

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



PETERSON DA SILVA CEZAR

**MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UM
FORNO TUBULAR RESISTIVO COM OPERAÇÃO
REMOTA**

VITÓRIA – ES
FEVEREIRO/2017

PETERSON DA SILVA CEZAR

**MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UM FORNO
TUBULAR RESISTIVO COM OPERAÇÃO REMOTA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Peterson da Silva Cezar**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Mattedi

VITÓRIA – ES
FEVEREIRO/2017

PETERSON DA SILVA CEZAR

MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UM FORNO TUBULAR RESISTIVO COM OPERAÇÃO REMOTA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Peterson da Silva Cezar**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 24 de fevereiro de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Dr. Alessandro Mattedi
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Coorientador

Prof. Dr. José Leandro Felix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

Prof. MSc. Vinicius Secchin de Mello
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Examinador

Enga. Dayane Corneau Broedel
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por um dia ter mudado a minha história, e dentre tantos outros benefícios, estar permitindo-me viver esse momento tão especial. Por ter-me feito sentir que não estava só nessa caminhada, pois Ele estava sempre ao meu lado com a sua boa mão para me ajudar. Foi muito bom ter visto que o que Deus pode fazer, é realmente indescritível.

Sou imensamente grato também aos meus pais, Rita e Valmir, por tamanho empenho para que eu chegasse até aqui. O apoio de vocês foi fundamental para a minha formação pessoal e profissional. Muito obrigado! Agradeço também a todos os meus familiares que sempre acreditaram em mim e me incentivaram. Muito obrigado! À minha noiva, Lauanda, sou grato pela compreensão e auxílio nessa jornada. Seu apoio foi muito importante para mim. Muito obrigado!

Aos amigos de turma, sou grato pelo companheirismo nessa graduação. Foi muito bom ter vivido toda essa etapa com vocês. Muito obrigado! Agradeço também a todos os meus professores pelo conhecimento transmitido. Em especial aos meus orientadores, Jussara e Alessandro, por toda atenção e direcionamento na execução deste projeto. Muito obrigado!

Aos meus colegas do SUPERA, agradeço por todas as dicas, diálogos e resultados alcançados. Muito obrigado a todos! Em especial, agradeço ao professor Marcos Tadeu pelo apoio e confiança na execução deste projeto. Agradeço também a todos os colegas do PET Engenharia Elétrica pelo aprendizado que obtivemos juntos.

Por fim, agradeço à FAPES pelo apoio e amparo a este projeto.

Mas, como está escrito: As coisas que o olho não viu, e o ouvido não ouviu, e não subiram ao coração do homem, são as que Deus preparou para os que o amam.
Apóstolo Paulo, I Coríntios 2:9, Bíblia Sagrada.

RESUMO

Um sistema de controle e automação, quando bem projetado, pode proporcionar vários ganhos ao processo em que for incorporado. No caso do forno Zeternit I, a necessidade era modernizar a sua automação, uma vez que possuía um controlador analógico e não apresentava bons resultados na fabricação de cerâmicas supercondutoras, além de necessitar de acompanhamento local. Nesse projeto foi implementado um sistema de medição de temperatura com um termopar tipo K e um módulo MAX31855K, um circuito de acionamento elétrico baseado na modulação PWM utilizando um relé de estado sólido, um controlador PI *gain schedule*, um sistema supervisorio com operação remota, além de ter sido identificado um modelo dinâmico para o forno. Durante os testes iniciais observou-se que variações na tensão da rede geravam oscilações na temperatura, dificultando a identificação. Foi utilizado um analisador de qualidade de energia para quantificar essa contribuição e permitir a obtenção do modelo. Após isso, foi projetado o controlador PI que apresentou bons resultados, acelerando a resposta do sistema e eliminando o erro em regime permanente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forno Zeternit I	9
Figura 2 – Primeiro sistema de automação do forno Zeternit I	10
Figura 3 – Sistema de controle em malha fechada	13
Figura 4 – Arquitetura de modernização da automação do forno Zeternit I	14
Figura 5 – Arduino Uno.....	15
Figura 6 – Amplificador MAX31855K	17
Figura 7 – Formas de onda de tensão e referência de zero para potência de 20% (à esquerda) e 75% (à direita).....	18
Figura 8 – Sinal do tipo PWM.....	19
Figura 9 – Relé de estado sólido TSZC-25A.....	20
Figura 10 – Circuito interno de um relé de estado sólido.....	21
Figura 11 – Tensão da rede e corrente do forno para uma potência de 52%	22
Figura 12 – Acesso a um supervisor através de dispositivos móveis.....	23
Figura 13 – Tela do sistema supervisor	24
Figura 14 – Teste de resposta ao degrau de um sistema de 1ª ordem.....	27
Figura 15 – Primeiro teste de identificação do forno	28
Figura 16 – Tensão elétrica medida da rede	29
Figura 17 – Comparação da potência elétrica esperada e medida	30
Figura 18 – Segundo teste de identificação	31
Figura 19 – Comparação entre os dados reais (preto) e os dados estimados pelo modelo (verde).....	32
Figura 20 – Resposta do forno em malha aberta	35
Figura 21 – Diagrama de simulação do <i>Simulink</i>	36
Figura 22 – Resultado da simulação com controlador PI.....	36
Figura 23 – Primeiro teste de sintonia no forno - Regime transitório	37
Figura 24 – Primeiro teste de sintonia no forno - Regime permanente	38
Figura 25 – Segundo teste de sintonia no forno - Regime transitório	39
Figura 26 – Segundo teste de sintonia no forno - Regime permanente	39
Figura 27 – Terceiro teste de sintonia no forno - Regime transitório e permanente	40
Figura 28 – Teste de controle Servo	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
	2.1 Objetivo geral	12
	2.2 Objetivos específicos	12
3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	13
	3.1 O ARDUINO UNO	14
	3.2 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	15
	3.3 CIRCUITO DE ACIONAMENTO ELÉTRICO.....	17
	3.4 O SISTEMA SUPERVISÓRIO COM ACESSO REMOTO	22
	3.5 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DO FORNO.....	25
	3.6 PROJETO DO CONTROLADOR PID.....	33
4	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

Supercondutividade é uma característica pertencente a materiais que apresentam pouca ou nenhuma resistência à corrente elétrica quando submetidos a uma temperatura abaixo de um valor limite, denominada temperatura crítica (T_c) (BRANÍCIO, 2001). Esse fenômeno foi descoberto por Heike Kamerlingh-Onnes, em 1911, no seu laboratório em Leiden, Holanda, onde verificou que a resistência elétrica do mercúrio caía abruptamente a zero quando a temperatura da amostra ficava abaixo de -268 °C , o que lhe rendeu o prêmio Nobel de Física em 2013. Mais tarde, em 1986, como resultado do trabalho de Alex Muller e Georg Bednorz, surgem os supercondutores de alta temperatura crítica, possibilitando novas aplicações por possuírem temperaturas críticas maiores do que a temperatura de liquefação do nitrogênio ($-198,79\text{ °C}$) (ROMAGUERA, SMITH & DORIA, 2009).

O fato de não possuírem resistência elétrica dá aos supercondutores a importante característica de conduzir corrente elétrica sem perda de energia, tornando-os extremamente úteis em sistemas nos quais se busca economia da mesma. Atualmente, eles são utilizados em equipamentos de ressonância magnética para diagnósticos médicos, aceleradores de partículas para estudo da física de partículas, trem supervelozes, dentre outros (ROMAGUERA, SMITH & DORIA, 2009).

Visando explorar as promissoras características elétricas dos supercondutores e desenvolver pesquisas aplicadas a sistemas de energia, foi criado o Laboratório de Supercondutividade Aplicada (SUPERA) do departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Nesse laboratório são realizados apenas projetos de aplicação dos supercondutores, como o de construção de um limitador de corrente de partida de motores de indução trifásicos utilizando supercondutores de alta temperatura crítica (SILVA et al., 2010).

A UFES possui no Departamento de Física o Laboratório de Altas Pressões (PRESLAB), que pesquisa e fabrica supercondutores cerâmicos de alta temperatura crítica. Devido às necessidades de uso de cerâmicas supercondutoras pelo SUPERA, foi firmada uma parceria entre esse e o PRESLAB, o que permitiu o avanço de novas pesquisas na área em ambos os laboratórios.

A síntese das cerâmicas envolve várias etapas de tratamento químico, dopagem de oxigênio e tratamento térmico, sendo todas elas de suma importância para a qualidade da produção do supercondutor (PASSOS, 2007). Os tratamentos químicos são realizados no PRESLAB, onde estão disponíveis todos os equipamentos e instrumentos necessários nessa etapa. Nos tratamentos térmicos, a amostra é submetida a temperaturas entre 800 °C e 1100 °C durante várias horas, conforme a etapa do processo de produção, sendo necessária a utilização de fornos de alta potência, que se caracterizam por alcançar elevadas temperaturas (PASSOS, 2007).

Com o intuito de obter as temperaturas requeridas nos tratamentos térmicos das amostras, foi construído o forno Zeternit I (Figura 1). Ele é constituído de duas telhas de fibrocimento sobrepostas e preenchido interiormente com concreto. No centro dessa estrutura foi colocado um tubo de cerâmica sobre o qual foi enrolado um fio próprio para resistência elétrica, coberto de anéis de alumina. Para o isolamento térmico foi utilizada lã de vidro. Ele é alimentado com tensão alternada de 127 V e possui potência nominal de aproximadamente 1,4 kW, tendo sua operação limitada a 1100 °C, acima da qual os componentes internos do forno podem ser danificados.

Figura 1 – Forno Zeternit I



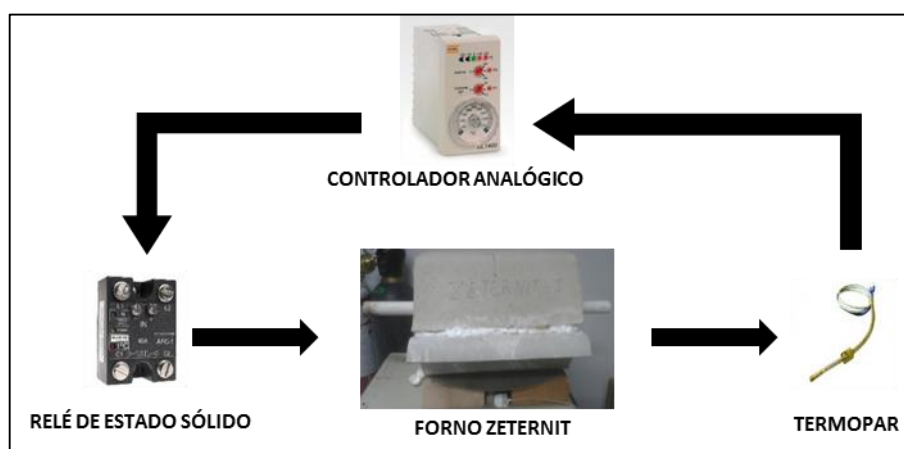
Fonte: Produção do próprio autor.

A pressão de gás durante a dopagem de oxigênio e a temperatura durante o tratamento térmico são variáveis que necessitam estar continuamente nos valores pré-determinados, pois quaisquer desvios das mesmas podem comprometer as características do supercondutor. Sendo assim, faz-se necessária a utilização de sistemas de controle para estas variáveis.

Segundo Campos & Teixeira (2006), esses sistemas, quando bem dimensionados, proporcionam vários ganhos aos processos aos quais são incorporados: “aumento do nível de qualidade dos produtos, minimização da necessidade de reprocessamento e liberação do operador de uma série de atividades manuais e repetitivas”.

Nos cilindros de oxigênio utilizados no laboratório estão instaladas válvulas reguladoras de pressão que mantêm essa variável dentro dos limites desejados. A maior preocupação, portanto, está no controle da temperatura do forno, tendo sido, para isto, adquirido um controlador analógico de temperatura, modelo UL1400 do fabricante COEL, que junto a um medidor de temperatura termopar tipo K e um relé de estado sólido, constituíram o primeiro sistema de automação do forno Zeternit I (Figura 2). Infelizmente esse sistema não proporcionou resultados satisfatórios na produção, ocasionando retrabalho, desperdício de material e atraso nas pesquisas.

Figura 2 – Primeiro sistema de automação do forno Zeternit I



Fonte: Produção do próprio autor.

Outro aspecto relevante é a distância de cerca de um quilômetro entre o forno e o PRESLAB. O primeiro está instalado no SUPERA, localizado em frente ao prédio CT-2, no Centro Tecnológico (CT) da UFES, enquanto que o segundo está no Centro de Ciências Exatas (CCE), próximo à biblioteca central da universidade. Por existir um sistema de automação analógico do forno, os alunos do PRESLAB percorrem essa distância várias vezes para acompanhar os resultados de testes, efetuando medições manuais com multímetros e termopares auxiliares, pois não há qualquer indicador de temperatura fixo no sistema. A produção também é

demorada, ocasionando perda de tempo dos pesquisadores, que poderiam estar realizando outras atividades de maior importância.

Alguns trabalhos já foram realizados visando a modernização da automação do forno. Silva (2014) implementou um sistema de aquisição de dados para modelagem do forno Zeternit I. Os resultados alcançados não permitiram a obtenção de um bom modelo, pois segundo o pesquisador, utilizaram-se intervalos muito grandes de potência elétrica nos testes de identificação. Apesar disso, esse trabalho possui resultados que serão utilizados para um direcionamento inicial deste.

Com o crescimento da produção das cerâmicas para utilização no SUPERA, torna-se necessário aumentar a produtividade, melhorar a qualidade e evitar reprocessamento de material. Sendo assim, é imprescindível um sistema de automação que proporcione um controle mais preciso da temperatura do forno. Além disso, é essencial um sistema de monitoramento remoto do mesmo, permitindo aos usuários interagir com o processo de produção através de um computador ou outro dispositivo, possibilitando o avanço das pesquisas do grupo.

2 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.1 Objetivo geral

Modernizar o sistema de automação do forno Zeternit I para controle preciso da temperatura, monitoramento e atuação remota do forno.

2.2 Objetivos específicos

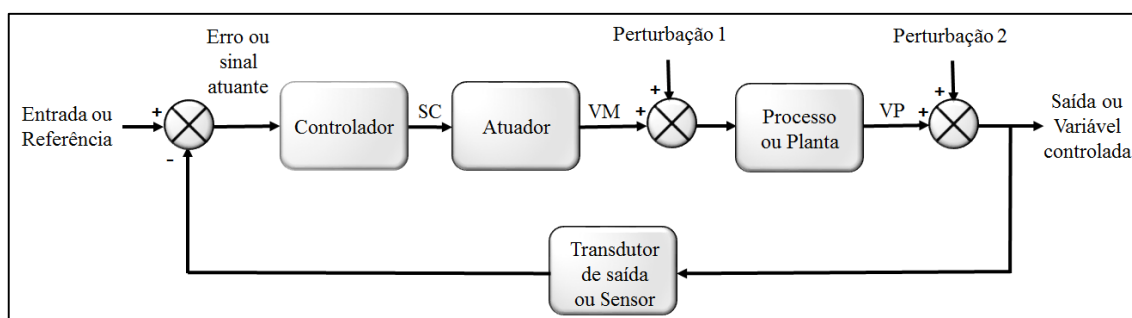
- Desenvolver um sistema de medição de temperatura para o forno Zeternit I;
- Desenvolver um sistema de acionamento elétrico utilizando a modulação PWM;
- Desenvolver um sistema supervisor para o forno Zeternit I;
- Identificar um modelo dinâmico para o forno;
- Projetar um controlador que faça o sistema atender aos critérios necessários para produção da cerâmica;
- Propor um mecanismo de acesso remoto ao sistema de automação a ser desenvolvido.

