



EDIMILSON DA SILVA ZAMBALDI

**CONTROLE AUTOMATIZADO DE FORNOS
PARA TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS**

LAVRAS – MG

2016

EDIMILSON DA SILVA ZAMBALDI

**CONTROLE AUTOMATIZADO DE FORNOS PARA TRATAMENTO
TÉRMICO EM AÇOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Inteligência Computacional, Modelagem e Automação de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Ricardo Rodrigues Magalhães

Coorientador

Bruno Henrique Groenner Barbosa

LAVRAS – MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Zambaldi, Edimilson da Silva.

Controle automatizado de fornos para tratamento térmico em
aços / Edimilson da Silva Zambaldi. – Lavras : UFLA, 2016.
115 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.
Bibliografia.

1. Tratamento térmico. 2. Controle PID. 3. Automação de
fornos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

EDIMILSON DA SILVA ZAMBALDI

**CONTROLE AUTOMATIZADO DE FORNOS PARA TRATAMENTO
TÉRMICO EM AÇOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Inteligência Computacional, Modelagem e Automação de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de março de 2016.

Dr. Bruno Henrique Groenner Barbosa	UFLA
Dr. Sandro Pereira da Silva	UFLA
Dr. Giovani Bernardes Vitor	UTC

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

LAVRAS – MG
2016

Aos meus pais

Dilson e Maria,

à minha irmã

Edneusa

à minha querida esposa

Fernanda

e aos meus filhos

Angelo, Luigi e Enzo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Deus do meu coração e do meu entendimento, o Grande Arquiteto do Universo, agradeço a oportunidade de viver e de evoluir, tanto no intelecto como espiritualmente e por ter colocado na minha vida tantas pessoas boas e generosas.

À minha família, por me dar uma base sólida. Em especial à minha esposa Fernanda, por nos permitir alcançar grandes conquistas. Tenho consciência de que sem o seu apoio o caminho teria sido muito mais difícil. Aos meus pais por sempre serem um exemplo de que nunca é tarde para estudar!

Agradeço aos Professores Ricardo Rodrigues Magalhães e Bruno H. Groenner Barbosa pela orientação, dedicação, amizade e confiança depositada ao longo deste projeto.

Aos Professores Paulo Fernando Trugilho e Alberto Colombo que, respectivamente, cederam o forno e o analisador de qualidade de potência e energia, e sempre foram muito prestativos no suporte a este trabalho. Assim como, aos professores que se disponibilizaram a participar da banca de defesa.

Agradeço ao Grupo Ciclope através do seu superintendente Aldo Freschet e ao técnico de laboratório João Paulo Mutuani pela confiança, por terem disponibilizado os recursos da empresa e tempo no apoio técnico necessário.

Ao amigo Willian Rodrigues de Moura, por todo o apoio e pela paciência durante o desenvolvimento dos algoritmos de controle e programação do sistema. Assim como, ao graduando em engenharia de controle e automação Moisés Batista Martins, que me acompanhou em muitos ensaios e medições.

Agradeço a todos os técnicos do Departamento de Engenharia da UFLA, que nunca mediram esforços para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação (PPGESISA), bem como a todos os professores e funcionários, por me darem a oportunidade de realizar esta pesquisa e de aprimorar meus conhecimentos técnicos.

Enfim, agradeço a todos aqueles que colaboraram de alguma forma para o cumprimento desta etapa da minha vida.

Muito Obrigado!

"O mistério é a coisa mais nobre de que podemos ter experiência. É a emoção que se encontra no cerne da verdadeira ciência. Aquele que não sente essa emoção e que não pode mais se maravilhar nem se espantar, é como se já estivesse morto. Saber que aquilo que é impenetrável para nós verdadeiramente existe e se manifesta como a mais alta sabedoria e a mais radiosa beleza, que nossas limitadas faculdades só podem apreender em suas formas mais primitivas, esse conhecimento, esse sentimento, está no centro de toda verdadeira devoção. A experiência cósmica é com efeito o mais poderoso e mais nobre pivô da pesquisa científica."

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema de baixo custo para o controle automatizado de fornos utilizados nos tratamentos térmicos de aços, capaz de controlar a curva de aquecimento do material em função do tempo, diminuindo consideravelmente a interferência subjetiva do fator humano durante o processo. O sistema proposto pode ser adaptado na maioria dos fornos de baixo custo disponíveis no mercado e utilizados por pequenas empresas. Este sistema é constituído por um microcontrolador de tecnologia aberta e programado com ações de controle do tipo PID (Proporcional Integral Derivativo), que recebe o valor da temperatura do forno, obtido por meio de um sensor, e ajusta a temperatura a partir de um ciclo definido para o tratamento térmico específico, atuando sobre os resistores do forno, onde uma das fases está conectada ao terminal de carga de um relé de estado sólido (RES), variando a potência média fornecida ao forno, através da modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM) no terminal de controle do relé. O objetivo do tratamento térmico é a obtenção desejada das propriedades mecânicas finais do material e a sua eficácia depende do controle da temperatura em função do tempo durante os ciclos de aquecimento. Em termos de validação, foram comparados os resultados da análise de dureza e metalográfico em amostras de aços D2 e D6 submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, pelo método tradicional (visual e sem controlador) e o sistema proposto (com o controlador PID). As análises indicaram a eficácia do sistema de baixo custo, que apresentou valores para a dureza do material dentro do especificado pelo fabricante para o tratamento térmico executado. Ainda assim, a análise metalográfica apresentou uma estrutura granular fina e homogênea, dentro dos padrões previstos.

Palavras-chave: tratamento térmico, controle PID, automação de fornos.

ABSTRACT

This work is aimed to propose a low cost automated control of steel heat treatment furnace implemented by a single computer system in order to control the temperature with precision and reduce the human interaction during the heat treatment process. It can be adapted on low cost commercial furnace used by small business. In this case, a platform open licensed with microprocessor is programmed with PID (Proportional-Integral-Derivative) controller that receive the temperature by a sensor and adjust the temperature. With reference in a defined specific heat treatment cycle, this activates the furnace resistors wherein a phase is connected with a load terminal of solid state relay (SSR), varying the power furnished to furnace, using the technical of Pulse Width Modulation (PWM) on the relay control terminal. The purpose of heat treatment is to cause desired changes in the properties of metal parts and the results depends on the control of temperature in function of time. Preliminary tests were performed comparing the results of D2 and D6 materials samples that were hardening and after tempering by the traditional method (visual and without control) and the PID system control proposed. Results by hardness and metallographic analysis showed a precision control and a better final hardness were obtained with a fine granular and homogeneous structure.

