ganho de temperatura dado, que é dependente da vazão de água e da tensão eficaz como entradas.

- O quadro amarelo representa a temperatura de entrada da água, que é considerada constante.
- O sinal de saída é dado pela soma entre a temperatura de entrada da água no chuveiro e o ganho de temperatura oferecido pela vazão e tensão eficaz fornecida.

A resposta do sistema em malha aberta é apresentada abaixo.



**Figura 4.12 - Resposta do chuveiro em vazão máxima a um degrau de tensão de 220 V<sub>rms</sub> sujeito a distúrbio que o altera para vazão mínima no instante de 100 segundos.**

#### 4.6.2 Simulação da planta controlada

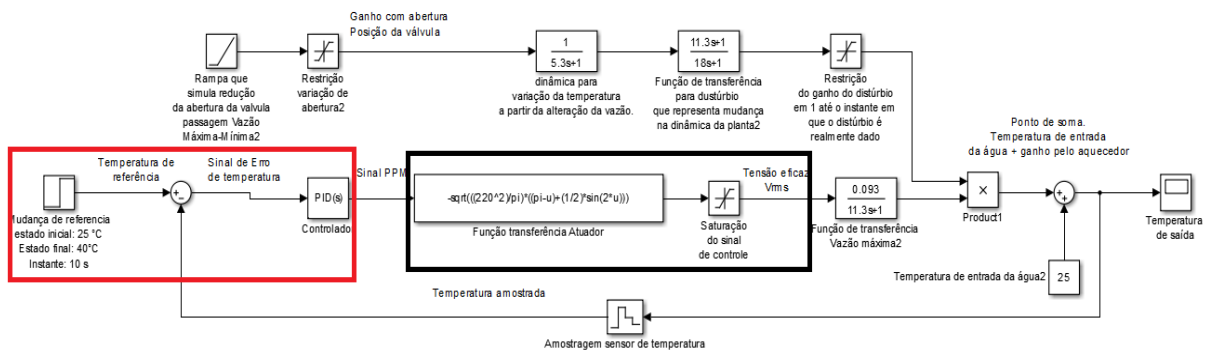
A partir da simulação mostrada acima, do sistema em malha aberta sujeito a um distúrbio no instante de 100 segundos, foi incluído um sistema de controle que tem a função de seguir uma temperatura de saída como referência (Temperatura de referência utilizada é de 40°C).

O bloco em verde contém a temperatura de referência, a temperatura de saída amostrada e um controlador discreto. Ambos são representados pelo arduino e o sinal de saída desse bloco é um sinal modulado por posição de pulso.

No bloco em vermelho está representado o atuador. Este tem a função de transformar um sinal PPM em tensão eficaz, tarefa executada na prática pelo dispositivo TRIAC.

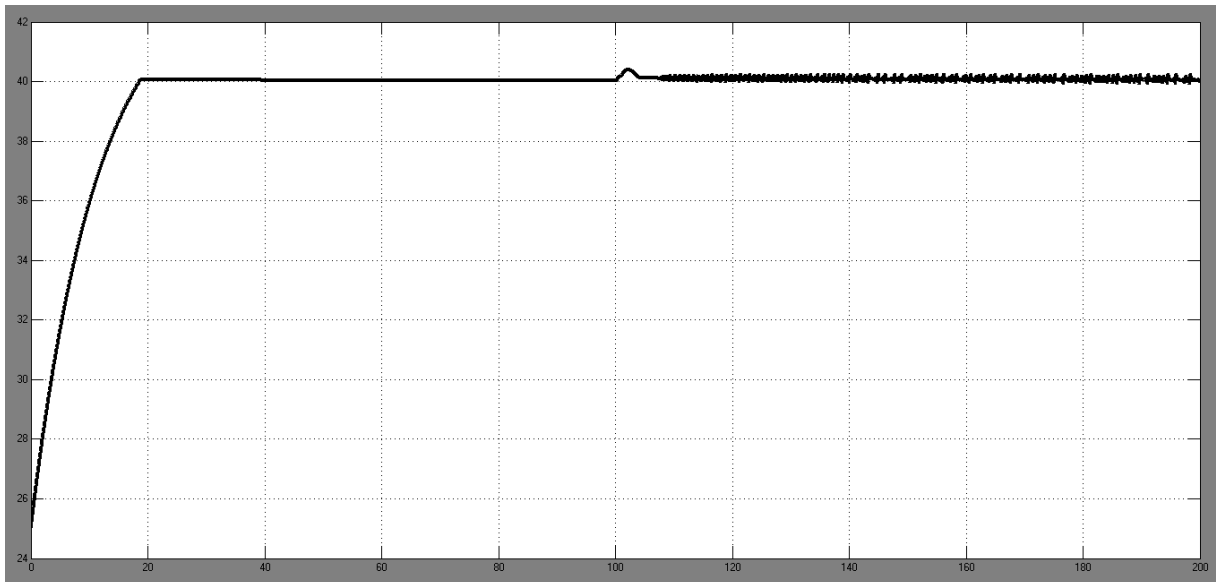
O bloco Saturação de sinal de controle limita o sinal de controle entre 220 V<sub>rms</sub> e 0 V<sub>rms</sub>. Observações importantes sobre esse bloco estão nas considerações finais.