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

Segundo Dorf & Bishop (2011), um sistema de controle representa uma interconexão de componentes para formar uma configuração que produzirá uma resposta desejada. Todos os elementos da malha de controle são fundamentais para se alcançar a resposta esperada do sistema, necessitando de um correto dimensionamento e funcionamento. Dessa forma, projetar um sistema de controle consiste em especificar componentes que atendam uma determinada aplicação.

No controle em malha aberta, o dispositivo de atuação é utilizado para controlar diretamente o processo, sem retroação e compensação automática (DORF & BISHOP, 2001). Num sistema de controle em malha fechada (Figura 3), um sinal de erro definido como a diferença entre o sinal de referência e o de realimentação é utilizado pelo controlador para determinar uma ação corretiva visando eliminá-lo (OGATA, 1998).

Figura 3 – Sistema de controle em malha fechada

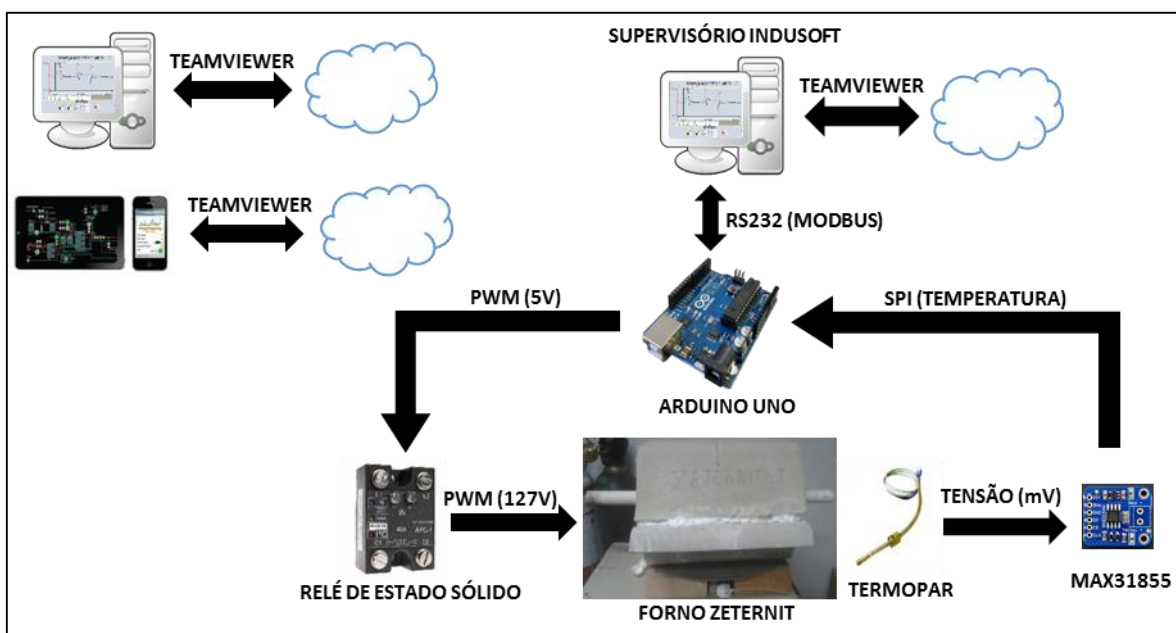


Fonte: DORF & BISHOP (2001) - Traduzido

O processo ou planta é o sistema que contém a variável de processo (VP) que se deseja controlar, podendo ser afetada tanto pela variável manipulada (VM), quanto pelos sinais de perturbação ou distúrbio, que podem atuar em sua entrada ou saída. O transdutor de saída ou sensor é o elemento que mede a variável física e a transforma num sinal elétrico, permitindo a sua leitura num sistema eletrônico. O controlador, por sua vez, é o instrumento que compara a variável de processo (VP) com o valor de referência e envia o sinal de controle (SC) para o atuador intervir na planta, se necessário. Por fim, o atuador é o elemento que altera a quantidade de energia a ser fornecida para o processo através da variável manipulada (BEGA, 2011).

A Figura 4 mostra a arquitetura deste projeto para modernizar a automação do forno. Nela é possível visualizar todos os elementos da malha de controle, além de detalhes da comunicação entre os dispositivos. Nas seções a seguir serão discutidos detalhadamente cada um desses elementos e suas características relevantes para este projeto.

Figura 4 – Arquitetura de modernização da automação do forno Zeternit I



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1 O ARDUINO UNO

Arduino Uno (Figura 5) é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328P. Ela possui 14 pinos de entrada e saída, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM, 6 entradas analógicas, um cristal de quartzo de 16 MHz, uma entrada USB, um conector *jack* para alimentação, um ICSP *header* e um botão de *reset*. Possui 32 KB de memória *flash*, 2 KB de SRAM e 1 KB de EEPROM. Pode ser alimentado via USB ou por uma fonte externa, através do conector *jack* (ARDUINO, 2017).

Figura 5 – Arduino Uno



Fonte: ARDUINO (2017).

Sua concepção é proporcionar facilidade ao usuário tanto de programação, como de conexão com o computador ou outros dispositivos. Para isso, o ATmega328P já vem pré-programado com um *bootloader*, que permite a gravação de um novo código sem necessidade de um programador externo. Além disso, o ATmega328P possui suporte para comunicação serial através de uma UART TTL (5V), I2C e SPI, existindo bibliotecas disponíveis que facilitam a configuração e utilização dessas interfaces de comunicação (ARDUINO, 2017).

Nesse projeto, o Arduino é responsável por executar tarefas para todos os componentes que precisam de algum processamento. Ele se comunica via SPI com o MAX31855K para obter o valor da temperatura do forno. Possui a rotina de acionamento elétrico que controla o sinal PWM e comanda o relé de estado sólido. Além disso, executa o algoritmo PID utilizando as variáveis que vêm do supervisor, sendo estas obtidas através de uma comunicação mestre/escravo utilizando protocolo Modbus sob meio físico RS232.

3.2 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Os termopares são os sensores de temperatura mais empregados na indústria. Sua confiabilidade e baixo custo, aliados à precisão, estabilidade e repetibilidade satisfatórios justificam a larga utilização desse tipo de sensor. Seu funcionamento é baseado no efeito Seebeck, que ocorre quando em um circuito formado por dois fios condutores fabricados com materiais diferentes, surge uma diferença de potencial muito pequena caso as duas junções sejam mantidas a

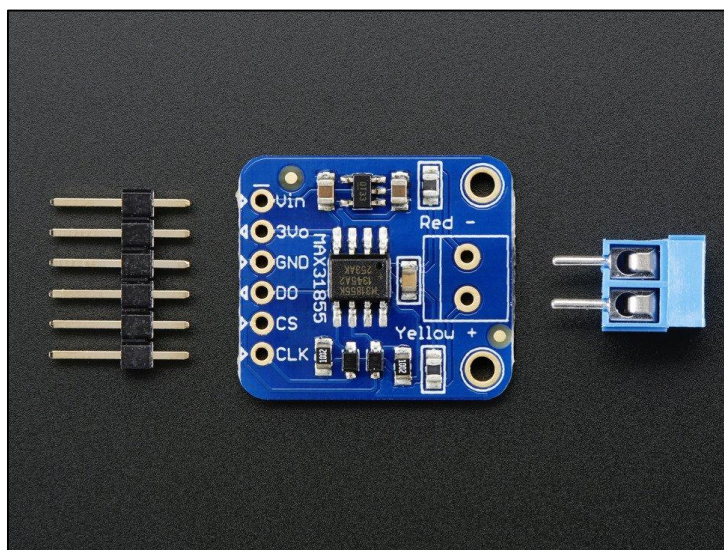
temperaturas diferentes, sendo essa tensão proporcional à diferença de temperatura das junções. Se uma das junções for mantida à temperatura constante (junta de referência ou junta fria) pode-se conhecer a temperatura da outra junção (junta quente) medindo-se a diferença de potencial (COHN, 2011).

Existem termopares de diversos tipos, sendo eles identificados por código alfabético. O que caracteriza cada tipo é o material de que são constituídos e conseqüentemente, para qual tipo de aplicação são mais indicados. O termopar tipo J, por exemplo, é constituído de Ferro e Constantan (liga de Cobre e Níquel), possuindo faixa de trabalho de 0 a 750 °C e resolução de 7,42 mV/100 °C. O termopar tipo K, por sua vez, é feito de Cromel (liga de 90% de Cromo e 10% Níquel) e Alumel (liga de Níquel, Manganês, e outros metais), possuindo faixa de trabalho de 0 a 1200 °C com resolução de 4,05 mV/100 °C (COHN, 2011). Como a faixa de trabalho do Zeternit I é entre 800 °C e 1100 °C, definiu-se a utilização do termopar tipo K.

Os sinais elétricos provenientes dos termopares são muito pequenos e sensíveis, necessitando de um bom circuito de amplificação e rejeição de ruído para o seu tratamento. Além disso, caso a temperatura da junta de referência seja alterada, é desejável que esse circuito seja capaz de perceber essa variação e realizar a compensação de junta fria. Existem diversas soluções de circuitos analógicos para serem aplicados nesse tipo de tratamento, porém, por utilizar amplificadores de alta precisão esses circuitos são caros, além de complexos de serem implementados.

Para facilitar o tratamento de sinais de termopares tipo K, especificamente, a empresa Adafruit criou o amplificador MAX31855K (Figura 6). Esse circuito integrado é alimentado com tensão de 3.3 V a 5 V, possui dois pinos para conexão do termopar e três pinos para enviar o valor da temperatura através do protocolo de comunicação serial SPI, sendo perfeito para aplicações com microcontroladores. Além disso, ele realiza a compensação de junta fria internamente e o fabricante disponibiliza uma biblioteca de funções prontas para utilizar esse dispositivo com o Arduino, facilitando a implementação de qualquer projeto.

Figura 6 – Amplificador MAX31855K



FONTE: ADAFRUIT (2017)

3.3 CIRCUITO DE ACIONAMENTO ELÉTRICO

Um forno resistivo é um equipamento que converte energia elétrica em energia térmica e que precisa de um circuito de acionamento elétrico, caso seja necessário controlar a quantidade de energia disponibilizada para o mesmo. De fato, esse é o objetivo deste projeto, controlar a temperatura (energia térmica) necessária para a produção de uma cerâmica supercondutora.

Para projetar esse circuito foi necessário saber que o forno Zeternit I é uma carga elétrica que possui impedância de aproximadamente 11 ohm, tensão de alimentação de 127 V e potência nominal de aproximadamente 1,4 kW, sendo essa última calculada pela Equação 1.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

A partir da Equação 1 vê-se que, para manipular a potência é necessário alterar a tensão aplicada ou a sua resistência interna. É possível utilizar um reostato em série com o forno, de maneira que ao aumentar a resistência do reostato, mantendo a mesma tensão aplicada, diminui-se a corrente do circuito e, conseqüentemente, diminui-se a potência elétrica entregue a ele. Apesar de simples, esse sistema é pouco eficiente por apresentar perdas no reostato e necessitar de operação manual, impossibilitando a sua utilização em um sistema automático.

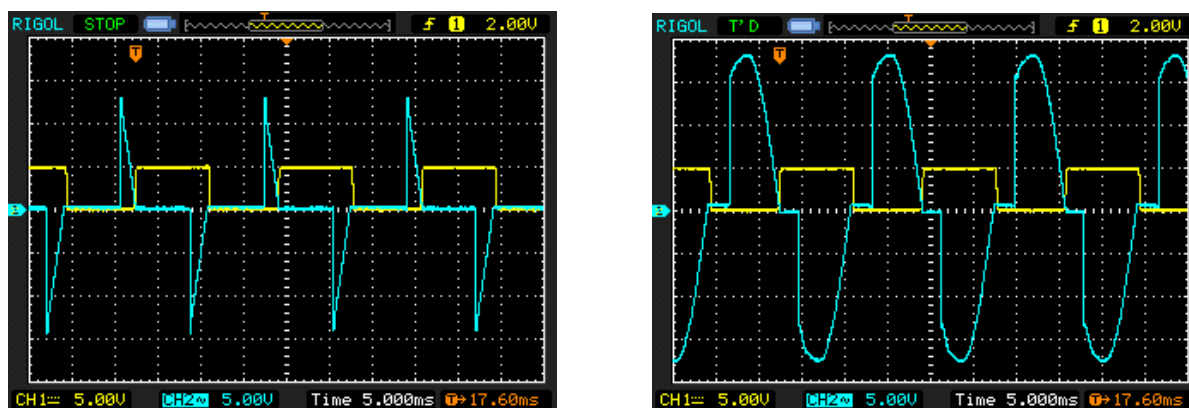
Outra possibilidade é a utilização de circuitos que controlam a tensão eficaz (ou *root mean square – rms*) por meio de chaves semicondutoras que permitem a passagem de corrente entre o instante de seu disparo e o momento que a onda de tensão passa por zero volts. A Equação 2 apresenta o cálculo do valor *rms* de um sinal senoidal com período T.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} (V_p \sin(\omega t))^2 dt} \quad (2)$$

Considerando que o valor de pico (V_p) e a frequência (ω) do sinal sejam constantes, pode-se alterar os limites de integração de maneira que se obtenha a tensão *rms* desejada. Nota-se que esse cálculo é complexo, tendo implementação custosa em um sistema embarcado. O que se faz nesse tipo de circuito de acionamento é determinar uma tabela de correlação entre os instantes de disparo e os valores eficazes correspondentes, de maneira que o sistema embarcado faça apenas uma busca e encontre o tempo, sem necessidade de efetuar cálculos complexos.

Além do tempo de disparo, esse sistema precisa utilizar a referência de tempo de um sinal proveniente de um circuito de detecção de zero volts para acionar a chave eletrônica. A Figura 7, obtida em um ensaio de laboratório, mostra as formas de onda de tensão (azul) e referência de zero (amarelo) para esse tipo de acionamento, quando solicitada uma potência de 20% e 75% da nominal, respectivamente.