Keywords: heat treatment, PID control, furnace automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ciclo de aquecimento para a têmpera de aços em geral	24
Figura 2	Sistema em malha fechada	26
Figura 3	Curva de resposta em degrau unitário	29
Figura 4	Resposta $c_{(t)}$ ao degrau unitário $u_{(t)}$	34
Figura 5	Tangente no ponto de inflexão da curva	34
Figura 6	Simulação com variação do ganho K_p	35
Figura 7	Oscilação constante ($K_p=K_{cr}$) e período crítico P_{cr}	35
Figura 8	Comparação dos controladores de temperatura liga/desliga e PID	40
Figura 9	Arduino modelo UNO	41
Figura 10	Diagrama de um relé de estado sólido fotoacoplado.....	47
Figura 11	Forno utilizado no projeto	48
Figura 12	Diagrama de um sistema controle de temperatura em fornos	49
Figura 13	Diagrama de blocos usado nas simulações para obter K_{cr}	50
Figura 14	Diagrama de blocos usado para afinar os valores PID	51
Figura 15	Protótipo do sistema de controle: (1) termopar, (2) relé de estado sólido, (3) Display LCD e Arduino, (4) módulo A/D	52
Figura 16	Detalhe do display LCD com o controle de temperatura	53
Figura 17	Corpos de prova dos materiais D6 e D2	54
Figura 18	Relação entre a cor do aço e a sua temperatura de têmpera (tradução livre)	55
Figura 19	Relação entre a cor do aço e a sua temperatura de revenimento (tradução livre)	56
Figura 20	Detalhe da cor do revenimento "palha escuro" (aproximadamente 300 °C)	57

Figura 21	Registros dos dados de tratamento térmico: (1) registrador de temperatura; (2) forno com termopar; (3) analisador de qualidade de energia e potência	59
Figura 22	Curva gerada a partir dos dados obtidos	60
Figura 23	Simulação de toda a curva com respostas e percentuais de aproximação	61
Figura 24	Simulação da curva de aquecimento com respostas e percentuais de aproximação	61
Figura 25	Simulação da curva de resfriamento com respostas e percentuais de aproximação	62
Figura 26	Simulação para $K_p = K_{cr} = 11,26$ e obtenção de $P_{cr} = 0,4$	63
Figura 27	Curva de aquecimento do forno utilizado na têmpera das amostras em D6	66
Figura 28	Resultados das durezas das amostras nas várias fases do processo de tratamento térmico, no qual foi utilizado o controlador PI	68
Figura 29	Análise metalográfica da amostra do material D6 submetida ao método tradicional de tratamento térmico (têmpera e revenido), em fornos sem o controle de temperatura	69
Figura 30	Análise metalográfica da amostra do material D6 submetida ao tratamento térmico (têmpera e revenido), em fornos com controlador PI	69
Figura 31	Ciclo de aquecimento de têmpera das amostras em D6 com controlador liga/desliga	72
Figura 32	Ciclo de aquecimento de têmpera das amostras em D6 com controlador PI	72
Figura 33	Comparação dos desvios durante o monitoramento dos ciclos de tratamento térmico nas amostras em D6 com os controladores liga/desliga e PI	75

Figura 34	Varição da corrente durante o ciclo de aquecimento para a temperatura nas amostras em D6	76
Figura 35	Programação em forma de rampas e patamares utilizado pelo controlador N1100	77
Figura 36	Comparação da programação entre as curvas de aquecimento do sistema proposto e do controlador NOVUS® modelo N1100	77
Figura 37	Velocidade média de aquecimento do forno em vários intervalos de temperatura	78
Figura 38	Diagrama de alto forno para a produção de ferro.....	89
Figura 39	Diagrama de produção aço.....	90
Figura 40	Diagrama de fases Fe-Fe ₃ C	93
Figura 41	Célula Unitária TCC.....	95
Figura 42	Curva TTT.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Cálculo dos ganhos do controlador a partir dos valores T e L	34
Quadro 2	Cálculo a partir dos valores K_{cr} e P_{cr}	36
Quadro 3	Comparativo de nomenclatura e temperaturas de referência dos tratamentos térmicos	58
Quadro 4	Valores PID calculados a partir dos valores encontrados para K_{cr} e P_{cr}	64
Quadro 5	Valores PI obtidos após sintonia fina dos valores através de simulações	64
Quadro 6	Resultados do tratamento térmico (têmpera e revenido) nas amostras submetidas ao método tradicional, em fornos sem o controle de temperatura	66
Quadro 7	Resultados do tratamento térmico (têmpera e revenido) nas amostras submetidas no forno com o controlador PI	67
Quadro 8	Registros comparativos do consumo médio de energia no tratamento térmico de têmpera (método tradicional <i>versus</i> controlador PI)	69
Quadro 9	Registros comparativos do consumo médio de energia no tratamento térmico de têmpera (controlador <i>ON/OFF</i> <i>versus</i> controlador PI)	70
Quadro 10	Monitoramento do processo com o controlador liga/desliga	73
Quadro 11	Monitoramento do processo com o controlador PI	74
Quadro 12	Resultados dos cálculos dos índices de desempenho dos controladores liga/desliga e PI	74
Quadro 13	Estimativa de preço para o controlador proposto	79
Quadro 14	Composição química aproximada dos aços D2 e D6 (% em peso)	100

Quadro 15	Comparativo de nomenclatura e temperaturas de referência dos tratamentos térmicos	100
-----------	---	-----

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
DCF	Departamento de Ciências Florestais
FEM	Força Eletromotriz
GPS	Global Position System
HRC	Hardness Rockwell C
IDE	Integrated Development Environment
ITSE	Integral of Time multiplied by the Square Error
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LIT	Linear e Invariante no Tempo
NBR	Norma Brasileira
PID	Proporcional Integrativo Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
RES	Relé de Estado Sólido
RTD	Resistance Temperature Detector
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	Silicon Controlled Rectifier
SSR	Solid State Relay
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
TRIAC	Triode for Alternating Current
UFLA	Universidade Federal de Lavras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Tratamentos térmicos em aços	21
3.2	Sistemas de controle	25
3.2.1	Arduino	40
3.2.2	Sensores de temperatura	43
3.2.3	Relé de Estado Sólido (RES)	46
4	MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1	Instrumentação do forno	47
4.2	Modelagem do sistema	49
4.3	Sintonia de Controladores	50
4.4	Protótipo do sistema de controle	51
4.5	Ensaio dos corpos de prova	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
6	CONCLUSÃO	79
6.1	Trabalhos futuros	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICES	87
	ANEXOS	103