O bloco Amostragem de temperatura tem por função representar o período necessário para que a temperatura de saída seja amostrada. Na prática esse tempo de amostragem é de 0,2 segundos.



**Figura 4.13 - Simulação do sistema de controle implantado ao chuveiro elétrico sujeito a distúrbio.**

As figuras abaixo correspondem às respostas da simulação no SIMULINK. A resposta para temperatura de saída nesse caso é mostrada na figura abaixo.



**Figura 4.14 - Sinal de temperatura de saída do chuveiro no tempo para o chuveiro sujeito a uma entrada de referência de 40°C e sujeito a distúrbio no instante de 100 segundos.**

A saída do sistema claramente representa um seguidor de referência configurado para manter a temperatura em 40°C após o acionamento do chuveiro. No instante de 100 segundos ocorre um distúrbio que altera a vazão do chuveiro e logo a função de transferência do chuveiro é alterada, como foi visto nas partes. Em resposta a esse distúrbio o controlador volta a agir e estabiliza a temperatura novamente em 40°C. Porém como é visto na figura 4.15, no regime permanente o sinal de controlador possui oscilações de grandes amplitudes e altas frequências.

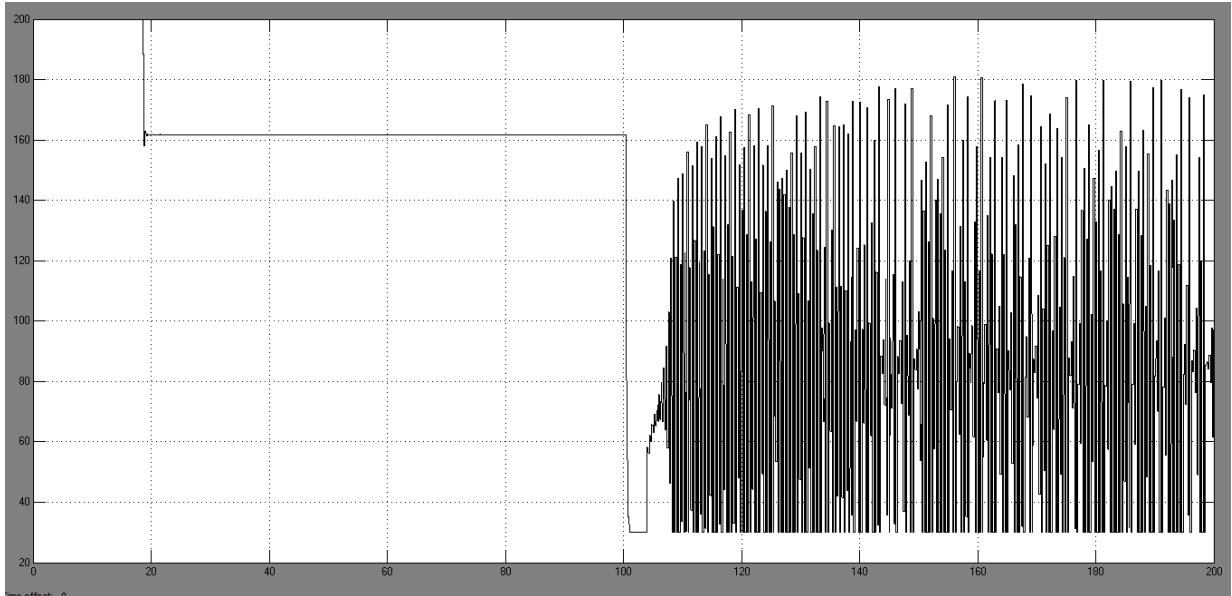


Figura 4.15 - Sinal de entrada no chuveiro para ganho fixo.

Essa oscilação em regime permanente é consequência do alto ganho do controlador pode não ser aconselhável para vida útil do componente, neste caso o TRIAC.

#### 4.6.3 Sistema de controle para chuveiro com troca de ganhos em controladores

Uma solução plausível, já que o controlador é digital e fornece facilmente essa oportunidade, é alterar o valor do ganho de acordo com o erro do sistema. Essa alternativa é apresentada abaixo.