Figura 7 – Formas de onda de tensão e referência de zero para potência de 20% (à esquerda) e 75% (à direita)



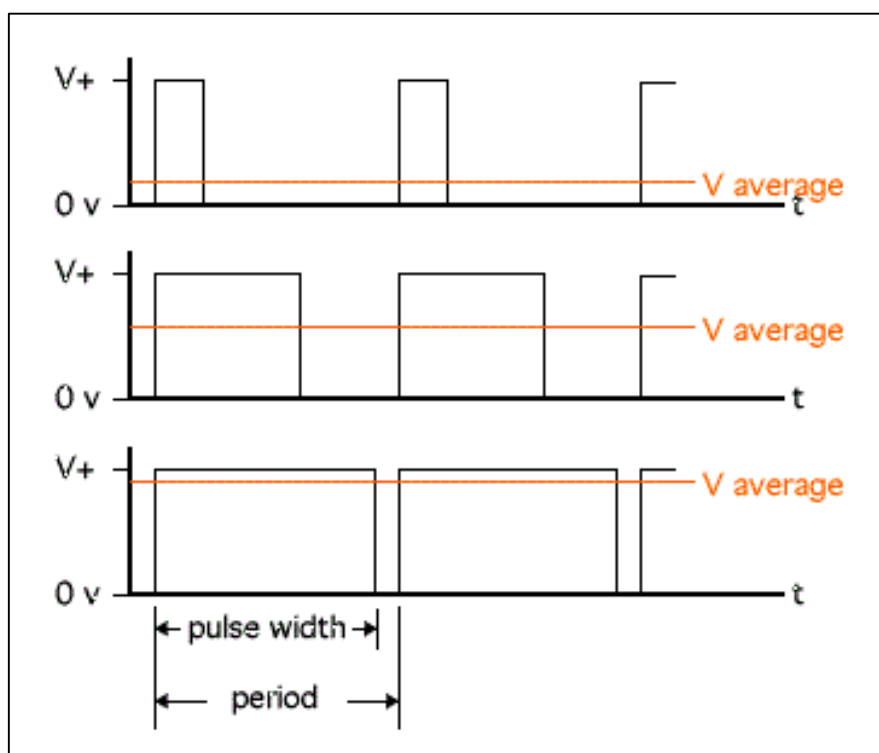
Fonte: Produção do próprio autor.

Esse tipo de acionamento requer um circuito de controle de disparo e detecção de zero muito rápido e preciso, pois qualquer atraso ou antecipação do disparo altera de maneira significativa

a potência instantânea. Existem circuitos de detecção de zero com baixa complexidade de implementação, porém com pouquíssima precisão, apresentando diferença de tempo na detecção de zero quando a tensão está crescente e decrescente.

Uma terceira alternativa de acionamento é a modulação por largura de pulso (ou *Pulse Width Modulation* – PWM). Nesse caso, utiliza-se uma chave eletrônica para variar a potência média entregue em um período de tempo definido. Ressalta-se que não há preocupação com o instante em que o sistema será ligado, pois o controle de potência é feito através da relação entre o tempo ligado e desligado. A Figura 8 apresenta um sinal do tipo PWM.

Figura 8 – Sinal do tipo PWM



Fonte: Eletronics (2017).

Observa-se que nesse tipo de acionamento é preciso determinar um período do sinal compatível com o sistema em que será aplicado. Em aplicações rápidas, como é o caso de controle de equipamentos eletrônicos, o período deve ser pequeno. Já em aplicações lentas, como é o caso dos sistemas térmicos, o período pode ser maior, exigindo menor velocidade de resposta do circuito de controle da chave eletrônica.

Considerando a complexidade da implementação e a precisão da resposta obtida, escolheu-se utilizar a modulação PWM. Como chave eletrônica, utilizou-se o relé de estado sólido TSZC-25A (Figura 9), sendo aproveitado do primeiro sistema de automação. Esse relé tem tensão de acionamento entre 4 Vcc e 32 Vcc, com corrente de acionamento máxima de 12 mA, podendo ser ligado diretamente ao Arduino. Na saída, pode-se acionar uma carga com tensão entre 50 Vca e 280 Vca e corrente eficaz máxima de 25 A, o que é suficiente para o forno.

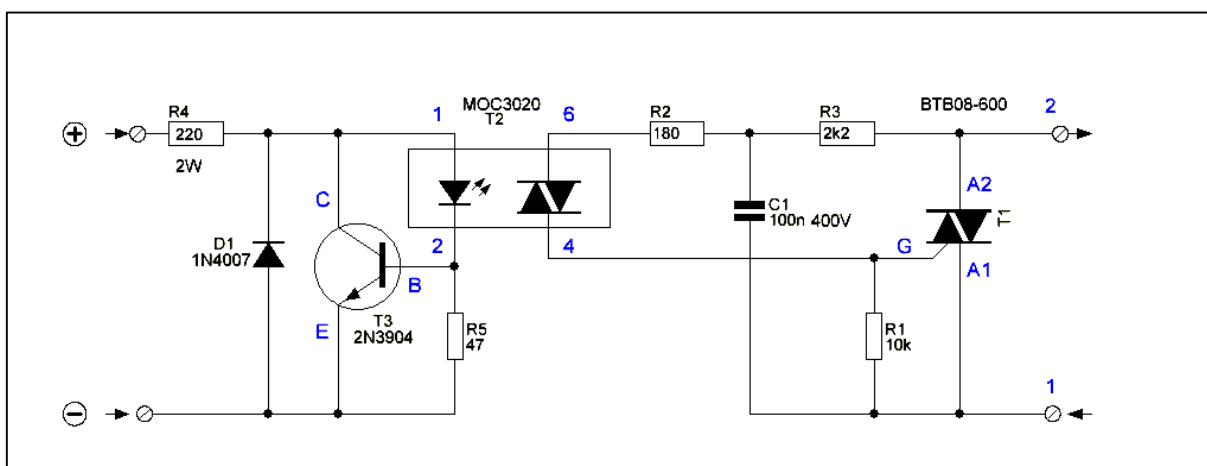
Figura 9 – Relé de estado sólido TSZC-25A



Fonte: Metaltex (2017).

Um relé de estado sólido tem a mesma função de um relé eletromecânico: comutar circuitos de potência elevada a partir de sinais de pequena intensidade. Porém, possui muitas vantagens, como ausência de partes móveis o que evita o desgaste de componentes internos, não apresenta ruído sonoro, possui maior velocidade de comutação, dentre outras (BRAGA, 2014). Seu funcionamento consiste em acionar um opto-acoplador na entrada que dispara o circuito de saída, ligando a carga. Esses relés possuem circuitos internos de proteção contra tensão reversa na entrada e circuito *snubber* para amortecer transientes de alta tensão na saída, por exemplo. A Figura 10 apresenta o circuito interno de um relé de estado sólido.

Figura 10 – Circuito interno de um relé de estado sólido



Fonte: SOLO ELECTRÓNICA (2017)

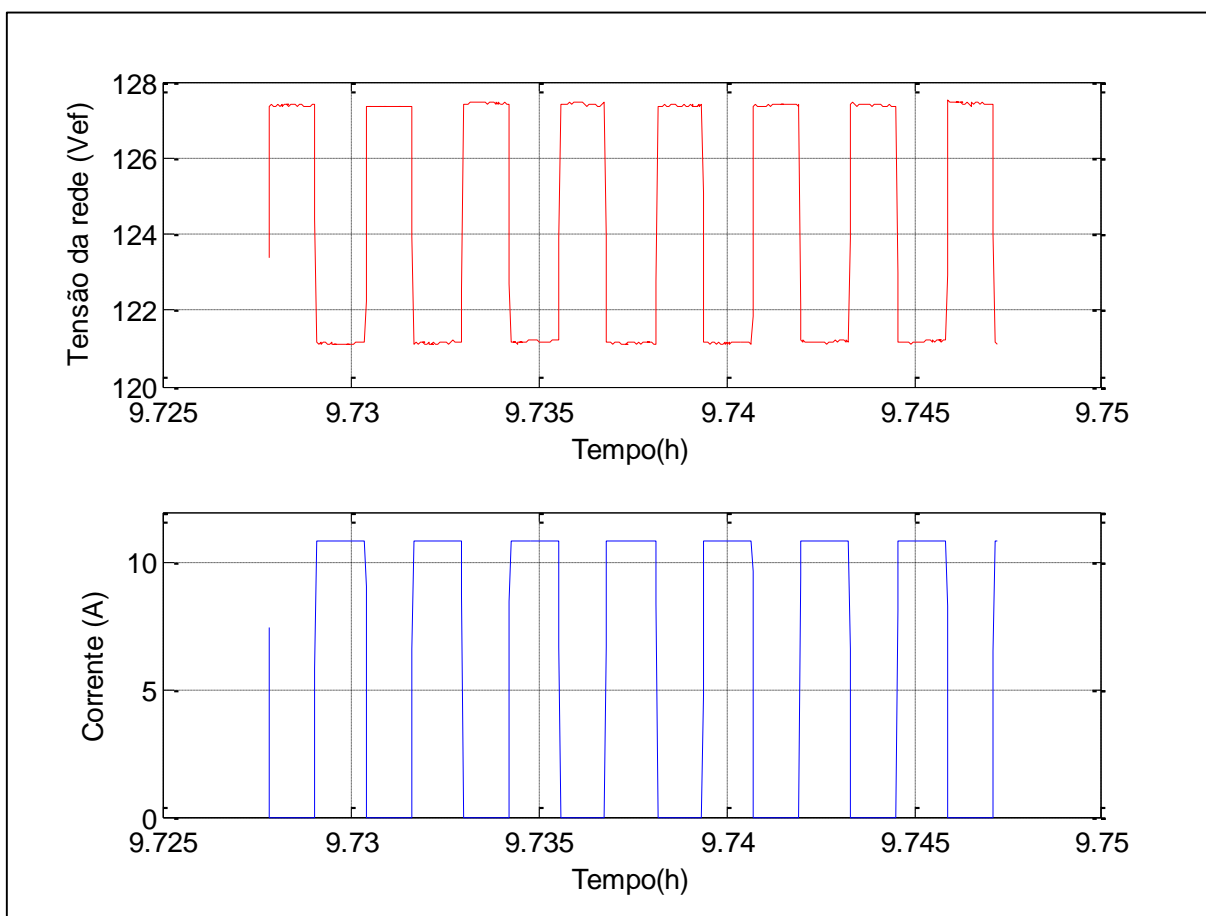
Com os componentes do circuito definidos, restou determinar o período do sinal PWM a ser utilizado no acionamento do forno. Utilizando os resultados experimentais obtidos por Silva (2014) na etapa de modelagem do forno, verificou-se que o tempo de resposta do sistema é muito alto e assim determinou-se um período de nove segundos para o sinal PWM. Depois disso, implementou-se a rotina de acionamento no Arduino, que consiste em ler uma variável contendo o valor percentual da potência desejada e alterar o estado de um pino baseado nos tempos calculados. A Equação 3 apresenta o cálculo do tempo que o sistema ficará ligado a cada período (t_{on}), em milissegundos.

$$t_{on} = P(\%) * 90 \text{ [ms]} \quad (3)$$

Sendo assim, para uma potência de 100%, o ciclo de trabalho será de 100% e t_{on} será de 9000 ms. Para uma potência de 50%, o ciclo de trabalho 50% e t_{on} será de 4500 ms. Após a implementação do algoritmo no Arduino, foram realizados alguns testes iniciais nos quais se pode verificar o funcionamento correto do circuito de acionamento. A Figura 11 apresenta a tensão da rede e a corrente do forno durante alguns ciclos do sinal PWM com potência requerida de 52%.

Observa-se na Figura 11 que quando o forno é energizado ocorre um afundamento de tensão de aproximadamente 6V, mostrando que a rede elétrica da UFES não é um barramento infinito. Além disso, percebe-se que o tempo que o sistema fica ligado e desligado são parecidos, o que é compatível com uma potência de 52%.

Figura 11 – Tensão da rede e corrente do forno para uma potência de 52%



Fonte: Produção do próprio autor.

3.4 O SISTEMA SUPERVISÓRIO COM ACESSO REMOTO

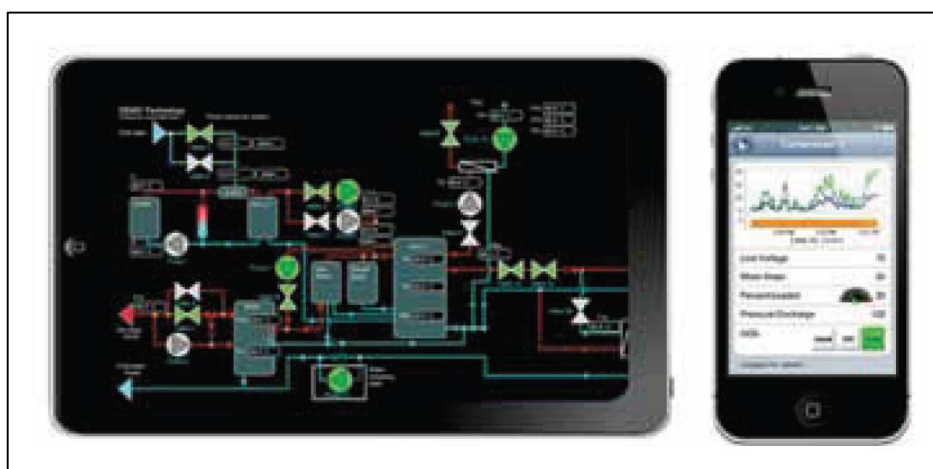
Segundo Paiola et al (2012), “os sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) ou, simplesmente, sistemas supervisórios, nasceram com o intuito de permitir visualização e operação de processos através de uma interface homem máquina”. Eles começaram a ser utilizados no final do século 20, quando a realidade era de capacidade computacional limitada e pouco acessível, o que dificultou o uso massivo da recente tecnologia. Com o passar do tempo os computadores se tornaram mais potentes e baratos, devido à produção em série de seu *hardware*. Esse avanço, aliado às demandas da indústria, fez com que a tecnologia SCADA passasse continuamente por melhorias e modificações em sua estrutura (PAIOLA, 2011).

De maneira simplificada, pode-se dizer que o supervisório é composto por telas, base de dados e *drivers* de comunicação. As telas são animadas com as informações proveniente da base de

dados. Essa, por sua vez, é preenchida com os dados coletados dos elementos de campo (CLPs ou outros dispositivos) através de *drivers* específicos. Esses *drivers* permitem comunicação através de diversos protocolos existentes no meio industrial (PAIOLA, 2011).

Os sistemas SCADA evoluíram ainda mais e já proporcionam grande flexibilidade, oferecendo recursos como redundância para controle mais robusto e eficiente do sistema, arquitetura cliente/servidor e acesso remoto através de dispositivos que nem sequer precisam da instalação do supervisão, como *tablets* ou *smartphones* (Figura 12). Inicialmente, houve resistência quanto à utilização de arquiteturas mais abertas, porém a evolução das redes de comunicação e o aumento da sua confiabilidade tornaram os sistemas de acesso remoto uma realidade no meio industrial, devido às suas vantagens e benefícios. A capacidade de configuração, manutenção e controle de projetos remotamente simplificou e reduziu o trabalho dos operadores das plantas, além de trazer maior dinamicidade e melhor tempo de resposta para o sistema de supervisão (PAIOLA et al, 2012).