1 INTRODUÇÃO

O início do desenvolvimento industrial se caracterizou pela produção de bens em alto escala, que antes eram produzidos de forma artesanal. As máquinas eram capazes de realizar tarefas muito mais rapidamente, com precisão e padronização nunca vistas antes, que o trabalho manual humano não era capaz de atingir; isto diminuiu os custos de produção, o preço unitário do produto, tornou possível as peças de reposição (repetibilidade nos processos) e o aumento na complexidade dos componentes fabricados, estabelecendo, por fim, a sociedade de consumo. No entanto, neste período, o homem continuava sendo peça fundamental nos processos, pois muitas das máquinas não eram capazes de se abastecerem de matéria prima, se auto regularem e atuar nas variações e nas não conformidades do processo. A grande influência do homem no processo era determinada mais pela experiência do operador do que pela técnica. Em um segundo momento houve um enorme desenvolvimento das técnicas, mas ainda não foi capaz de retirar a total interferência do homem e em muitos processos o seu componente artesanal, e mesmo com a automação de muitos sistemas, a evolução dos sensores e atuadores, muitos processos ainda utilizam o homem como avaliador e mediador, o que satisfaz alguns processos devido às suas largas tolerâncias e no custo-benefício do grau de automação. Não obstante, vários processos necessitam de níveis restritos de tolerância para a sua maior eficiência, exigindo graus cada vez mais elevados de automação e controle, inclusive com a imediata, precisa e constante intervenção de ajustes nas suas variáveis de controle, devido a distúrbios que afetam de maneira adversa os valores das variáveis de saída. Para o favorável funcionamento destes sistemas é necessário conhecer profundamente cada processo, transformá-lo em um modelo matemático onde se pode retirar ao máximo o componente artesanal, conhecer as suas variáveis controláveis e incontroláveis e construir um modelo lógico que

seja capaz de atuar em resposta às suas adversidades. Quanto maior o conhecimento e o domínio desenvolvido sobre um processo, mais é possível melhorá-lo e torná-lo cada vez mais eficiente.

Seguindo esta tendência, as técnicas de transformação dos metais têm se aprimorado cada vez mais com as melhorias dos processos de produção, tratamentos e beneficiamentos de materiais e componentes mecânicos, impulsionadas principalmente pela evolução tecnológica no controle dos processos, com o avanço na precisão dos instrumentos de medição, sensores, atuadores e técnicas de controle, assim como o aprofundamento nos conhecimentos das propriedades dos materiais e suas ligas, inclusive na sinterização de novos compostos. Contudo, o aço continua sendo a liga metálica mais utilizada na indústria devido ao seu baixo custo, disponibilidade, reciclagem, resistência e versatilidade. As possibilidades de aplicação desta liga de ferro e carbono foram ampliadas através da adição de novos elementos de liga e, principalmente, dos diferentes tipos de tratamentos térmicos que podem ser aplicados e proporcionam novas e diferentes propriedades mecânicas. No entanto, muito dos fornos utilizados, em pequenas empresas, nestes tratamentos térmicos possuem um controle limitado, que depende ainda da interferência humana, muitas vezes empírica e subjetiva no seu processo operativo, o que muitas vezes ocasiona baixa eficácia da operação, consumo elevado de energia e até mesmo na inutilização do componente. O tratamento térmico fora das especificações acarreta defeitos, tanto estruturais quanto dimensionais, que se refletem na diminuição da vida útil do componente, quebra inesperada quando submetida a esforços e quantidade maior de paradas para manutenção, como no caso de ferramentas de corte e repuxo.

O presente projeto propõe um sistema de controle em malha fechada, controlado por meio de um sistema computacional simples, de fácil implementação e versátil, com tecnologia aberta, no intuito de diminuir a

interferência subjetiva e artesanal do fator humano durante o tratamento térmico, com a automação de grande parte do processo, e que possa ser adaptado na maioria dos fornos de baixo custo disponíveis no mercado e utilizados por pequenas empresas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é, através das técnicas de controle em malha fechada e das novas tecnologias disponíveis, propor, desenvolver e testar um protótipo de sistema de controle simples e de baixo custo, que pode ser embarcado ou não, capaz de utilizar informações como: tipo de material ou temperatura de tratamento, tipo de tratamento térmico, dureza final e dimensões máximas da peça a ser tratada; para controlar a curva de aquecimento de um forno elétrico (por resistor) de modo automatizado.

2.2 Objetivos específicos

- a) Instrumentação de um forno elétrico comercial para que seja possível o controle em malha fechada do mesmo.
- b) Obtenção de um modelo dinâmico do forno elétrico para ajuste de parâmetros do controlador por simulações.
- c) Automação de um forno por meio de um protótipo de controlador e a realização de testes para a análise comparativa dos resultados de dureza e metalográfico, consumo de energia no processo e custo-benefício na implementação do sistema.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o objetivo de subsidiar o entendimento sobre aços, dos fenômenos físico-químicos, termodinâmicos, análise de dureza e análise metalográfica no processo de tratamento térmico dos aços; encontram-se nos apêndices, conceitos e informações detalhadas e complementares.

3.1 Tratamentos térmicos em aços

Segundo Sverdlin e Ness (2007), o propósito do tratamento térmico é causar mudanças desejadas na estrutura metalúrgica e, portanto, nas propriedades físicas de um componente mecânico. O tratamento térmico para o aço é a operação ou conjunto de operações (no caso de tratamento completo) pelos quais se submete o aço, em estado sólido, a um ou vários ciclos térmicos, de aquecimento e resfriamento em função do tempo. O meio em que se coloca as peças no transcurso destas operações pode modificar, mais ou menos profundamente, a composição química das camadas superficiais da peça, no caso de tratamentos termoquímicos. Na grande maioria dos casos o tratamento térmico é a última etapa do processo de construção de uma peça mecânica, que já passou por várias fases de usinagem e ajustagem, o que torna a sua aplicação mais crítica e qualquer não conformidade representa um impacto maior nos custos de produção.