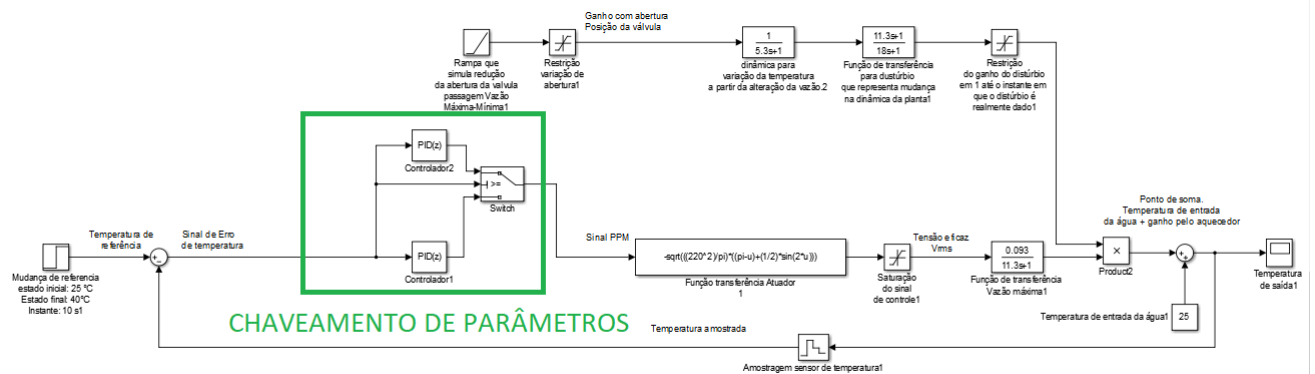
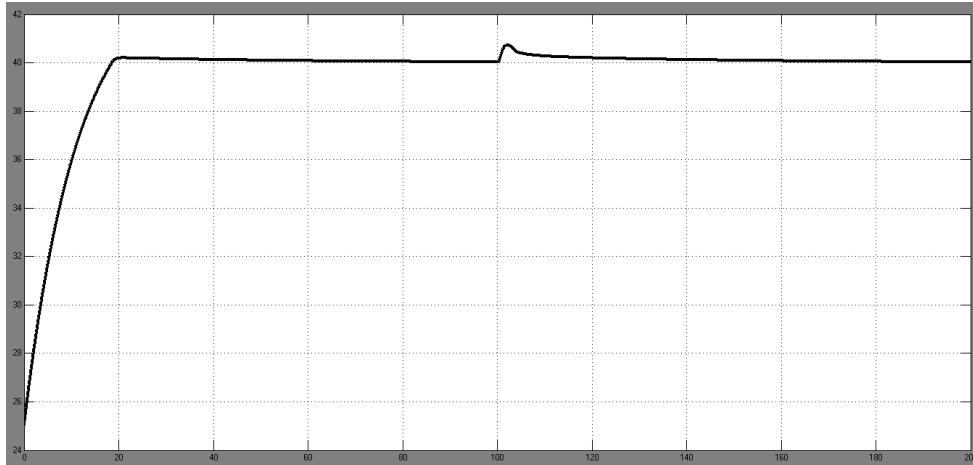


Figura 4.16 - Simulação da planta juntamente com o sistema de controle no Simulink.

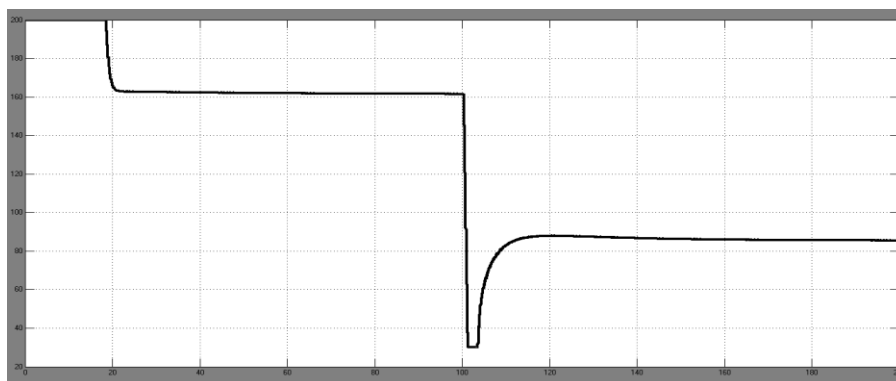
A saída para essa planta que representa um chuveiro com um sistema de controle para seguir uma referência de 40 °C para temperatura da água na saída e rejeitar um distúrbio está mostrada abaixo.



**Figura 4.17 - Temperatura da água na saída do chuveiro controlado.**

Devido ao chaveamento de controladores o sinal de controle é mantido aproximadamente constante por faixa aumentando a vida útil do atuador.

O sinal de controle para esse chaveamento está apresentado na figura abaixo.