Figura 12 – Acesso a um supervisão através de dispositivos móveis

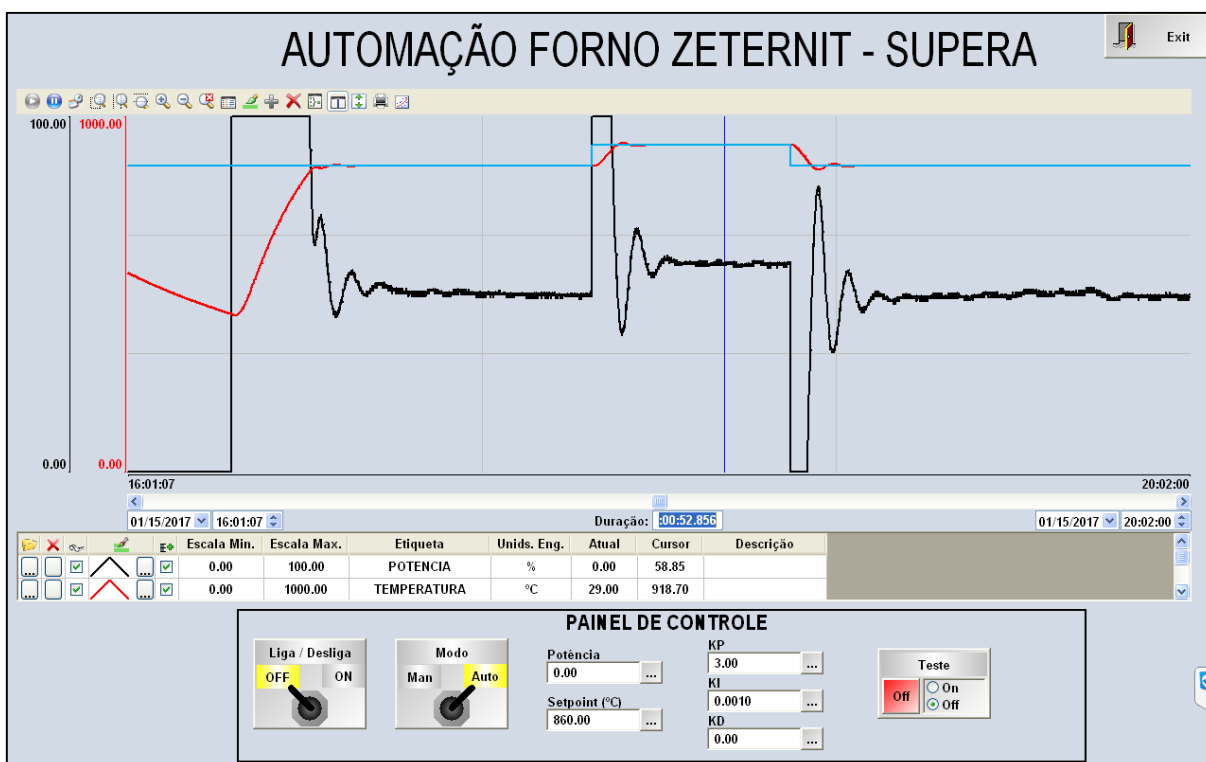


Fonte: Paiola (2011).

Nesse trabalho foi escolhido o supervisão Indusoft Web Studio® que apresenta uma interface de desenvolvimento muito didática, facilitando a implementação das telas e das funções desejadas. Esse *software* é utilizado com uma licença educacional fruto de uma parceria da UFES com o fabricante. Essa versão possui limitação na quantidade de variáveis a serem utilizadas no projeto, tem validade anual e não produz o arquivo *runtime* (modo de execução), sendo necessária a execução do mesmo no próprio arquivo de desenvolvimento.

A comunicação com o Arduino é feita utilizando o protocolo Modbus, sob o meio físico RS232. A conexão entre eles é feita pela porta do computador via entrada USB. No Arduino é utilizada uma biblioteca que implementa o protocolo Modbus, recebendo e transmitindo um pacote de variáveis inteiras sempre que solicitado. No supervisório foi configurado o *driver* de comunicação para o protocolo Modbus que envia e recebe informações para o Arduino a cada segundo. A comunicação é mestre-escravo, sendo o supervisório o mestre e o Arduino escravo.

Figura 13 – Tela do sistema supervisório



Fonte: Produção do próprio autor.

No supervisório implementado (Figura 13) o usuário pode acompanhar o comportamento da temperatura do forno e da potência elétrica que está sendo aplicada através do gráfico de tendência histórica, onde existe uma legenda para identificação dos sinais mostrados. Além de fornecer a informação em tempo real, os dados são registrados e podem ser consultados quando o usuário desejar. Ademais, o usuário pode interagir com o processo através do painel de controle, onde pode ligar e desligar o forno, deixar o controlador em modo automático ou manual, alterar o valor de referência de temperatura e visualizar os ganhos do controlador PID que estão sendo utilizados.

O Indusoft Web Studio® suporta acesso remoto aos supervisórios desenvolvidos, porém esse recurso não está disponível para a versão educacional. Dessa forma foi necessário utilizar outra maneira para viabilizar o acesso remoto ao forno. Atualmente existem diversas ferramentas computacionais para permitir acesso remoto a computadores. A Microsoft, por exemplo, possui um acessório de conexão remota à área de trabalho. Basta configurar essa opção no computador que será acessado e usufruir dessa função. Outra opção é utilizar *softwares* dedicados a conexão remota, como é o caso do TeamViewer, que inclusive possui versão para fins não comerciais. Como no projeto de automação do Zeternit haverá um computador fixo com sistema operacional Windows para executar o supervisório, qualquer uma dessas soluções pode ser utilizada. Nos dois casos o usuário pode instalar um aplicativo no *smartphone* ou *tablet* e conectar-se ao computador e ao supervisório.

3.5 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DO FORNO

O conhecimento das características do sistema a ser controlado bem como sua dinâmica são necessários para o desenvolvimento de um projeto de controle. Nesse sentido, é preciso descrever o sistema matematicamente, isto é, obter um modelo que represente o seu comportamento dinâmico. Uma opção é a de modelagem fenomenológica, que utiliza as equações físicas e correlações para descrever o sistema (SEBORG et al., 2004). Em geral, esse tipo de modelo é difícil de ser obtido e necessita de muito tempo para ser desenvolvido.

Outra opção é a identificação de sistemas. Aqui, o objetivo é construir um modelo matemático a partir de dados experimentais obtidos da planta, utilizando ajustes estatísticos para obtenção de seus parâmetros (LJUNG, 1999). Nesse caso não é preciso conhecer o que existe dentro do sistema, pois o interesse está na relação entre a entrada e a saída. Esse é um método mais prático e rápido, facilitando a modelagem de sistemas complexos. Por outro lado, possui a desvantagem de ter validade local, isto é, o modelo apresenta bom desempenho em torno do ponto de operação (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006). Resumidamente, a identificação de sistemas segue as seguintes etapas:

1. Planejamento e execução experimental;
2. Seleção da estrutura do modelo (linear ou não);
3. Estimação dos parâmetros do modelo;

4. Validação.

A execução experimental geralmente ocorre utilizando um teste padrão. Um teste de identificação largamente utilizado é o de resposta ao degrau. Nesse, aplica-se um sinal tipo degrau na entrada do processo, observa-se a saída e a partir da curva de resposta são obtidos os parâmetros do modelo (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006).

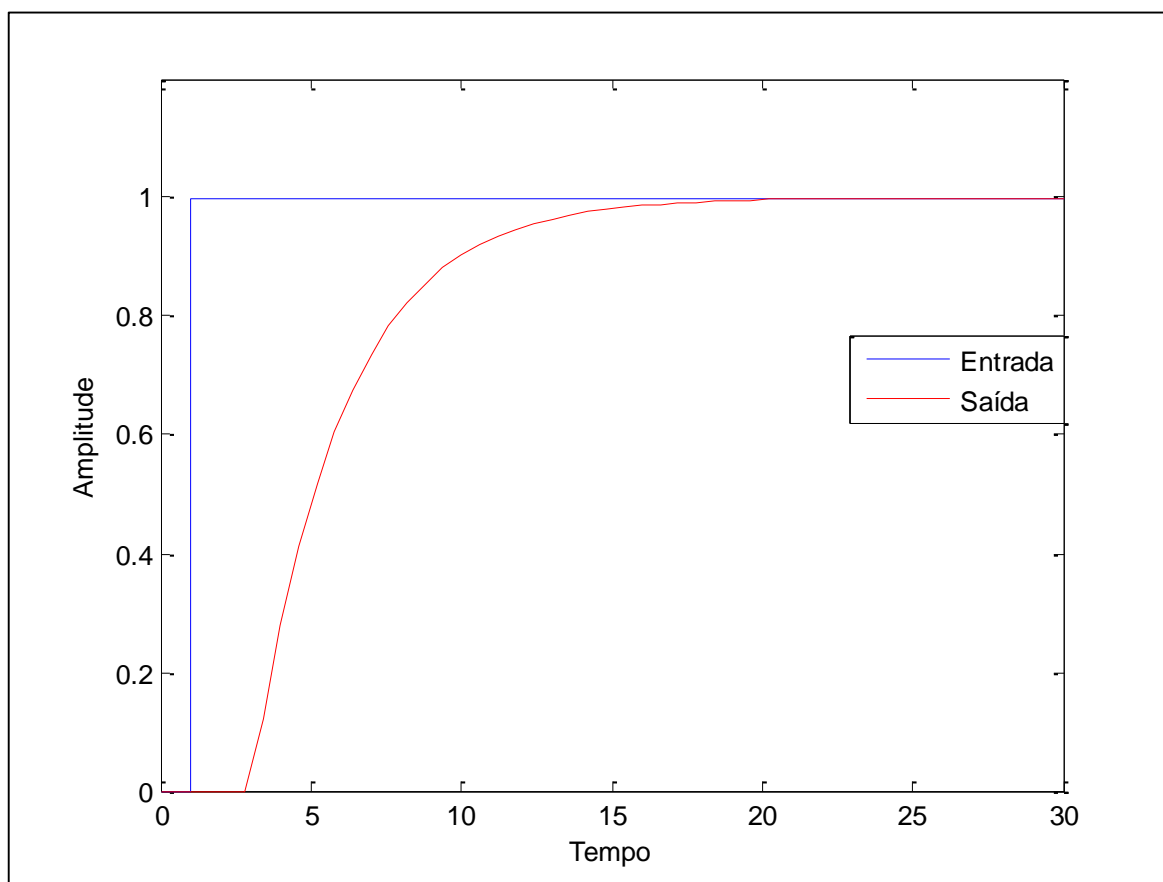
De posse dos dados experimentais, prossegue-se para a seleção da estrutura do modelo, sendo que a visualização desses dados ajuda a indicar qual configuração escolher. Existem diversas estruturas de modelos de sistemas dinâmicos, podendo eles ser de ordem um ou mais, com ou sem tempo morto, entre outros. Na prática, o que se busca é o modelo mais simples que represente bem o comportamento do sistema obedecendo ao princípio da parcimônia (LJUNG, 1999). Um dos mais utilizados para representar a dinâmica de processos industriais, além de servir como base para a sintonia de controladores PID é o modelo de primeira ordem com atraso (Equação 4) (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006).

$$F(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

A caracterização desse modelo consiste em obter o ganho do processo (K), o tempo morto (θ), correspondente ao atraso do sistema para começar a responder, e a constante de tempo (τ), sendo ela o tempo que o sistema demora para atingir o valor de 63% da variação final. A Figura 14 mostra a resposta típica de um sistema de primeira ordem com atraso.

Após definida a estrutura é necessário obter os parâmetros do modelo. Existem diversos métodos de estimação para esses valores, podendo ser eles gráficos ou numéricos. Um exemplo de método numérico é o de regressão linear, em que é feito um cálculo de ajuste do modelo para minimizar a diferença entre o valor de saída estimado através do modelo e o valor real (LJUNG, 1999; MONTGOMERY & RUNGER, 2007). Esse método pode se tornar complicado quando o modelo não é simples ou envolve múltiplas entradas e saídas. Como método gráfico pode-se citar o método de Smith (1972), em que são utilizados dois pontos da curva de resposta e uma carta gráfica para determinar os parâmetros de um modelo de segunda ordem.

Figura 14 – Teste de resposta ao degrau de um sistema de 1ª ordem

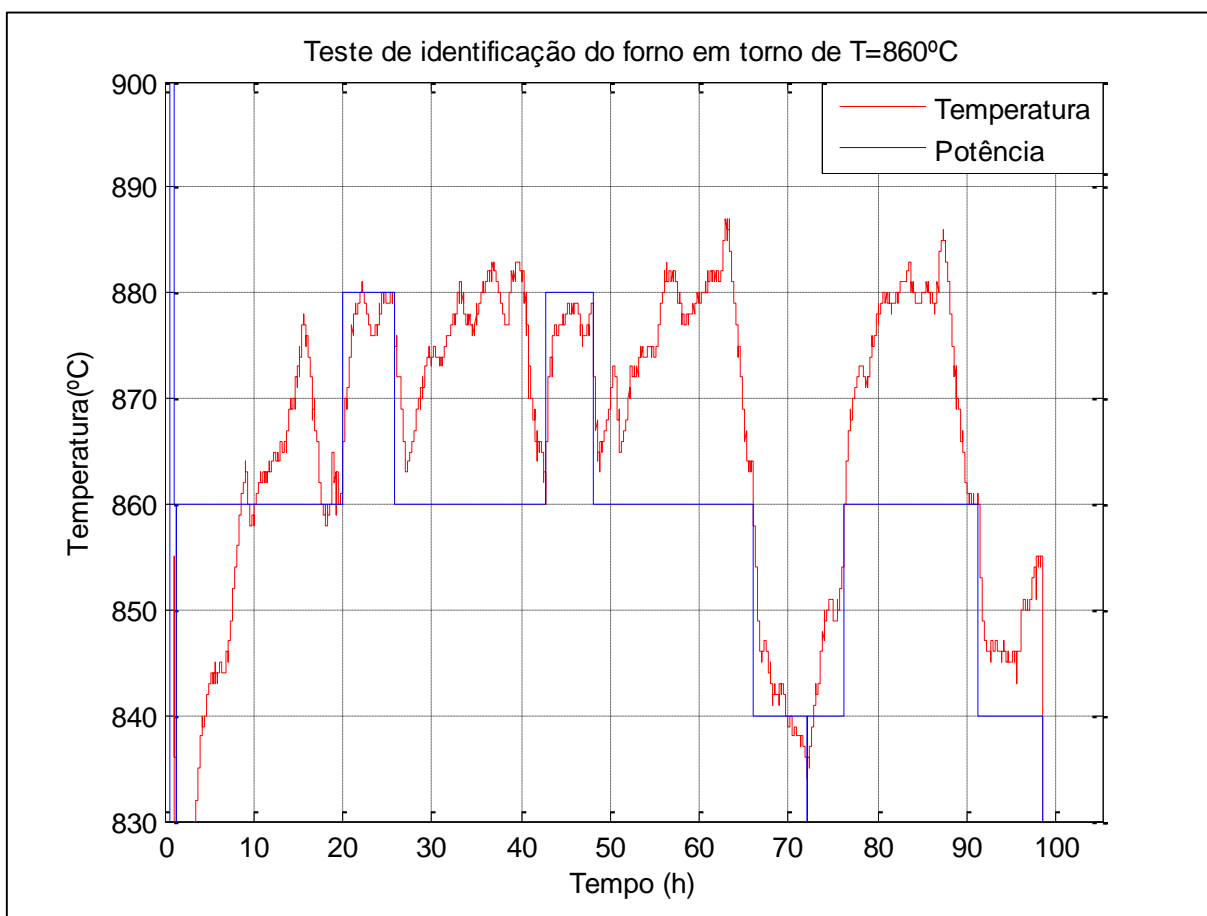


Fonte: Produção do próprio autor.