Para Ogata (2010), os sistemas térmicos são aqueles que envolvem transferência de calor de uma substância para outra e podem ser analisados pela capacidade dos elementos envolvidos em resistir e armazenar a energia térmica, ou seja, em termos de propriedades de resistência e capacitância térmica.

Segundo Sonntag e Wylen (1998), a temperatura é a variável mais importante nos processos industriais, sua medição e controle, embora difíceis,

são vitais para a qualidade do produto e a segurança não só das máquinas como também do homem. Para Cohn (2006), a temperatura é uma das principais variáveis no processo de têmpera. Sua medição e controle são de fundamental importância numa vasta gama de aplicações, que abrange desde processos físicos e químicos até proteção superficial e, em função dessas diferenças, as propriedades mecânicas do material são alteradas. Nos fornos elétricos de baixo custo a transferência de calor ocorre principalmente por irradiação (do forno para o componente) e por condução (da superfície do componente até o seu núcleo). Neste caso, as taxas de transferência de calor seguem a lei de Fourier:

$$Q = k \nabla T , \quad (1)$$

onde Q é o fluxo de calor (W/m^2), k é a condutividade térmica (W/mK) e ∇T é o gradiente de temperatura (K/m).

A temperatura pode ser medida por uma diversificada gama de sensores. Todos eles medem a temperatura pela detecção de alguma mudança em uma característica física, ou seja, indiretamente. No caso dos fornos, geralmente são utilizados termopares. Este tipo de sensor consiste em dois metais distintos unidos em uma extremidade (junção) e que produz uma pequena tensão termoelétrica quando a junção é aquecida. A mudança na tensão termoelétrica é referenciada e interpretada pelos medidores como uma mudança na temperatura. Para Omega Engineering do Brasil (2014), o sensor de temperatura perfeito:

- a) não afeta o meio que é medido;
- b) é precisamente exato;
- c) responde instantaneamente (na maioria dos casos);
- d) tem uma saída facilmente condicionada.

Segundo Hao et al. (2008), durante o aquecimento de uma peça no forno, a temperatura da peça aumenta lentamente em relação à temperatura interna do forno. Este fenômeno é conhecido como histerese térmica. Portanto, é necessário considerar esta defasagem de tempo durante o tratamento térmico. As velocidades ou taxas de aquecimento máximas dependem da condutividade térmica do material; do tamanho e da forma do componente. Valores máximos, típicos em fornos de aquecimento resistivo ficam entre 600 e 1.200 °C/hora. Por outro lado, para que ocorra total transformação e mudança de fase deve existir um período de permanência da peça na temperatura alvo, a fim de que a temperatura externa se iguale à temperatura do núcleo da peça e para o processo cinético de difusão. O tempo para homogeneização de temperaturas é calculado por meio de equações de regime de calor transiente (números de Biot e Fourier). Na prática, é considerado uma hora de permanência a cada polegada (25,4 mm) de espessura da peça. A Figura 1 apresenta um modelo típico de ciclo de aquecimento para a têmpera de aços, onde T1 é a primeira temperatura de acomodação do material, T2 a temperatura final do tratamento térmico e ΔS o tempo sob temperatura constante, para a homogeneização térmica do material.

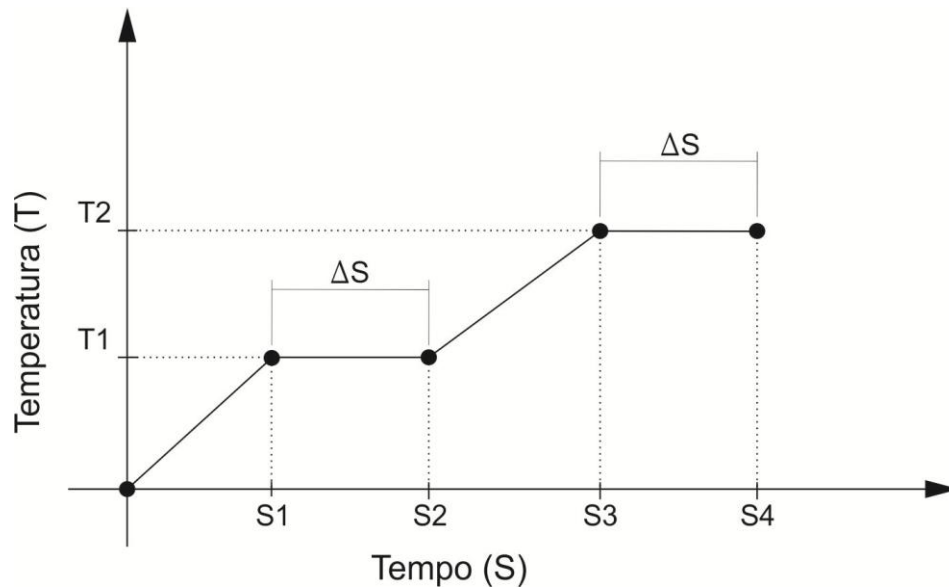


Figura 1 Ciclo de aquecimento para a têmpera de aços em geral

Outro fator a ser considerado é que nos fornos de baixo custo não existe uma atmosfera interna inerte e controlada, e tanto o processo quanto a presença de oxigênio promovem uma descarbonetação superficial da peça, o que cria uma camada de óxido conhecida como carepa. Esta camada possui uma condutividade térmica relativamente baixa o que pode determinar nova variação entre a temperatura do forno, que pode ser controlada, e a temperatura efetiva da peça ou componente submetido ao tratamento.

Ferguson, Li e Freborg (2005) realizaram a modelagem e simulação de tratamento térmico em um componente de aço. Para isto, estes autores utilizaram o *software* comercial DANTE[®] e, após várias simulações, demonstraram o efeito significativo das fases de transformação sobre as distorções dimensionais e as tensões residuais sobre o modelo, e como uma está relacionada à outra. Neste caso, a curva de aquecimento deve considerar a composição química e a dimensão do componente. Para Askeland e Wright (2014), quando as tensões residuais são produzidas pelo trabalho à frio, ou seja, por um prévio processo de

usinagem, um processo de tratamento térmico de normalização pode ser utilizado para remover ou minimizar essas tensões. Porém, durante o tratamento térmico de têmpera, quando ocorre o resfriamento brusco, a superfície da peça se resfria rapidamente e a austenita se transforma em martensita. Quando a austenita no núcleo se transforma posteriormente, a superfície externa, dura e frágil, é submetida às forças de tração enquanto o núcleo está sob compressão. Caso as tensões de tração excedam o limite de resistência do material, trincas de têmpera são formadas na superfície. Este defeito pode ser potencializado ou reduzido, em função da dimensão, forma, composição e meio de resfriamento da peça.