**Figura 4.18 - Sinal de entrada (Tensão eficaz) a que o chuveiro é submetido.**

É possível ver, a partir da figura 4.18, que para manter a temperatura da água na saída do chuveiro em um valor de 40°C, quando o chuveiro opera próximo a sua vazão superior, é de aproximadamente 162  $V_{rms}$  no regime permanente. Quando o chuveiro passa a operar com vazão de água próxima ao limite inferior a tensão eficaz necessária para manter a mesma referência é de aproximadamente 56  $V_{rms}$  no regime permanente. Como visto as vazões para o caso prático visto aqui são de 4,5 e 2,125 litros por minuto, para vazões máximas e mínimas, respectivamente.

Portanto, o consumo de água é reduzido em mais de 50% e o consumo de energia elétrica é reduzido em aproximadamente 65%, valores significativos. Contudo, isso pode sacrificar o conforto térmico do usuário, algo indesejável. Logo, é essencial que o sistema de controle possa agir também sobre o parâmetro vazão de água.

## 5 CONCLUSÃO

As metodologias para análise e projeto de sistemas controle para aquecedores elétricos mais os dados experimentais coletados forneceram informações valiosas para obtenção dos modelos matemáticos, dimensionamento e projeto de sistemas de controle de temperatura para aquecedores de água residenciais.

Os estudos apontaram para necessidade de tratar a planta como sistema multivariável, devendo o sistema de controle agir tanto na tensão elétrica eficaz fornecida quanto na vazão de água a qual o chuveiro é submetido. Dessa maneira o sistema terá mais liberdade para operar, fornecendo uma quantidade específica de calor através de combinações entre vazão e potência elétrica fornecida, podendo alcançar uma eficiência energética ótima.

Neste trabalho, porém, o sistema se limitou a tratar o sistema como SISO (Single IN single OUT), tendo como entrada a tensão elétrica eficaz fornecida ao chuveiro elétrico e como saída a temperatura de saída da água. Isso porque na prática não era possível exercer um controle efetivo sobre a vazão de água, apenas um ajuste grosseiro e manual. Para os modelos matemáticos impetrados foram feitas estimativas de vazão média, a partir da contagem de volume escoado e alterações na vazão foram tratadas aqui como distúrbio.

### 5.1 Considerações sobre a vazão

Para o caso estudado, no qual o registro do chuveiro é totalmente manual, não é possível ler ou controlar a vazão instantânea ao longo do tempo. Consequentemente não é possível fazer um controle preciso desta, mesmo que manualmente. A variação da vazão de água altera a função transferência do sistema. No intervalo que varia da abertura mínima do registro e, portanto a menor vazão que se consegue aplicar ao chuveiro, até a abertura máxima (maior vazão possível), as constantes de tempo e ganhos do processo são inversamente proporcionais à vazão.

No caso prático visto, os valores obtidos, a partir das contagens do volume total de água escoado a cada teste e do tempo decorrido, foram usados para o cálculo da vazão média. Apesar de ser um método simples ele se mostrou suficiente se considerarmos que no regime permanente as curvas de temperatura se mantiveram praticamente constantes como apontam os gráficos. Com o uso dos valores de vazão média e das funções de transferência conclui-se que para obter a economia de água e energia, alvos do sistema de controle, deve-se fazer a vazão próxima do limite inferior.

Por outro lado, o conforto térmico do usuário está ligado não somente a temperatura da água de saída, mas ao calor transferido da água para a pessoa que usa o chuveiro elétrico. A correlação entre a vazão mássica e da temperatura da água na saída do chuveiro, com o calor compõe a solução para um sistema ótimo. Este deverá ter os parâmetros, vazão e temperatura de saída da água, controlados.

É possível perceber isso empiricamente, pois se a temperatura de saída de referência para o sistema de controle for  $38^{\circ}\text{C}$ , e for considerada agradável ao usuário quando o chuveiro opera com certa vazão de água, essa pode não ser confortável para valores de vazões menores.

Em paralelo o ambiente atua como agente que retira calor do corpo e da água aquecida já que na maioria dos casos a temperatura ambiente é menor do que a temperatura da água aquecida e do corpo humano ( $36^{\circ}\text{C}$ ). Esse fato também é percebido facilmente na prática, já que para dias em que a temperatura do ambiente é de  $4^{\circ}\text{C}$  uma temperatura confortável da água pode não ser para dias que marcam  $28^{\circ}\text{C}$ .

Portanto, a minimização da vazão de água pode causar economia de água e energia, mas retiram o conforto térmico do usuário. O ideal é se projetar um sistema de controle multivariável, onde é possível ler a temperatura de saída e de entrada da água e controlar a potência elétrica fornecida ao chuveiro e que também leia e manipule a vazão mássica instantânea da água. Assim é possível obter um controle ótimo de acordo com os critérios de projeto especificados.

Considerações sobre eficiência energética do chuveiro elétrico se encontram no apêndice deste trabalho.