Com os parâmetros estimados, é preciso analisar a qualidade do modelo encontrado. Para isso é necessário comparar os valores estimados a partir do modelo com os dados experimentais. Vale ressaltar que nessa etapa utilizam-se os dados de validação, sendo estes diferentes dos dados usados na etapa de estimação.

Para a identificação do modelo do forno Zeternit I foi planejado um teste de resposta ao degrau a ser executado em torno do ponto de interesse, que corresponde à temperatura de 860 °C. Para isso, foi necessário, inicialmente, descobrir qual valor de potência elétrica faz o forno atingir e se estabilizar nessa temperatura. Após alguns testes experimentais, verificou-se que o forno atinge a temperatura de 860 °C com aproximadamente 52% da potência elétrica. Sendo assim, após levar o forno a se estabilizar nessa temperatura, foram aplicados sinais do tipo degrau na potência para levantar o comportamento dinâmico da saída (Figura 15).

Figura 15 – Primeiro teste de identificação do forno



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesse teste, foram aplicados duas excitações positivas e duas negativas, de amplitude + 2% e - 2%, fazendo a potência variar de 52% para 54% e 50%, respectivamente. Nota-se que na Figura 15 os valores de potência foram escalonados para permitir melhor visualização, não representando valores reais. No início do teste foi aplicado um sinal de 100% de potência para acelerar a chegada do sistema à temperatura de 860°C, visto que não havia interesse na dinâmica inicial do sistema e sim na dinâmica em torno do ponto de operação. Dessa forma, quando o sistema atingiu 860°C e aparentou estar estável, iniciou-se a aplicação dos sinais tipo degrau.

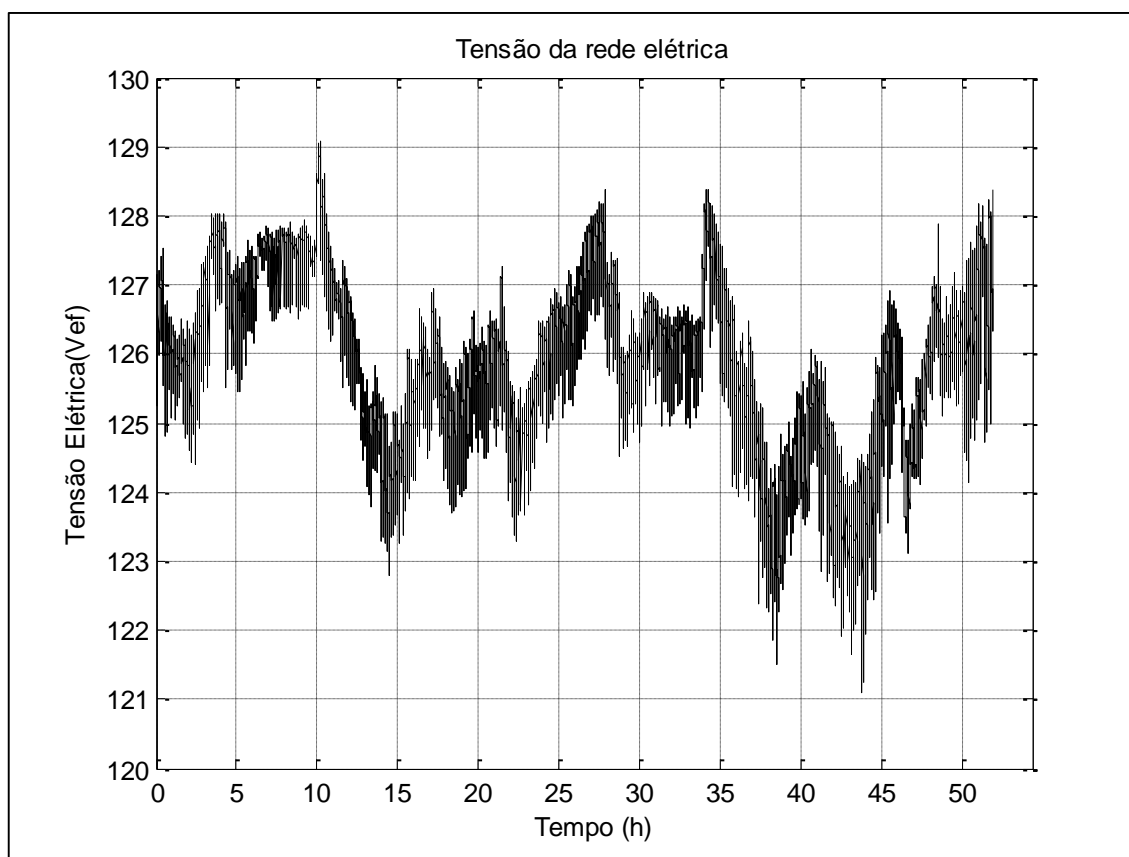
Numa análise inicial do teste, percebe-se que o sistema teve um comportamento atípico. É visualmente perceptível que a resposta apresentada não foi similar a nenhuma esperada, tomando como base os sistemas conhecidos na literatura. Nota-se que antes mesmo da aplicação de qualquer um dos sinais de excitação, momentos estes em que o sistema deveria permanecer estável, ocorreram variações completamente aleatórias na temperatura, indicando que existia alguma outra variável atuando no sistema. Deve-se destacar que essa variável afeta diretamente

o processo de identificação, pois para isso é utilizada a relação entre a entrada que está sendo excitada e a saída do sistema. Se existe outra variável afetando a saída do sistema e que não está sendo levada em consideração no teste de identificação, o modelo obtido será impreciso (LJUNG, 1999).

Sendo assim, foi necessário investigar com rigor o porquê de tal comportamento do forno e quantificar a contribuição dessa variável para o sistema. Uma hipótese inicial de variável que poderia estar interferindo os resultados foi a tensão elétrica da rede. Realizou-se então um teste utilizando um analisador de qualidade de energia, permitindo registrar durante várias horas os valores de tensão, corrente e potência elétrica, além de outras variáveis como taxa de distorção harmônica.

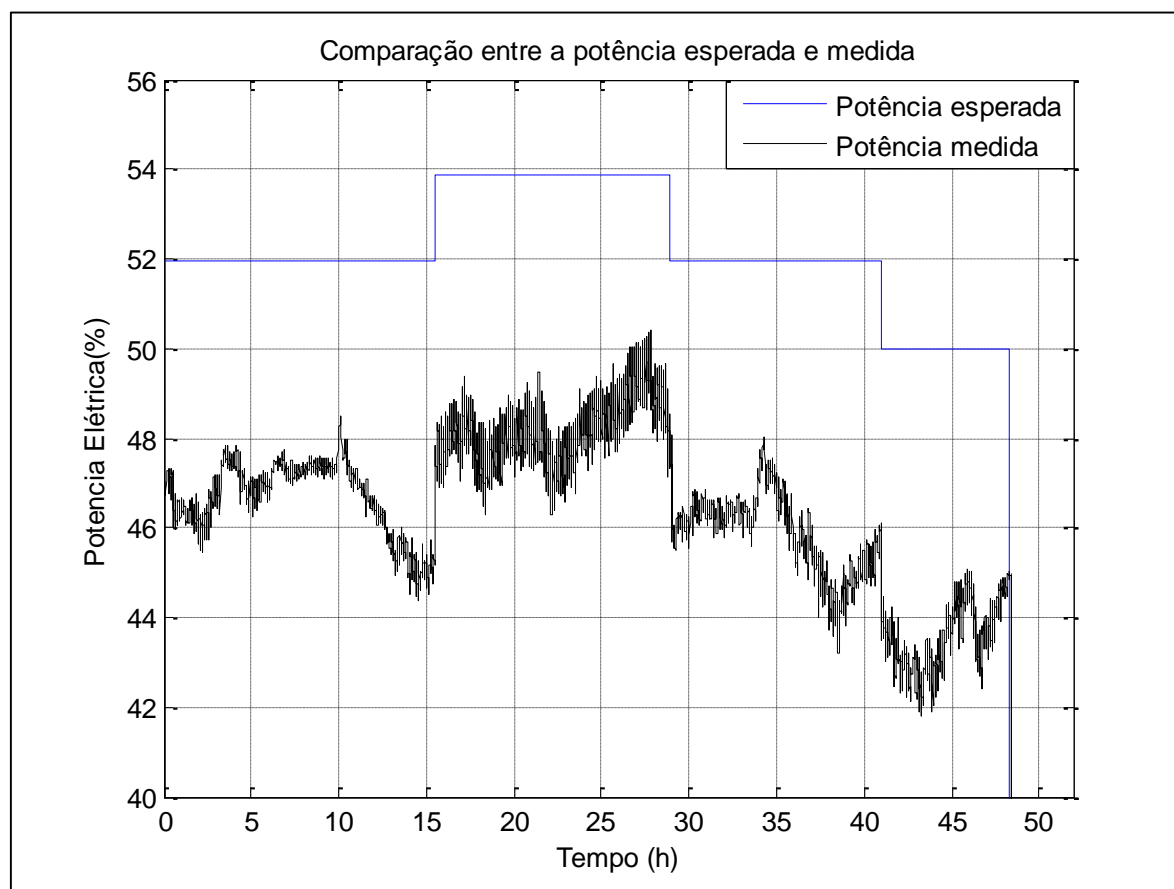
A Figura 16 mostra o comportamento da tensão da rede ao longo do teste. Nela, percebe-se uma variação de até 6 V ao longo do dia, alterando a potência que é disponibilizada ao forno em até 4%. A Figura 17 compara a potência esperada no forno e a potência medida durante o teste.

Figura 16 – Tensão elétrica medida da rede



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 17 – Comparação da potência elétrica esperada e medida



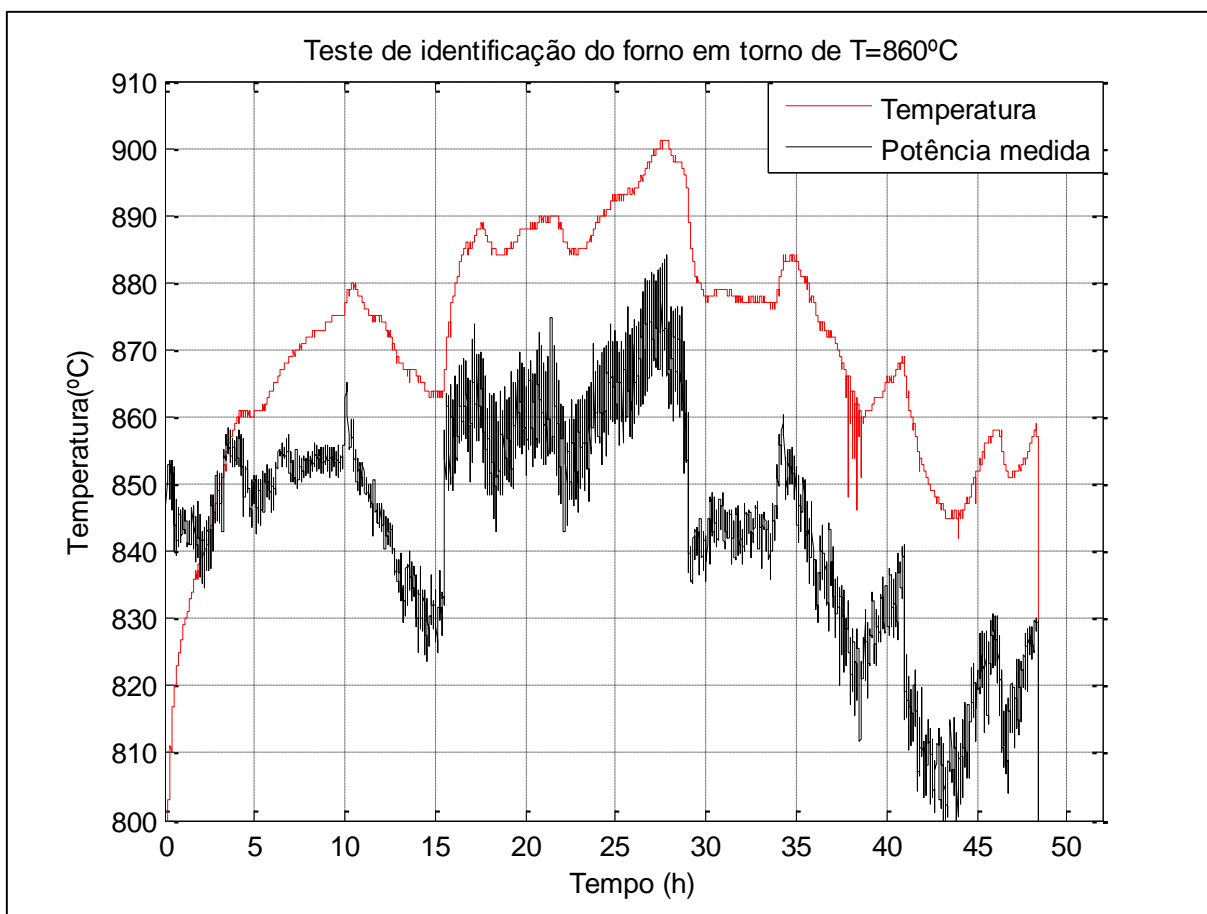
Fonte: Produção do próprio autor.

Junto ao teste da tensão da rede foi realizado o segundo teste de identificação (Figura 18), no qual além da temperatura do forno, foram registradas as informações de tensão da rede, corrente e potência ativa do forno. Na Figura 18 fica muito clara a correlação entre os sinais de potência e temperatura. Dessa forma, esse teste permitiu concluir que a causa do comportamento atípico do forno é a tensão da rede elétrica. Além disso, os dados experimentais obtidos nesse teste permitiram a identificação do modelo, uma vez que pode ser coletada a soma da contribuição da variável manipulada e do distúrbio.