3.2 Sistemas de controle

Segundo Dorf e Bishop (2013), a engenharia preocupa-se com o entendimento e o controle de materiais e forças da natureza para o benefício da humanidade. Os engenheiros de controle buscam o entendimento de segmentos de seu ambiente, chamados de sistemas. Os objetivos de entendimento e controle são complementares porque o controle eficiente de sistemas requer que estes sejam entendidos e modelados. Na análise prévia de um projeto de controle, considera-se a relação de simplicidade *versus* precisão do sistema. Portanto, na obtenção de um modelo matemático deve-se conciliar a simplicidade do modelo com a precisão dos resultados desejados ou erro máximo admissível.

Quando o sistema não depende do sinal de saída para exercer uma ação de controle sobre o sistema, tem-se um sistema de controle em malha aberta, ou seja, o sinal de saída não é medido nem realimentado para a comparação com a entrada de referência.

Nise (2013) caracteriza os sistemas em malha fechada, os que realizam as medições e correções, ou seja, possuem uma realimentação (Figura 2). Neste

caso, usa-se uma medida da saída e a realimentação desse sinal para compará-lo com a saída desejada (referência, comando ou *setpoint*). Portanto, os sistemas em malha fechada apresentam uma grande vantagem sobre os sistemas de malha aberta, por estes serem mais sensíveis às perturbações ou distúrbios. Dorf e Bishop (2013) conceituam a perturbação ou distúrbio como sendo um sinal de entrada não desejado que afeta o sinal de saída. Para Lathi (2007), um sistema em malha fechada ou realimentado, possui a habilidade de supervisão e autocorreção em função de alterações nos parâmetros do sistema e eventos externos, como mudanças no ambiente. Astrom e Kumar (2014) apresentam breve histórico e perspectivas dos sistemas em malha fechada para controle de processos, demonstram a importância e vasta aplicação em vários setores do conhecimento. Criar um modelo matemático que possa representar um sistema dinâmico e compreender as diversas respostas em função das entradas, permite não somente automatizar estes sistemas, mas otimizá-los e compreendê-los de modo cada vez mais preciso.

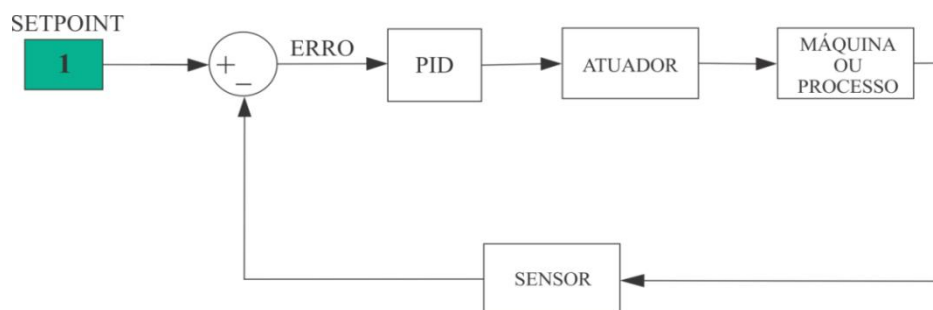


Figura 2 Sistema em malha fechada

O projeto de sistemas de controle é um exemplo específico de projeto de engenharia. O objetivo do projeto de engenharia de controle é obter configuração, especificações e identificação dos parâmetros-chave de um sistema, proposto a atender uma necessidade real. Segundo Dorf e Bishop

(2013), o projeto pode ser organizado em três partes: estabelecimento dos objetivos e variáveis a serem controladas, e definição das especificações (métricas) que serão usadas para medir o desempenho; definição do sistema, modelagem e projeto do sistema de controle; simulação e análise do sistema integrado.

O primeiro passo para a modelagem de um sistema linear é a identificação de uma função de transferência ($G(s)$). Em teoria de controle, funções de transferência são comumente usadas para caracterizar as relações de entrada-saída de componentes ou sistemas, que podem ser descritos por equações diferenciais. A função de transferência é a razão entre a transformada de Laplace da variável de saída e a transformada de Laplace da variável de entrada (DORF; BISHOP, 2013). Considera-se o sistema definido pela seguinte equação diferencial:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (2)$$

onde y é a saída do sistema e x é a entrada e $n \geq m$. A função de transferência ($G(s)$) do sistema é obtida tomando-se a transformada de Laplace de ambos membros da equação em condições iniciais nulas:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{i=0}^n a_i s^i}. \quad (3)$$

Usando o conceito de função de transferência, é possível representar a dinâmica do sistema pelas equações em "s", o que facilita a sua manipulação algébrica. A aplicabilidade do conceito da função de transferência é limitada aos sistemas de equações diferenciais lineares invariantes no tempo (LIT) e pode ser estabelecida experimentalmente introduzindo-se entradas conhecidas e

analisando as saídas. Como exemplo, em fornos elétricos acionados por resistores, é muito comum o sistema ser identificado como um sistema de primeira ordem e, eventualmente, com atraso T ; e pode ser representada por:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ts} , \quad (4)$$

onde o numerador K corresponde ao ganho, τ se refere à constante de tempo, ou seja, o intervalo de tempo necessário para um sistema mudar de estado por uma porcentagem específica. Para um sistema de primeira ordem a constante de tempo é o tempo que a saída leva para apresentar uma variação de 63,2% devido a uma entrada em degrau. O atraso T , ou tempo morto, é uma característica presente em muitos processos sendo a propriedade do sistema de responder a uma entrada após certo tempo.

O comportamento de um sistema dinâmico pode ser especificado em termos de resposta transitória a uma excitação em degrau. Conhecendo esta resposta é matematicamente possível calcular a resposta para qualquer outro tipo de sinal de entrada, sempre considerando a condição de que o sistema está inicialmente em repouso, com valor nulo da variável de saída e de todas as suas derivadas. Principalmente em sistemas de ordem superior (sistemas acima de primeira ordem), antes de alcançar o estado estacionário ou permanente, a resposta transitória de um sistema apresenta, frequentemente, oscilações amortecidas (Figura 3) caracterizadas pelos seguintes valores: tempo de subida (t_r), instante de pico (t_p), máximo valor de ultrapassagem ou sobressinal (M_p) e tempo de acomodação (t_s).