## 5.2 Projeto de controlador SISO

Os modelos matemáticos para vazão de água inferior e superior se mostraram satisfatórios, visto que se comportam de maneira bem semelhante aos dados obtidos na prática. Eles foram obtidos no capítulo 4, a partir dos testes feitos, e em cima deles foi projetado um controlador PI, a partir do 1º método de Ziegler-Nichols. Esse controlador foi obtido com base no modelo para menor vazão, pois este possui um maior ganho. Assim, o sobressinal de 25% encontrado para este, por consequência do método, é reduzido para funções de transferência de menor ganho.

O sistema de controle mais a planta em vazão máxima foram simulados com o auxílio da ferramenta SIMULINK do software MATLAB, de modo a seguir uma temperatura de

referência na saída para saída. Essa situação foi colocada como ponto de operação normal do chuveiro. Nesta situação o consumo de água e de energia elétrica, para determinada temperatura de saída da água como referência, é máximo.

Além disso, o sistema de controle foi projetado também para desempenhar a função de rejeitar distúrbios de vazão. A partir das características de alterações no modelo matemático da planta colocada como sistema SISO, quando a vazão média se altera, foram inferidas informações sobre como a resposta do sistema se comporta com alterações na vazão.

As simulações foram satisfatórias quando um distúrbio de vazão máximo é aplicado ao chuveiro. Essa informação é valiosa, pois na simulação foi considerado que o sistema está em regime de operação normal quando em sua vazão máxima. O distúrbio é visto como a alteração da vazão de máxima para mínima. Quando o sistema está operando sob a ação desse distúrbio tem-se que sua vazão de água é mínima. Portanto a economia de água é máxima. Tem-se também que o consumo de energia elétrica é somente o necessário para manter a temperatura de referência da água na saída do chuveiro.

Através da simulação, inclusive com a representação de saturações no sinal de controle, aproximando-a mais ainda da realidade, também foi possível ver que para certos parâmetros do controlador, que dão o sistema uma resposta transitória suficiente, o sinal de controle quando o sistema opera em regime permanente possui grandes amplitudes e frequências, podendo esse processo deteriorar rapidamente o sistema de atuação sobre a tensão elétrica eficaz. Como foi utilizado um arduino, no qual o controlador é feito via software, a solução de se alterar os parâmetros do controlador, de acordo com o erro do sinal de saída, se mostrou simples e eficaz, como visto as respostas obtidas na seção 5.

### 5.3 Conclusões sobre eletrônica e instrumentação

A simulação dos circuitos elétricos no software Proteus e sua montagem prática proveram conhecimento sobre projeto de circuitos elétricos, confecção de placas de circuito impresso e sobre o dimensionamento de fios condutores, resistores, chaves estáticas e circuitos de isolamento.

Objetivo de realizar o projeto de um sistema de controle na prática não foi alcançado devido a problemas de funcionamento no circuito de detecção de passagem por zero da tensão da rede. Os circuitos impresso e o montado sobre o protoboard apresentaram mau contato, não gerando as interrupções no momento da passagem da tensão elétrica da rede por zero volts.



Esse fato impossibilitou a atuação sobre a tensão elétrica na prática. A solução para esse problema foi estendida para um trabalho futuro, já apresentando melhores alternativas como é descrito na seção seguinte.

A leitura, calibração e tratamento de ruído sobre temperatura medida forneceram conhecimento esperado sobre metodologias e características do processo de medição desse parâmetro. Para um sistema de controle ótimo é ideal que os sensores de temperatura estejam bem posicionados, possuam ruído de medição e período de aquisição de temperatura, mínimos.

#### 5.4 Geral

No geral foram identificadas maneiras de obter economia de energia elétrica, água e melhorar o conforto térmico para usuários de chuveiros elétricos. Aqui esses dispositivos foram tratados como um sistema como SISO. A partir disso foram obtidos modelos matemáticos com a estrutura SISO e explicitadas formas de projeto de um circuito elétrico que atue na tensão eficaz aplicada aos mesmos e a manipule, buscando manter uma temperatura de referência para água na saída com a ajuda do controlador embutido no arduino. Também foi desenvolvida uma metodologia para se realizar a aquisição de temperatura.

Chegou-se a conclusão de que o ideal é que, além do controle da temperatura de saída da água, por meio da atuação na tensão elétrica eficaz fornecida, se faça a medição e controle de vazão instantânea de água sobre o chuveiro, tratando o sistema como MIMO (duas entradas e uma saída). Assim pode-se considerar como saída do sistema, e parâmetro a se controlar, o calor. O sistema mostrado aqui tem economia de água e energia maximizada. Porém, devido ao interesse em combinar essa economia ao conforto térmico é essencial tratar a saída do sistema como calor entregue a uma quantidade de massa por unidade de tempo.