O passo seguinte foi selecionar a estrutura do modelo. É sabido que o forno tem um comportamento não-linear, pois foi verificado experimentalmente que para atingir a temperatura de 860°C foi necessária uma potência de aproximadamente 52% e para uma temperatura de 980°C foi necessária uma potência de aproximadamente 70%. Tal resultado indica a não-linearidade, pois mostra que o forno não atende ao princípio da superposição de sistemas lineares. Porém, como o que se busca é obter um modelo em torno do ponto de

operação de 860°C, pode ser selecionado um modelo linear, pois nesse caso pode ser usada a linearização, permitindo que o modelo tenha bom resultado próximo ao ponto de operação. Para facilitar a identificação do sistema, bem como o projeto do controlador, foi escolhido um modelo de primeira ordem (Equação 4) devido à sua simplicidade, atendendo ao princípio da parcimônia.

Figura 18 – Segundo teste de identificação



Fonte: Produção do próprio autor.

Após isso, foi escolhido o método de estimação dos parâmetros do modelo. Decidiu-se utilizar um método numérico, tomando como ferramenta o *toolbox* Ident do MATLAB, que estima os parâmetros de um modelo baseado no método dos mínimos quadrados. Semelhantemente ao método de regressão linear, esse método visa ajustar a curva do modelo para obter o menor erro quadrático.

Em termos de utilização, o Ident é uma ferramenta muito amigável. Basta informar o tempo de amostragem (nesse caso, um segundo), importar os dados do teste experimental, selecionar os

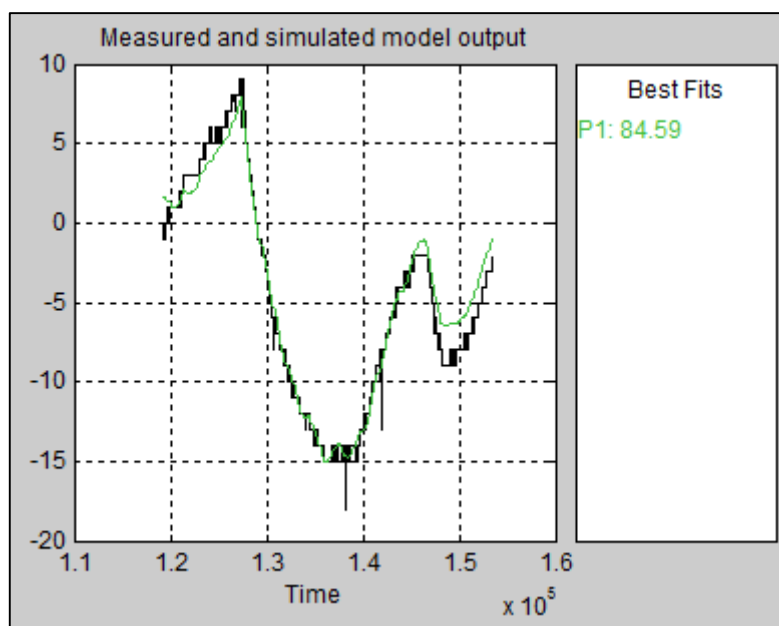
trechos de dados para estimação e validação, escolher a estrutura do modelo e aguardar o *software* realizar os cálculos, retornando os parâmetros do modelo, a curva de resposta e o *fit* calculado para o mesmo.

Foi selecionado estimar o modelo de um sistema de primeira ordem com e sem atraso, sendo que a diferença de qualidade entre eles foi desprezível. Dessa maneira, foi utilizado o modelo de primeira ordem sem atraso (Equação 5) que apresentou *fit* de 84,59%.

$$F(s) = \frac{8.4132}{1995.3s + 1} \quad (5)$$

A Figura 19 compara os dados reais (em preto) com os dados estimados através do modelo (em verde). Ressalta-se que esses dados foram selecionados para validação do modelo, sendo que foi utilizado outro conjunto de dados na etapa de estimação do mesmo.

Figura 19 – Comparação entre os dados reais (preto) e os dados estimados pelo modelo (verde)



Fonte: Produção do próprio autor.

3.6 PROJETO DO CONTROLADOR PID

Existem várias estratégias ou equações de controle e dentre todas elas, o controlador proporcional-integral-derivativo (PID) certamente é o algoritmo de controle mais tradicional na indústria (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006). Uma pesquisa mostrou que em mais de 11.000 malhas de controle analisadas, cerca de 97% utilizavam o PID (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995). A Equação 6 mostra o algoritmo de posição do PID paralelo clássico (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995).

$$u(t) = k_p e(t) + k_p \frac{1}{t_i} \int e(t) dt + k_p t_d \frac{de}{dt}(t) + u_0 \quad (6)$$

O algoritmo determina três ações, sendo uma proporcional ao erro, outra proporcional à integral do erro e outra proporcional à derivada do erro. Cada uma dessas ações contribui de uma forma diferente para a redução do erro e possui suas peculiaridades. A ação derivativa, por exemplo, não é indicada para sistemas onde há presença de ruído, pois é gerado um comportamento prejudicial ao controle (KUO, 1995). Por esse motivo neste projeto foi utilizado um controlador PI, sem ação derivativa. A especificação da intensidade de cada ação é determinada pelos ganhos k_p , t_i e t_d , que também podem aparecer na forma de k_p , k_i e k_d , sendo $k_i = \frac{1}{t_i}$ e $k_d = t_d$.

A facilidade de sintonia é um dos motivos que leva o controlador PID a ser tão utilizado. Outro fator determinante para a larga utilização desse controlador é sua disponibilidade na maioria dos equipamentos industriais, como controladores lógicos programáveis (CLP) ou sistemas digitais de controle distribuídos (SDCD). Na prática, esse algoritmo pode ser implementado em qualquer sistema digital com possibilidade de programação e que tenha interface de entrada e saída para interagir com o processo (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006).

Neste trabalho, o algoritmo PID foi implementado no Arduino. Ele dispõe de uma biblioteca com algoritmos PID já implementados, sendo necessário somente determinar as variáveis manipulada e de processo, *setpoint*, ganhos do controlador, tipo de ação (direta ou reversa) e habilitar a sua execução colocando o controlador em modo automático. Vale ressaltar que o tempo de amostragem do sistema é de um segundo, sendo muito menor que a constante de tempo do forno. Assim, pode-se utilizar a teoria de controle contínuo, pois a influência da amostragem é desprezível.

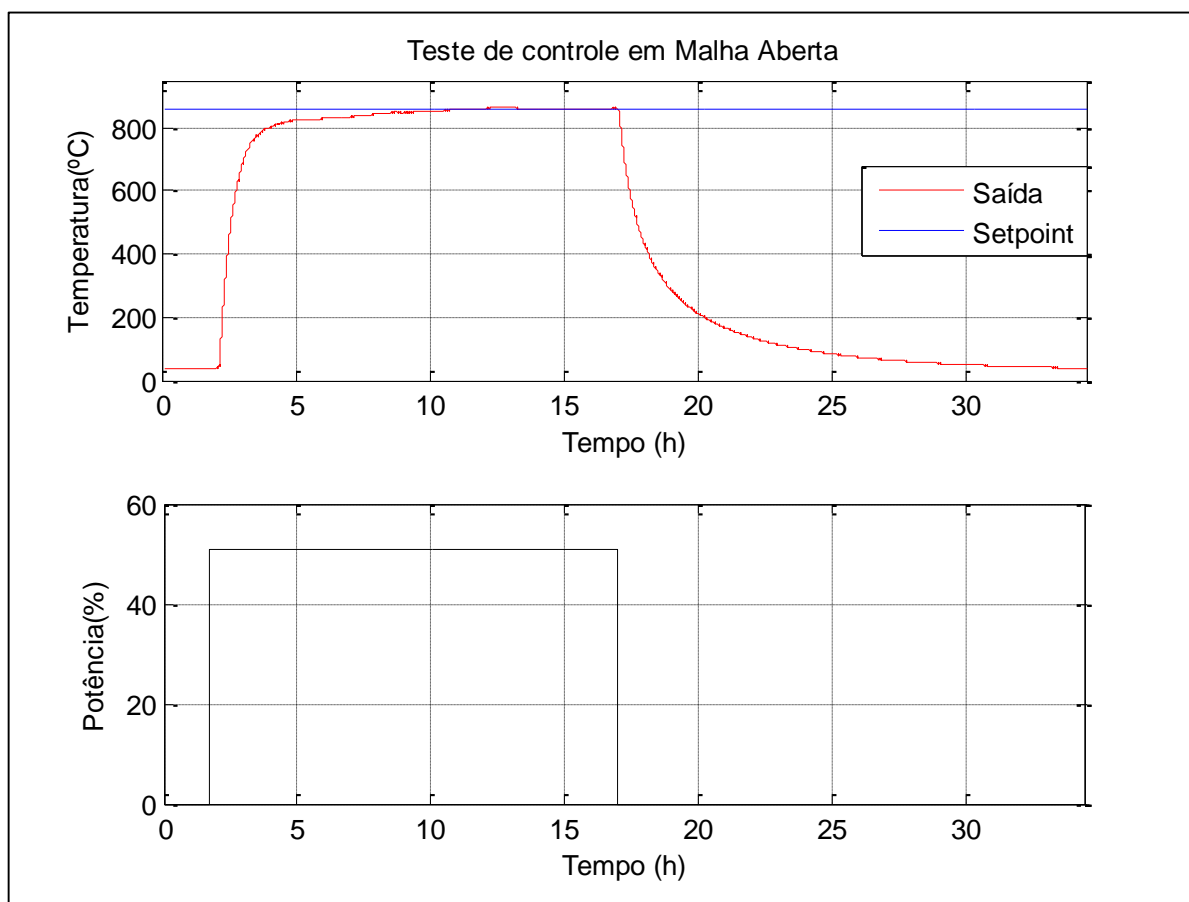
Para a sintonia de um controlador PID, primeiramente devem ser definidos os critérios de desempenho para a malha de controle. Vale lembrar que o principal critério de qualquer malha de controle é a estabilidade, que deve ser satisfeito sempre (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006). A sintonia deve garantir que todos os polos da função de malha fechada estejam localizados no semiplano esquerdo do plano complexo.

Ressalta-se ainda que em todos os casos de sintonia, direta ou indiretamente é requerido o conhecimento do modelo dinâmico do processo. Por esta razão, o sistema de controle deve ter mínima sensibilidade para variações ou incertezas no modelo utilizado para a sintonia, isto é, o sistema deve ser robusto, pois essa é outra importante característica para o controle. Essa robustez pode ser traduzida “como a garantia de que os polos da função de transferência de malha fechada terão parte real negativa para todos os possíveis modelos dinâmicos do processo” (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006).

Existem vários trabalhos empíricos e baseados na experiência dos seus idealizadores, propondo métodos para a determinação dos ganhos do PID, visando atender diferentes critérios de desempenho. Ziegler & Nichols (1942) sugeriram um método para ajustar um controlador cujo objetivo é obter uma razão de declínio igual a $\frac{1}{4}$ na saída. Para isso, o ganho do sistema é elevado até a planta começar a oscilar, ou seja, chegar ao limiar de estabilidade, determinando-se nessa condição o ganho e o período de oscilação, a partir dos quais são calculados os ganhos do PID. Chien, Hrones e Reswick (1952), propuseram um método para permitir o sistema ter a resposta mais rápida sem sobrevalor ou com sobrevalor de 20%, sendo os ganhos do PID calculados diretamente com os parâmetros do processo (K, θ, τ).

Neste trabalho o objetivo de controle foi realizar um controle regulatório em que se conseguisse um erro menor do que 5°C , após atingido regime permanente. Dessa maneira, não havia qualquer preocupação com o regime transitório, ficando estabelecido que fosse o mais rápido possível para atingir a condição desejada. Para viabilizar algum critério de comparação dos sistemas de controle foi realizado um teste em malha aberta (Figura 20). A potência aplicada foi de 50,96% e o tempo para atingir 860°C foi de aproximadamente oito horas. Com isso, procurou-se por uma sintonia que permitisse ao forno ter uma resposta mais rápida do que em malha aberta, atendendo ao critério de erro nulo em regime permanente.

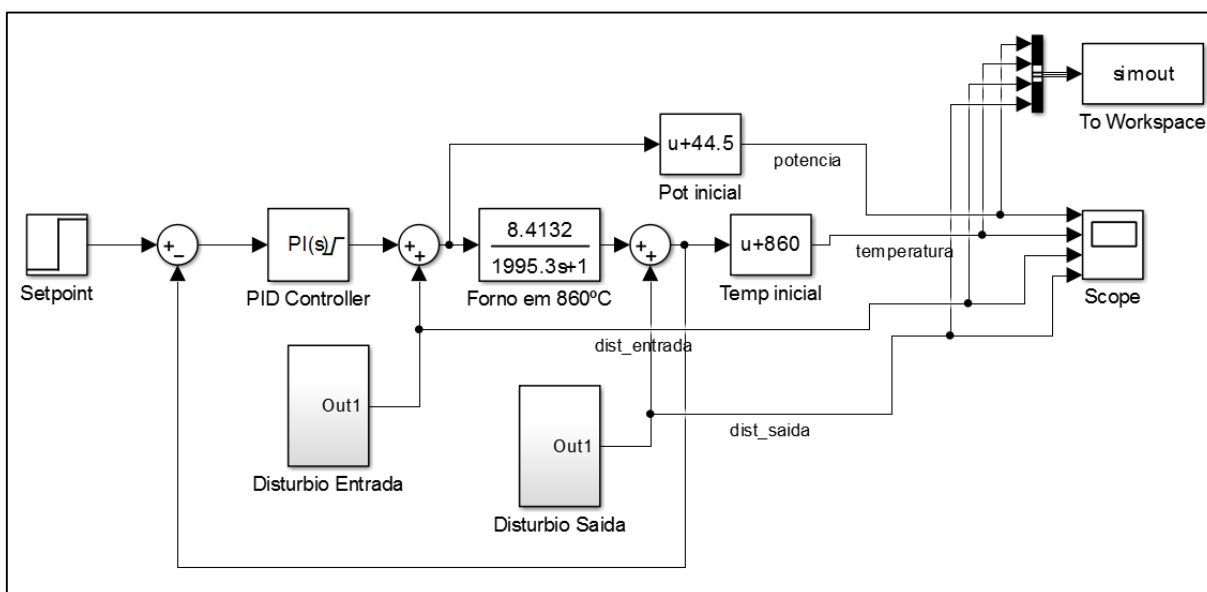
Figura 20 – Resposta do forno em malha aberta



Fonte: Produção do próprio autor.