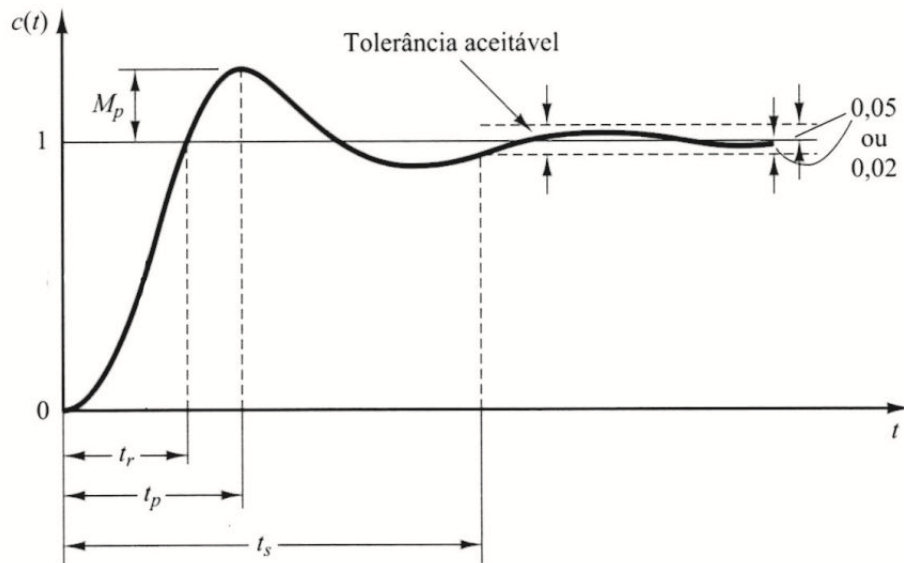


Figura 3 Curva de resposta em degrau unitário
Fonte: Ogata (2010)

Para controlar a temperatura do processo com exatidão e sem o envolvimento extensivo do operador, um sistema de controle de temperatura depende de um controlador, que aceita como entrada um sensor de temperatura, como um termopar. Ele compara a temperatura real à temperatura de controle desejada, conhecida também como ponto de ajuste (*setpoint*), e fornece uma saída para um elemento de controle ou atuador. O controlador é uma das partes do sistema de controle, e o sistema deve ser analisado por completo ao selecionar o controlador adequado. Para Omega Engineering do Brasil (2014) os seguintes itens devem ser considerados à seleção de um controlador:

1. tipo de sensor de entrada (termopar, RTD) e intervalo de temperatura;
2. posicionamento do sensor;
3. algoritmo de controle necessário (liga/desliga, proporcional, PID);

4. tipo de saída necessária (relé eletromecânico ou de estado sólido, sinal de saída analógica);
5. número e tipos de saídas adicionais e outros requisitos do sistema (exibição de temperatura, alarme, limite).

Omega Engineering do Brasil (2014) acrescenta que, existem três tipos básicos de controladores de temperaturas: liga/desliga, Proporcional e PID. O controle liga/desliga (*ON/OFF*) é o tipo mais simples. A saída do dispositivo é ligada ou desligada, sem nenhum estado intermediário. Este tipo de controlador acionará a saída apenas quando a temperatura alcançar o ponto de ajuste. Para o controle de aquecimento, a saída será ligada quando a temperatura estiver abaixo do ponto de ajuste, e desligada se estiver acima do ponto de ajuste. Este controlador é geralmente utilizado nos casos em que um controle exato não é necessário, em sistemas que não sejam capazes de lidar com a ativação e os desligamentos muito frequentes dos seus atuadores e nos casos em que a massa do sistema seja tão grande que as temperaturas mudam de forma muito lenta, ou até mesmo para um alarme de temperatura. Para evitar acionamentos repetitivos, utiliza-se um intervalo ou histerese para o retorno de acionamento do sistema, deste modo, minimiza-se as oscilações presentes na saída do processo, o que nem sempre é possível em alguns sistemas.

O controle proporcional foi desenvolvido para eliminar o ciclo associado ao controle liga/desliga. Um controlador proporcional diminui a potência média fornecida ao aquecedor, conforme a temperatura se aproxima do ponto de ajuste. Isso produz um efeito de desaceleração do aquecedor, de modo que ele não ultrapasse o ponto de ajuste, mas que se aproxime e mantenha uma temperatura estável, ou seja, a sua ação é proporcional ao erro (diferença entre o valor medido e o ponto de ajuste). Essa dosagem pode ser alcançada ao ligar e desligar a saída em intervalos curtos, ou seja, variando a sua frequência em uma

determinada banda, “banda proporcional”. Fora desta banda o sistema fica completamente ligado ou completamente desligado, conforme a temperatura medida fique abaixo ou acima da banda proporcional. Se a temperatura estiver ainda distante do ponto de ajuste, os tempos de duração ligado e desligado variam na proporção da diferença de temperatura dentro da banda proporcional, que é geralmente expressa como uma porcentagem de fundo de escala ou em graus.

O terceiro tipo de controlador, PID, oferece controle proporcional com controle integral e derivativo. Ele combina o controle proporcional com até dois ajustes adicionais, o que ajuda a unidade a compensar as alterações no sistema de modo automático. Os ajustes, integrais e derivativos, são expressos em unidades temporais; eles também são mencionados por seus recíprocos *RESET* e *TAXA*, respectivamente representados em:

$$MV(t) = K_p \left(E(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(t) dt + T_d \frac{dE(t)}{dt} \right), \quad (5)$$

onde MV é a variável manipulada (saída do controlador), K_p corresponde ao ganho proporcional, T_i corresponde ao tempo integrativo, T_d corresponde ao tempo derivativo, E indica o erro ou desvio.

O *reset* e a taxa são métodos utilizados pelos controladores para compensar os erros (*offsets*) e as variações de temperatura. Ao utilizar um controlador proporcional, é muito raro que a entrada de calor que mantém a temperatura do ponto de ajuste seja constante; a temperatura aumentará ou diminuirá a partir do ponto de ajuste, até que uma temperatura estável seja obtida. A diferença entre essa temperatura estável e o ponto de ajuste é chamada de *offset* ou erro em estado estacionário. Esse *offset* pode ser compensado manual ou automaticamente. Com o uso do reset manual, o usuário alternará a

banda proporcional para que o processo se estabilize na temperatura do ponto de ajuste. O *reset* automático, também conhecido como integral, integrará o sinal de desvio ou erro em relação ao tempo, e será somado com o sinal de desvio para alterar a banda proporcional. Dessa forma, a potência de saída é automaticamente aumentada ou diminuída para devolver a temperatura do processo ao ponto de ajuste, reduzindo ou até mesmo eliminando o erro em estado estacionário. A taxa, função ou ação derivativa fornece ao controlador a capacidade de alterar a banda proporcional para compensar uma temperatura em rápida variação, podendo tornar o sistema mais rápido e ainda reduzir o sobressinal.