A combinação desses fatores com algoritmos específicos, presentes no microcontrolador são inteiramente alcançáveis. A integração desses sistemas de controle a módulos de transmissão por rádio frequência oferecem ao equipamento a capacidade de ser manipulado remotamente e assim processar informações referentes ao processo em computadores de maior competência computacional. Possibilidades de aplicação estão propostos na seção trabalhos futuros, ambos com objetivo de tornar os banhos domésticos inteligentes.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

O assunto sobre chuveiros elétricos é extenso, como visto neste trabalho. Os estudos desenvolvidos contribuíram de forma significativa, apontando inúmeros caminhos a serem percorridos, baseados em informações contidas e inferidas nos capítulos aqui presentes, para alcançar os objetivos de uma economia de água e energia elétrica combinados com um conforto térmico otimizado para o usuário. As informações extraídas aqui evidenciaram a importância do controle de vazão e da maximização da temperatura da água na entrada do chuveiro na saída para chegar-se aos objetivos. Ambos merecem uma atenção em projetos futuros, buscando a construção, no ponto de vista de controle, de um sistema de controle multivariável, atuando sobre a tensão elétrica eficaz e a vazão da água na saída do chuveiro para, para manter uma quantidade de calor fornecida ao usuário. Como esse calor depende das duas entradas, ele pode fornecer a mesma quantidade de calor ao usuário com diferentes arranjos dessas entradas. Logo, pode-se construir um sistema de controle ótimo.

Outro viés que pode ser explorado, devido às ferramentas que podem ser integradas ao arduino ou a outros microcontroladores, está associado à tecnologia da informação e ciência da computação disponíveis. Isso possibilita a manipulação de dados e controle do processo fora do sistema físico (chuveiro elétrico). Com o auxílio de módulos Wi-Fi embarcados para transmissão a outros dispositivos de maior capacidade computacional contribuem na melhoria do sistema para torna-lo inteligente. A seguir são detalhadas propostas de trabalhos futuros, relacionados ao tema e objetivo deste.

### 6.1 Acionamento e comunicação com o chuveiro

Um sistema embarcado para ser operável deve atender quesitos como conectividade, interface com o usuário, métodos de acionamento e alimentação do sistema de controle. Desse modo se propõe aqui acrescentar os seguintes pontos ao projeto:

- Alimentar arduino com 5V de acordo com tensão fornecida da alimentação do próprio chuveiro e para isso criar circuito retificador.
- Criar uma rotina que ligue o sistema de controle (ARDUINO sensor e atuador) somente quando os contatos do chuveiro estiverem fechados (sinal de que o chuveiro foi ligado).
- Acoplar módulo Wi-Fi ao ARDUINO e conectá-los a um computador, para que se comuniquem, objetivando a criação de um banco de dados e a operação por acesso remoto. Parâmetros como a temperatura de saída da água, temperatura de referência,

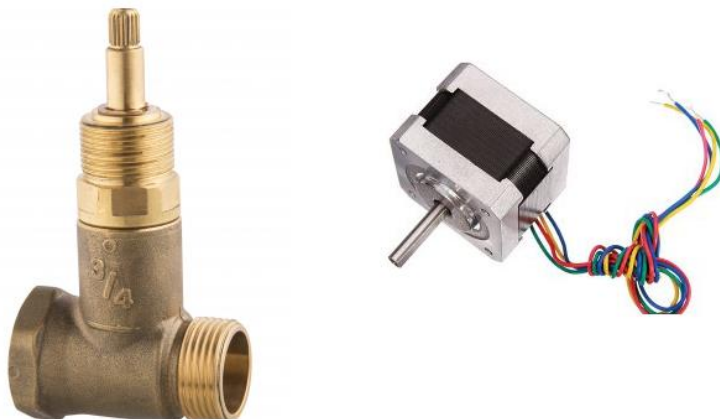
tempo de funcionamento do sistema de controle, horários e potência elétrica consumida podem conter esse banco de dados.

- Criar um aplicativo para que o usuário se comunique com o chuveiro via smartphone.

## 6.2 Controle de vazão de água

A associação do sistema descrito neste trabalho com válvulas controladoras de vazão oferece condições para melhorar o acionamento e controle do chuveiro. Este tem como entradas os sinais de acionamento da válvula de vazão e do circuito de potência elétrica. As saídas são a vazão de água e a temperatura de saída ao longo do tempo.

O controle de vazão pode ser construído na prática associando-se um registro de pressão, que possui boa precisão em a um motor de passo. Esses dois equipamentos são mostrados na figura 39 e com a junção deles é possível controlar a vazão de água através do sinal enviado por um microcontrolador ao motor de passo.