Para viabilizar a resposta desejada foi utilizado um controlador *gain scheduling*, que se caracteriza por apresentar mudança de ganhos dependendo da região de operação (SEBORG et al., 2004). Essa região de interesse foi inicialmente designada como 50 °C acima ou abaixo do *setpoint*. O controlador é um proporcional com alto ganho, quando fora da região de interesse e proporcional-integral, sintonizado para o controle regulatório, quando atingir a região de interesse. Isso foi necessário para evitar sobressinal, devido ao acúmulo da ação integral durante o regime transitório.

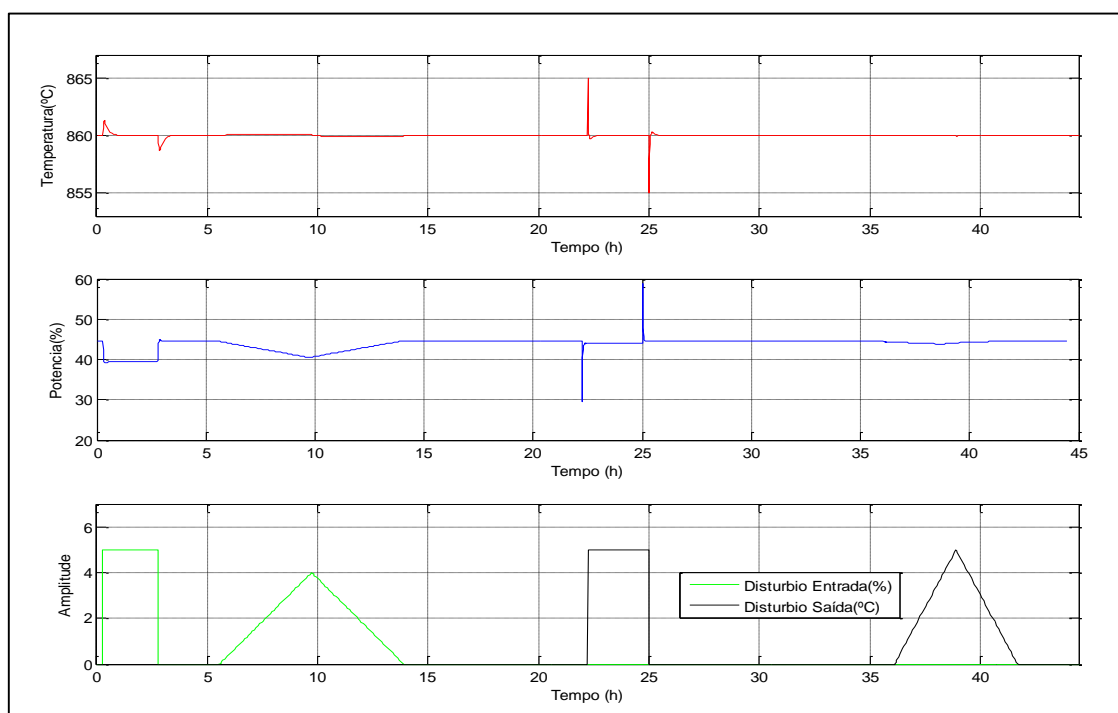
Atualmente existem diversas ferramentas que auxiliam o processo de sintonia de um controlador. O MATLAB, por exemplo, possui módulos dedicados à sintonia de controladores, além de possuir um ambiente de simulação, o *Simulink*. Vale ressaltar que nesse trabalho foi adotado um método de sintonia baseado em simulação. Para isso foi montado um arquivo de simulação (Figura 21) no *Simulink* onde foram testados alguns ganhos do controlador e suas respostas a algumas variações.

Figura 21 – Diagrama de simulação do *Simulink*

Fonte: Produção do próprio autor.

Dentre os vários ganhos testados na plataforma de simulação os ganhos $k_p=3$ e $k_i=0.005$ foram os que apresentaram um resultado satisfatório, conforme mostrado na Figura 22. Estes resultados foram obtidos numa simulação com duração de aproximadamente 45 horas, aplicando-se variações de distúrbio na entrada e saída com sinais tipo degrau e rampa.

Figura 22 – Resultado da simulação com controlador PI



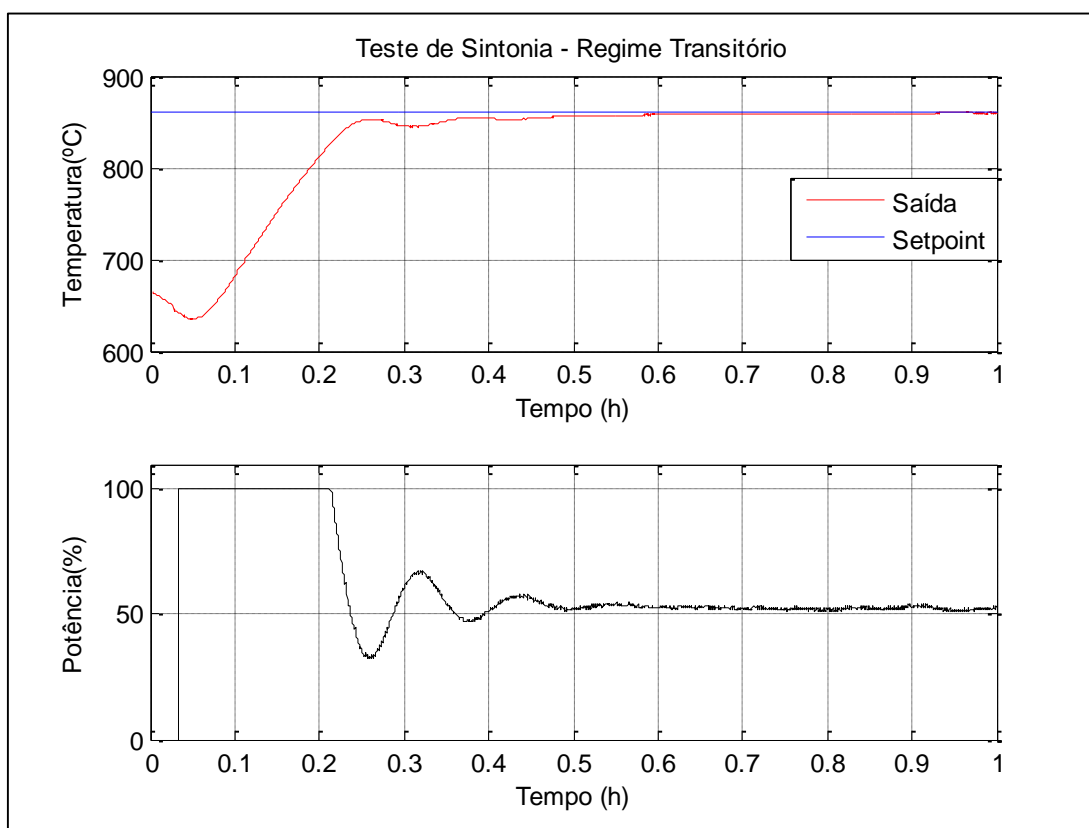
Fonte: Produção do próprio autor.

Verifica-se que o sistema simulado com tais ganhos foi capaz de absorver as influências dos distúrbios e garantir o controle da temperatura do sistema, atendendo ao critério estabelecido. Sendo assim, iniciaram-se os testes de controle no forno com essa sintonia (Figuras 23 e 24).

Como discutido anteriormente, verifica-se na Figura 23 que o controlador aplicou potência máxima no sistema até atingir a temperatura de aproximadamente 810 °C, onde os ganhos foram alternados e o controlador PI imprimiu um comportamento mais suave. O sistema apresentou um comportamento bem mais rápido do que em malha aberta, atingindo 860 °C com aproximadamente 30 minutos, porém partindo de uma temperatura de 650 °C.

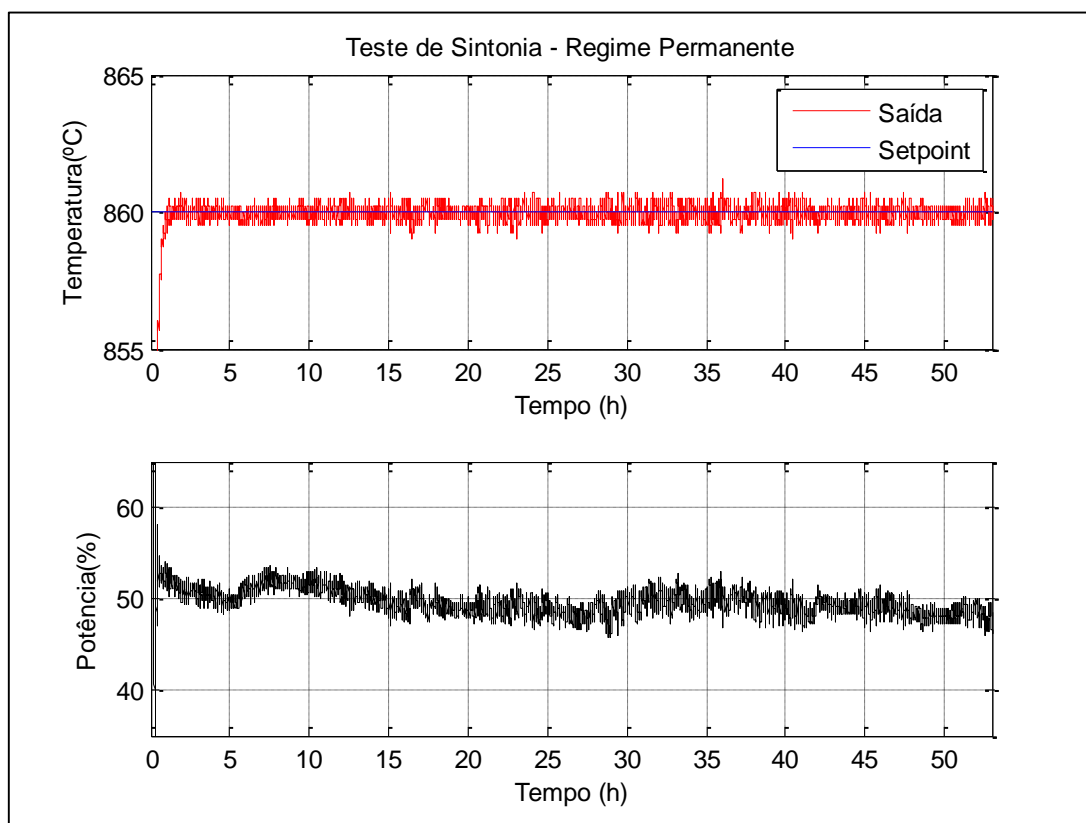
Na Figura 24 vê-se o resultado do controle durante aproximadamente 55 horas após atingido o regime permanente. Nota-se que o sistema atendeu perfeitamente o critério estabelecido, eliminando a ação do distúrbio da tensão da rede e mantendo a temperatura em 860 °C.

Figura 23 – Primeiro teste de sintonia no forno - Regime transitório



Fonte: Produção do próprio autor.

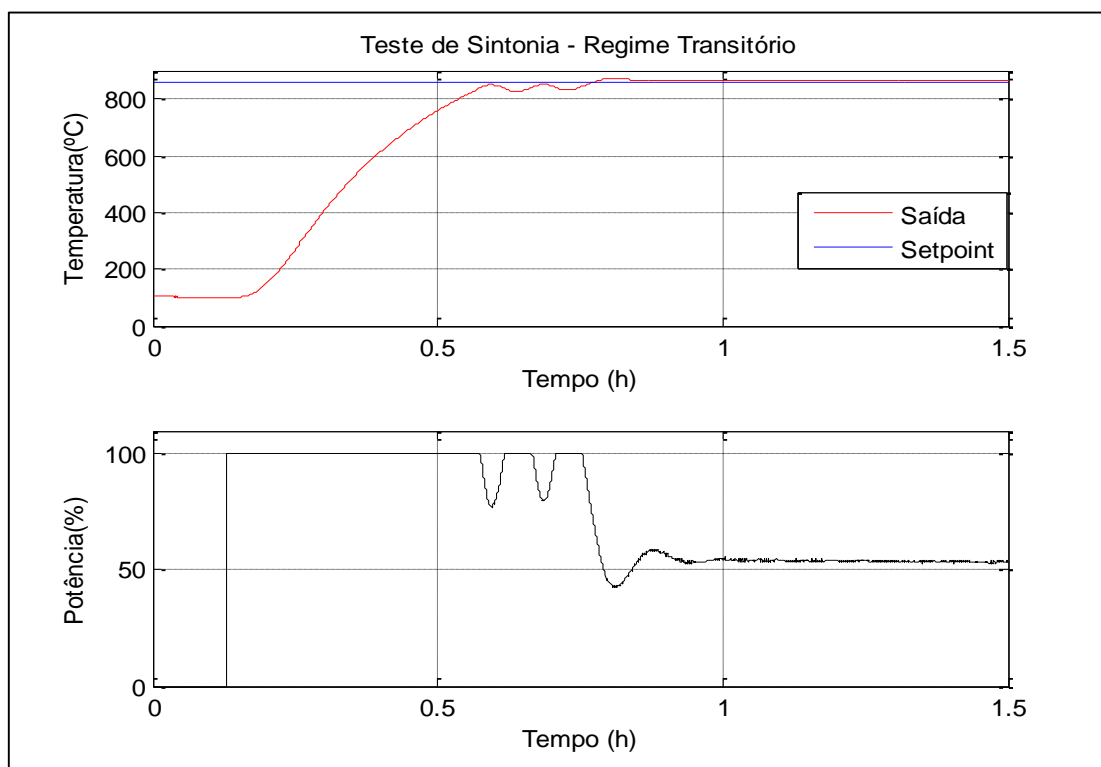
Figura 24 – Primeiro teste de sintonia no forno - Regime permanente



Fonte: Produção do próprio autor.