O ciclo de aquecimento volumétrico é determinado por

$$S_h = \alpha_{PID} \frac{P_f}{V_h}, \quad (6)$$

onde S_h corresponde ao ciclo de aquecimento (Wm^{-3}), α_{PID} é o coeficiente no qual está presente as sub-rotinas de controle de temperatura PID, P_f corresponde à potência do forno (W) e V_h o volume do forno sujeito ao aquecimento (m^3). A quantidade de deslocamento é proporcional à taxa de variação de temperatura. Com ajustes do controle PID é possível diminuir o tempo de passagem da resposta transitória para a estacionária. Isto é fundamental para a otimização dos sistemas. Dessa forma, o controlador PID tem por objetivo reduzir o tempo de subida, reduzir o *overshoot* ou sobressinal, minimizar o tempo necessário para que o forno atinja a temperatura desejada e minimizar o erro em estado estacionário do sistema. Em muitos casos os controles Proporcional e Integrativos são suficientes para o controle da resposta do sistema, neste caso o controlador é denominado simplesmente de PI. Segundo Purushothaman (2006), quando o sensor de temperatura de um forno é suscetível a outras interferências

elétricas, a ação derivativa pode causar uma forte oscilação na potência do sistema.

Para Ogata (2010), mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente empregam esquemas de controle PID ou PID modificado. Nos sistemas de controle em malha fechada, onde a variável de saída precisa ser controlada dentro de um determinado parâmetro e precisão, a ação de controle PID é largamente empregada nos sistemas lineares. O controle Proporcional, Integrativo e Derivativo é baseado no controle do erro presente (P), passado (I) e futuro (D). Porém, o ponto mais importante está na determinação dos parâmetros do controlador, pois são estes que ditarão as especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema.

Segundo Dorf e Bishop (2013) para os ajustes do PID existem muitos métodos disponíveis para valores aceitáveis dos ganhos. O processo de determinação dos ganhos ideais do PID é frequentemente chamado de sintonia de PID. Muitas vezes esses ganhos são obtidos de modo empírico por tentativas e erros usando respostas ao degrau obtidas via simulação, ou em muitos casos, diretamente por testes reais no sistema. O primeiro processo analítico utilizado para a sintonia do controlador foi balizado pelas regras de Ziegler e Nichols (1942), ou seja, inicialmente foi utilizado esta proposta para o cálculo dos valores de ganho proporcional K_p , do tempo integrativo T_i e do tempo derivativo T_d baseadas na característica da resposta temporal do sistema. Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols (ZIEGLER; NICHOLS, 1942). No primeiro, a resposta a uma entrada em degrau unitário é obtida experimentalmente (Figura 4). Este método se aplica quando a curva de resposta tiver o aspecto de um "S", que pode ser caracterizada por duas constantes, L e T . Estas são determinadas traçando-se uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva e estendendo-se do eixo das abcissas (tempo) até o valor das ordenadas onde ocorre o estado estacionário $c_{(t)} = K$ (Figura 5). Neste

método os valores proporcional (K_p), integrativo (T_i) e derivativo (T_d) são obtidos através das fórmulas com os valores de L e T (Quadro 1).

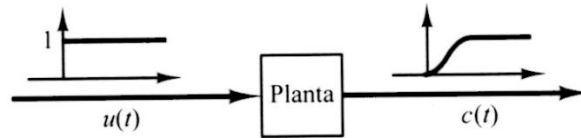


Figura 4 Resposta $c(t)$ ao degrau unitário $u(t)$
Fonte: Ogata (2010)

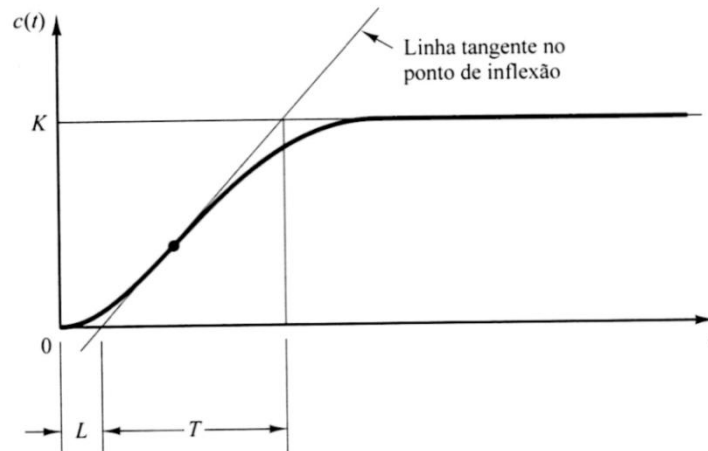


Figura 5 Tangente no ponto de inflexão da curva
Fonte: Ogata (2010)

Quadro 1 Cálculo dos ganhos do controlador a partir dos valores T e L
Fonte: Adaptado Ogata (2010)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

No segundo método varia-se, através de simulações, somente os valores de K_p (Figura 6), até que a saída exiba uma oscilação sustentada ou constante (caso não se obtenha esta constância no sinal, então este método não se aplica), isto significa que o ganho atingiu o seu ponto crítico ou valor crítico K_{cr} e o período que sustenta esta oscilação constante é o período crítico P_{cr} (Figura 7). Neste método os valores proporcional (K_p), integrativo (T_i) e derivativo (T_d) são obtidos através das fórmulas com os valores de K_{cr} e P_{cr} (Quadro 2).