**Figura 6.1 - Registro de pressão para chuveiros e motor de passo. Fontes: Casa&Construção e Filipeflop.**

Logo a baixo é mostrado um modelo genérico no espaço de estados com variáveis de estado  $T$  e  $G$ , a temperatura de saída e a vazão de água, respectivamente. As entradas são a tensão elétrica eficaz  $P$  e o número de passos que o motor de passos possui  $N$ .

$$\begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ N \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} r \\ s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T & G \end{bmatrix}$$

É possível ver que essa saída  $Y$  depende da vazão e da temperatura de saída da água e por isso as variáveis  $r$  e  $s$  são não-nulas. Caso o vetor  $C$  ou  $[r \ s] = [c \ 1]$  ou  $[1 \ c]$  resulta que a saída é o calor fornecido, dado por

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

$$Q = Y_1 \cdot Y_2 = T \cdot G$$

Modelos no espaço de estados são passíveis de transformações em suas matrizes e a combinação dessa vantagem mais a implementação de controladores ótimos tornam o prosseguimento da pesquisa nesse ramo atraente.

Aqui propõem-se realizar a construção de um sistema composto por chuveiro elétrico, sistema de controle e atuação na vazão e temperatura de água. Após a construção pretende-se executar a modelagem matemática do sistema MIMO por espaço de estados e projetar um controlador ótimo, visando fornecer o calor necessário ao usuário variando-se a temperatura ou a vazão para maximizar a eficiência. Pretende-se também coletar dados como a vazão de água no chuveiro ao longo do tempo nos banhos e consumo total, para alimentar um banco de dados fora do sistema embarcado e serem utilizadas na inferência de conhecimento sobre o processo.

### 6.3 Maximização da temperatura do líquido na entrada em regime permanente

A economia de energia elétrica no sistema de aquecimento de água pode ser maximizada com um projeto hidráulico adequado. Ficou evidente neste trabalho que a eficiência do chuveiro pode ser aumentada caso a temperatura da água na entrada se aproxime da temperatura de referência para saída. Assim, um sistema hidráulico que maximize a transferência de calor da radiação solar ao reservatório que contém a água pode reduzir consideravelmente o uso de energia elétrica para manter uma temperatura de referência.



**Figura 6.2 - Sistema de aquecimento solar de água. Fonte: Universidade do sol**

Alguns dados que podem ser coletados desse sistema são:

- Consumo de energia do chuveiro e horário dos banhos.

- Temperatura da água nos reservatórios durante os horários do dia.
- Referências de temperatura nos variados dias do ano.

Futuramente se propõe aqui o desenvolvimento de um sistema hidráulico que maximize a temperatura da água na entrada do chuveiro por meio do uso da radiação solar, investigando a melhor forma de dimensionamento para tal sistema e considerações sobre redução de custos.

#### 6.4 Aplicação de IoT para gerar inteligência sobre o processo

A aplicação de algoritmos específicos para análise de dados em sistemas com grande capacidade computacional para inferência de conhecimento sobre o processo é uma área tecnológica interessante a ser explorada. A comunicação dos sistemas embarcados com a rede fornece a possibilidade da implementação de inúmeras funções de inteligência. Sobre o processo de aquecimento de água nos chuveiros elétricos pode-se trabalhar com as variáveis temperatura de referência, vazão de água ao longo do tempo, temperatura do líquido de entrada, temperatura do líquido de saída, consumo e custo da energia elétrica e temperatura atual do ambiente em banhos domésticos.

Assim, para atingir objetivos base desse trabalho que são economia de água, energia e melhoria no conforto térmico para usuário, esse tópico se propõe a empregar técnicas em cima do processo e comunicação entre dispositivos, aprofundando-se no campo da Internet das Coisas, abrindo caminho para desenvolvimento de chuveiros inteligentes.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, B. R. 2009.** *Controle digital de um Condicionador de Tensão Alternada*. Instituto Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2009. Trabalho de conclusão de curso.
- ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. 2013.** Analógica. [Online] 5 de 2013. [Citado em: 04 de 01 de 2018.] <http://www.analogica.com.br/arquivos/nt-008--medidores-temperatura-com-sensor-termopar.pdf>.
- ASSUNÇÃO, E. 2013.** *Controle Digital*. Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP. Ilha Solteira : s.n., 2013.
- BORDIGNON, A. 2014.** *Estudo de Conservação de Energia Elétrica evidenciando Proposta de Modulação de Potência de Forno Elétrico em uma Indústria Alimentícia*. Departamento Acadêmico de Elétrica, UTFPR. Pato Branco : s.n., 2014. Trabalho de Conclusão de Curso.
- BRECHT, D. G. 2016.** *Estado da arte sobre aquecimento de água no Brasil*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2016.
- CAMPEZATTO, D. V. 2014.** *Misturador Automático de Água Quente e Fria*. Porto Alegre : s.n., 2014.
- CASTRO, A. P M., et al. 2006.** *Guia Prático para o Manejo da Dermatite Atópica*. 2006.
- CENGEL, Y. A. e GHAJAR, A. J. 2012.** *Transferência de Calor e Massa, uma abordagem prática*. [trad.] F. A. M. LINO. 4ª ed. Porto Alegre : McGraw Hill, 2012. p. 903.
- CESTILE, M. 2012.** *materiais elétricos: Compêndio de trabalhos- Fornos elétricos*. Foz do Iguaçu : Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.
- CORDEIRO, Daniel A. S., et al. 2017.** *Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Temperatura de um Forno Elétrico a Resistência para Soldagem Reflow*. 2017, p. 8.
- DORF, R. C. e BISHOP, R. H. 2001.** *Modern Control Systems*. 9ª ed. New Jersey : Prentice Hall, 2001.
- ESTEVÃO, V. 2017.** *Efeito Joule*. [Online] 2017. [Citado em: 24 de 12 de 2017.] <http://www.efeitojoule.com/2014/04/lei-de-joule.html>.