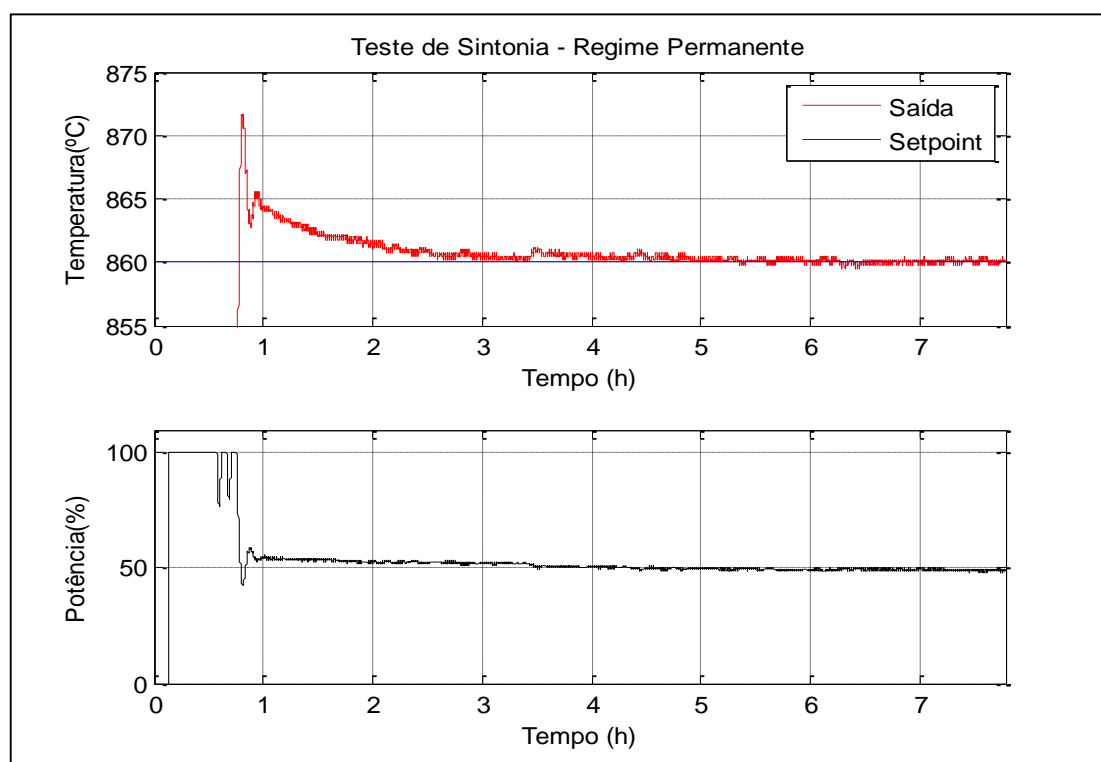
Posteriormente, foi realizado outro teste partindo da temperatura de aproximadamente 100°C (Figuras 25 e 26), no qual o sistema teve pequenas oscilações ao atingir a região de interesse, alcançando o *setpoint*, com sobressinal de 10°C. Mesmo assim, apresentou resposta mais rápida do que em malha aberta. A diferença entre os dois testes pode ser devida à inércia térmica do forno, pois este, ao iniciar em temperaturas diferentes, permite ao sistema acumular cargas térmicas distintas, implicando comportamentos desiguais. No regime permanente (Figura 26) o sistema também apresentou resposta satisfatória.

Figura 25 – Segundo teste de sintonia no forno - Regime transitório



Fonte: Produção do próprio autor.

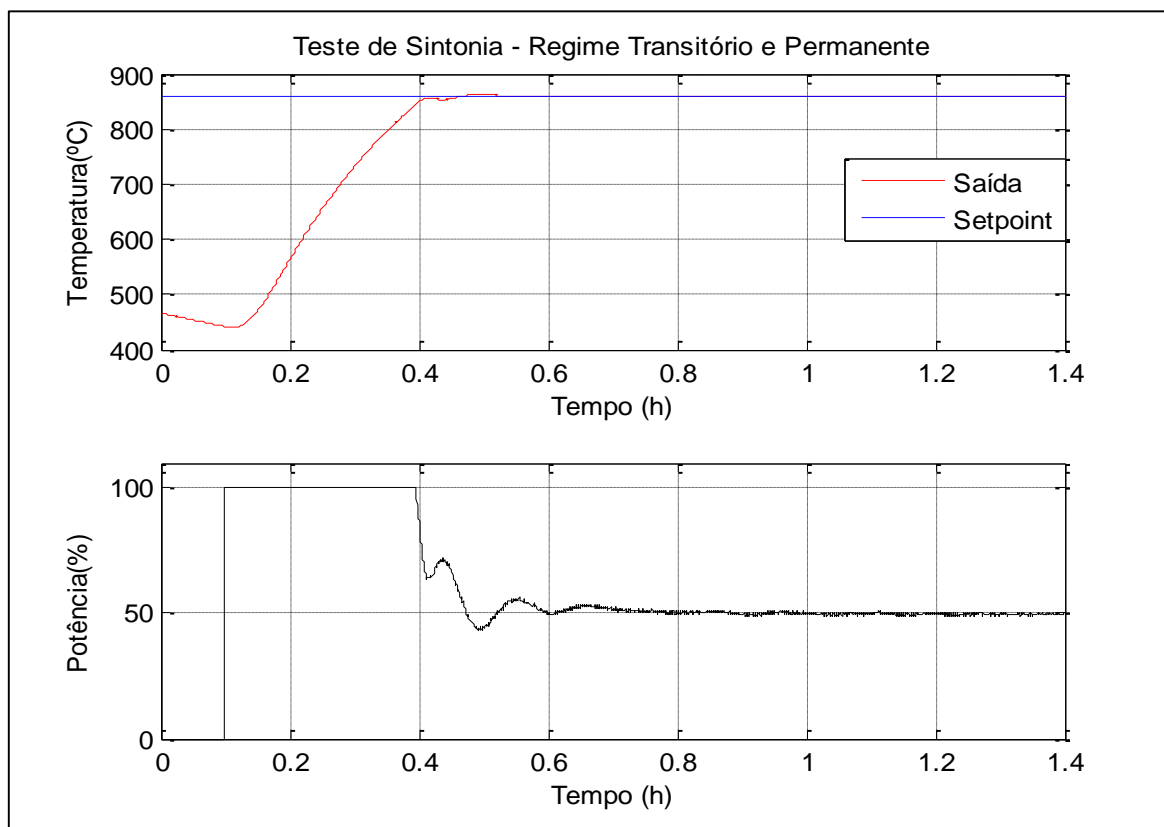
Figura 26 – Segundo teste de sintonia no forno - Regime permanente



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado um terceiro teste de resposta do sistema, agora partindo de uma temperatura de 450°C (Figura 27).

Figura 27 – Terceiro teste de sintonia no forno - Regime transitório e permanente

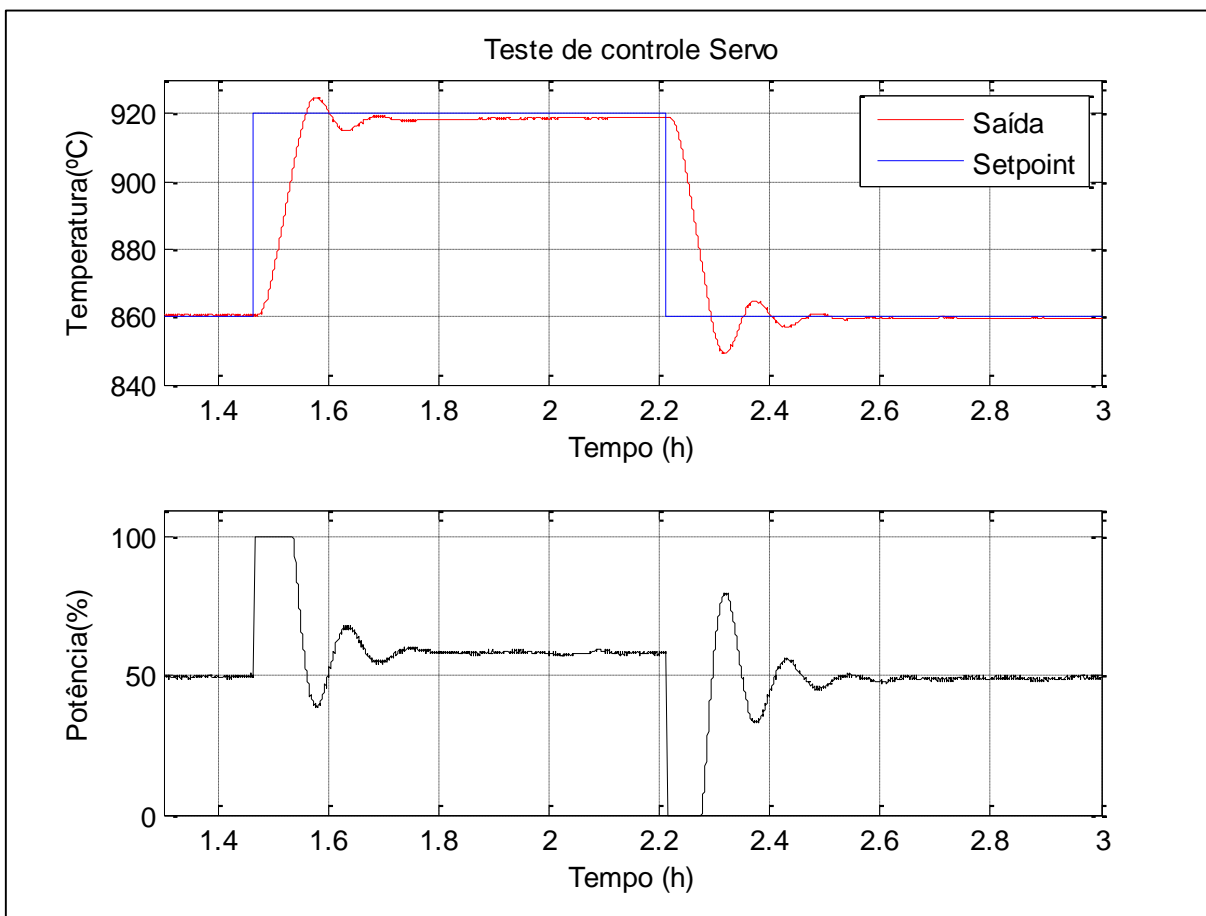


Fonte: Produção do próprio autor.

Nesse terceiro teste, o sistema novamente respondeu bem, atendendo aos critérios estabelecidos. Verificada a eficácia do controle regulatório na região da temperatura de 860°C, foi então realizado um teste para o controle servo, mesmo não sendo o objetivo de controle. O *setpoint* foi alterado de 860°C para 920°C, sendo esta outra temperatura utilizada na síntese de alguns supercondutores.

De acordo com a figura 28 percebe-se que o sistema respondeu muito bem à variação no *setpoint*, comprovando sua robustez. Mesmo apresentando um sobressinal de aproximadamente 10°C o sistema teve uma resposta rápida comparada à de malha aberta.

Figura 28 – Teste de controle Servo



Fonte: Produção do próprio autor.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O processo de automação de um forno é complexo e de difícil êxito. Isso é devido à sua dinâmica muito lenta, característica dos sistemas térmicos, o que demanda grande investimento de tempo e esforço por parte dos pesquisadores. O projeto se iniciou com uma variável desconhecida afetando o comportamento do forno, impedindo sua identificação. Felizmente, foi descoberto que essa variável era a tensão da rede elétrica, o que permitiu prosseguir com a identificação do modelo e o projeto do controlador.

Posteriormente, foi possível verificar que o controlador PI acelerou a resposta do forno quando comparada à de malha aberta. Além disso, foi verificada a eficácia do controle de temperatura ao manter o forno em 860°C durante mais de 50 horas. Inicialmente, o mesmo apresentava variações de até 25°C devido à variação da tensão da rede elétrica.

Desta forma foi possível alcançar todos os objetivos estabelecidos neste projeto de graduação, resultando na modernização do sistema de automação do forno Zeternit I e viabilizando aos usuários o monitoramento e atuação remota durante o tratamento das amostras. Portanto, este trabalho tem grande relevância, visto que possibilitará a produção de cerâmicas de alta qualidade, além de ser útil no avanço dos trabalhos do grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAFRUIT. Disponível em: <<https://www.adafruit.com/product/269>> Acesso: 17 fev. 2017.
- ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 17 fev. 2017.
- ASTRÖM, K.J. & HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. USA: ISA, 1995.
- BEGA, E.A. INTRODUÇÃO. In: BEGA, E.A.; DELMEÉ, G.J.; COHN, P.E.; BULGARELLI, R.; FINKEL, V.S. **Instrumentação Industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência. p. 1-19. 2011.
- BRAGA, N.C. Relés de estado sólido (ART210). **Instituto Newton C. Braga**. 2014. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/1436-art210>>. Acesso em: 17 fev. 2017.
- BRANÍCIO, P. Introdução à supercondutividade, suas aplicações e a mini-revolução provocada pela redescoberta do MgB₂: Uma abordagem didática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 23, n. 4, p. 381-390. dez. 2001.
- CAMPOS, M.C.M.M. & TEIXEIRA, H.C.G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.
- CHIEN, K.L.; HRONES, J.A.; RESWICK, J.B. On the Automatic Control of Generalized Passive Systems. **Transactions of the ASME**. v. 74, p. 175-185. fev. 1952.
- COHN, P.E. TEMPERATURA. In: BEGA, E.A.; DELMEÉ, G.J.; COHN, P.E.; BULGARELLI, R.; FINKEL, V.S. **Instrumentação Industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência. p. 207-247. 2011.
- DORF, R.C. & BISHOP, R.H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2001.
- ELETRONICS. Disponível em: <<http://electronics.stackexchange.com/questions/128804/generating-a-variable-dc-signal-with-pwm>>. Acesso em: 16 fev. 2017.
- KUO, B. **Automatic Control Systems**. 7. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- LJUNG, L. **System Identification: Theory for the user**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- METALTEX. Disponível em: <<http://www.metaltex.com.br/produto/tzc/tzc-rele-de-estado-solido-monofasico-ssr>>. Acesso em: 16 fev. 2017.
- MONTGOMERY, D.C. & RUNGER G.C. **Applied statistics and probability for engineers**, 4. ed. New York: Wiley, 2007.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1998.

PAIOLA, C.E.G. O papel do supervisor no atual contexto tecnológico. **Revista InTech**, n.132, p. 6-18, ago. 2011.

PAIOLA, C.E.G.; GRANITO, A.R.; OLIVEIRA, C.S.; GOMES, D.L. Operação remota de plantas de mineração e saneamento. **Revista InTech**, n. 138, p. 48-54, jan. 2012.

PASSOS, C.A.C. **Investigação do diagrama de fases do supercondutor (Hg,Re)-1223 através de medidas de transporte**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

ROMAGUERA, A.R.C.; SMITH, C.M.; DORIA, M.M. Supercondutividade de alta temperatura crítica. **Ciência Hoje**. v. 44, n. 263, p. 42-48. set. 2009.

SEBORG, D.E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A. **Process Dynamics and Control**. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2004.

SILVA, F.B.B.; SIMONETTI, D.S.L.; FARDIN, J.F.; URTUBI, I.D.L.V.; ORLANDO, M.T.D. Limitador de corrente de partida de MIT utilizando supercondutor HTSC resistivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18, 2010, Bonito. **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática**. v. 1. p. 4920-4925. 2010.

SILVA, L.M.S.D. **Implementação de um sistema de aquisição de dados para modelagem de um forno tubular resistivo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Vitória, 2014.

SMITH, C.L. **Digital Computer Process Control**. Scranton: Intext, 1972.

SOLO ELECTRÓNICA. Disponível em: <http://www.soloelectronica.net/rele_solido.htm>. Acesso em: 17 fev. 2017.

ZIEGLER, J.G. & NICHOLS, N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. **Transactions of the ASME**. v. 64, p. 759-768. nov, 1942.