**FUTURE ELETRONICS. 2017.** Future Eletronics. [Online] 2017. [Citado em: 25 de 12 de 2017.] <http://www.futureelectronics.com/en/optoelectronics/optocouplers.aspx>.

**GAIEWSKI, J. V. B., KOZAKEVITCH, K. A. e MENEZES, M. A. C. 2015.** *Desenvolvimento de microforno elétrico utilizando controlador PID*. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR. Curitiba : s.n., 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.

**GUERRA, L. N. A. 2006.** Uso de compensador PID no controle de taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistencia. *Monografia em Graduação*. Rio de Janeiro : UFRJ, 2006. p. 44.

**HOLMAN, J. P. 1983.** *Transferência de calor*. [trad.] L. F. MILANEZ. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1983. p. 639.

**INCROPERA, F. P., et al. 2008.** *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. [trad.] E. N. QUEIROZ e F. L. P PESSOA. 6ª ed. Rio de Janeiro : Gen, 2008. p. 643.

**Marathonheater. 2009.** Controle Digital de um condicionador de Tensão Alternada. *Marathonheater*. [Online] 2009. [Citado em: 19 de 12 de 2017.] [http://www.marathonheater.in/uploads/Downloads/d27e80c1-3713-4758-b8a9-8df5d0871791\\_handbook%20on%20heaters.pdf](http://www.marathonheater.in/uploads/Downloads/d27e80c1-3713-4758-b8a9-8df5d0871791_handbook%20on%20heaters.pdf).

**MARTINS, B. A. M. 2008.** *Desenvolvimento de um Forno de Fusão e Vazamento de Ligas de titânio e outras Ligas Reativas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto : s.n., 2008. Dissertação de Mestrado.

**MARTINS, M. J. G. 2013.** *Primeira lei da Termodinâmica*. Universidade da Beira Interior. Covilhã : s.n., 2013. Relatório de Estágio para Obtenção do grau de Mestre em ensino de Física e Química.

**MAXWELL, J. C. 1868.** On Governors. *Precedings of the Royal Society*. 5 de 3 de 1868.

**MUNDO DA ELÉTRICA. 2017.** Como funciona um Dimmer. *Mundo da Elétrica*. [Online] 2017. [Citado em: 2017 de 12 de 25.] <https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funciona-um-dimmer/>.

**MUSSOI, F. L. R. 2004.** *Respostas em frequência: FILTROS PASSIVOS*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Florianópolis : s.n., 2004.

**NOVA ELETRÔNICA. 2017.** *Nova Eletrônica*. [Online] 2017. [Citado em: 25 de 12 de 2017.] <http://www.novaeletronica.com.br/triac/>.

**OGATA, K. 1982.** *Engenharia de Controle Moderno*. [trad.] A. F. KOHN e J. C. T. B. MORAES. Rio de Janeiro : Prentice/Hall do Brasil, 1982. p. 928.

*Os experimentos de Joule e a Primeira Lei da Termodinâmica.* **PASSOS, J. C. 2009.** Florianópolis : UFSC, 2009, Revista Brasileira de Ensino de Física.

**RODRIGUES, G. G. 1996.** *Identificação de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares Utilizando Modelos NARMAX Polinomiais Aplicação a Sistemas Reais*. Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte : UFMG, 1996. Dissertação de Mestrado.

**SEDRA, A. S. e SMITH, K. C. 1998.** *Microeletronic Circuits*. 4ª ed. New York : Oxford, 1998. p. 1237.

**SILVA, C. S. D. 2004.** *Modelização de transformadores a Frequência Variável, incluindo os Efeitos dos Harmônicos*. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de computadores, Faculdade de Engenharia do Porto. Coimbra : s.n., 2004. Dissertação de Mestrado.

**SILVA, L. J. 2017.** *Internet das Coisas*. Departamento de Engenharia Elétrica e Telemática, Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça : s.n., 2017.

**SOFISICA. 2017.** *Calorimetria*. 2017. Calorimetria.

**TOCCI, R. J. e WIDNER, N. S. 2001.** *Digital Systems, Principles and Applications*. 8ª ed. New Jersey : Prentice Hall, 2001. p. 858.