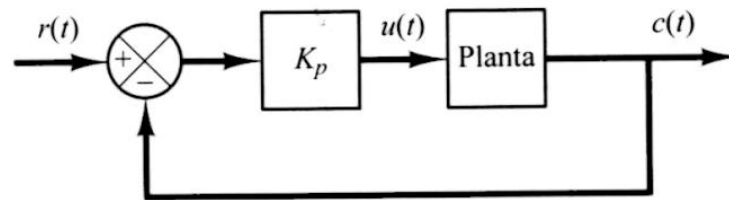


Figura 6 Simulação com variação do ganho K_p
Fonte: Ogata (2010)

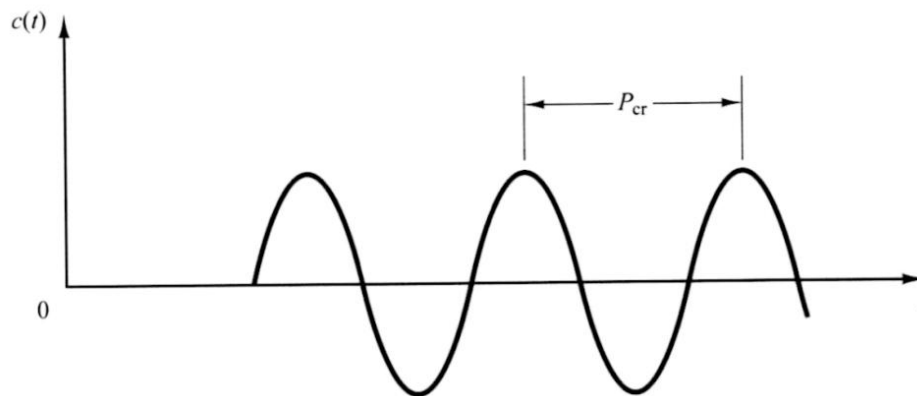


Figura 7 Oscilação constante ($K_p=K_{cr}$) e período crítico P_{cr}
Fonte: Ogata (2010)

Quadro 2 Cálculo a partir dos valores K_{cr} e P_{cr}
 Fonte: Adaptado Ogata (2010)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 K_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Como citado anteriormente existem vários métodos de sintonia PID. Estes ajustes na maioria das vezes são aproximativos e podem ser otimizados na manipulação fina dos valores até a obtenção de uma resposta otimizada.

Segundo Ogata (2010) antes de alcançar o estado estacionário ou permanente, a resposta transitória de um sistema apresenta, frequentemente, oscilações amortecidas. Já que a maioria dos sistemas de controle é no domínio do tempo, então estes devem apresentar respostas temporais aceitáveis, ou seja, é desejável que a resposta transitória seja suficientemente rápida e amortecida. Através das ações de controle é possível modificar a resposta transitória de modo a alcançar o regime permanente ou estacionário mais rapidamente com um amortecimento significativo que implica em um mínimo de sobressinal. Para Dorf e Bishop (2013) um sistema de controle com realimentação é valioso porque dá ao engenheiro a capacidade de ajustar a resposta transitória, assim, o efeito de perturbações pode ser reduzido significativamente, o que na prática, representa um sistema mais confiável e eficiente.

Para que um sistema dinâmico seja controlado de maneira automatizada, as ações de controle são normalmente executadas por um computador digital, podendo ser utilizada uma plataforma que possui um microcontrolador inserido e respectivas portas de entrada e saída onde são conectados sensores e atuadores para os sinais de entrada e saída. Este conjunto forma um sistema, que pode ser

embarcado. Segundo Wilmshurst (2009), um sistema embarcado é um sistema cuja principal função não é computacional, mas ser controlado por um computador embutido nele, ou seja, funciona com uma central de controle computadorizada e independente, acoplado diretamente ao sistema que se quer controlar.

Segundo Capelli (2008), o sistema de controle em malha fechada com ações PID é capaz de verificar o erro comparando o valor desejado com o valor da variável de controle, transmitida a partir dos transdutores de temperatura e fazer a imediata correção, variando a tensão ou através da Modulação da Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM). A modulação PWM pode ser considerada como uma técnica para controle de circuitos analógicos utilizando a saída digital de um microcontrolador, ou seja, é um artifício para reproduzir níveis de sinais analógicos digitalmente. Astrom e Hagglund (2001) descrevem o atual uso das ações de controle PID e que, apesar da dificuldade de sua aplicação em sistemas não lineares, ainda é uma ferramenta importante e que, pela sua facilidade e custo de operação, podem ser utilizados em um largo campo de operações de controle em sistemas lineares, principalmente em sistemas embarcados. Homberg e Weiss (2006) utilizaram as ações de controle PID na têmpera superficial de materiais. Através deste princípio é possível determinar, em pontos diferentes de uma peça, a dureza superficial e a profundidade desta dureza (dentro dos limites impostos pelo sistema e material de aplicação). Zhao et al. (2013) apresentam melhorias nas propriedades mecânicas através do efetivo controle no tratamento térmico, em aços de baixo carbono regulando de modo preciso as curvas de aquecimento por meio de um controlador. Bellmann et al. (2013) aplicaram um algoritmo PID para a simulação do controle de um forno por indução cuja a correta cristalização do material de prova era fator crítico. Larin et al. (2014) utilizaram as técnicas de controle para analisar o comportamento dos materiais nos diversos regimes de

aquecimento obtendo resultados satisfatórios e indicando a curva otimizada para alguns materiais.

Gnann et al. (2014) utilizaram um controlador PID comercial, da empresa Novus[®], modelo N1100, para o controle da temperatura de um forno de têmpera segundo normas NBR NM 136/00 (ABNT, 2000). Foi utilizado para o sensoriamento da temperatura um termorresistor PT110, tipo S. A curva de aquecimento foi programada linearmente (rampas) e com patamares (períodos de temperatura constante) e o controlador e as demais variáveis do sistema foram configurados no modelo tradicional de tratamento térmico, ou seja, ocorrendo a interferência humana para os períodos de permanência e temperatura. Segundo Dorf e Bishop (2013), a capacidade de ajustar o desempenho da resposta transitória e em regime permanente é uma vantagem nítida de sistemas de controle em malha fechada. As especificações de projeto para sistemas de controle normalmente incluem vários índices de resposta no tempo para um comando de entrada específico, bem como uma exatidão desejada em regime permanente. Para Dorf e Bishop (2013), um índice de desempenho é uma medida quantitativa e relativa do desempenho de um sistema e é escolhido de modo que ênfase seja dada às especificações importantes dos sistemas. Um sistema é considerado ótimo quando os parâmetros são ajustados de modo que o índice alcance um extremo, geralmente um valor mínimo. A Integral do erro ao quadrado multiplicado pelo tempo, do inglês *Integral of Time multiplied by the Square Error* (ITSE), é considerado um índice de desempenho apropriado e, este, dentre os índices, é o que possui maior seletividade na identificação dos parâmetros do controlador PID, pois o valor mínimo da integral é prontamente discernível ao serem variados os parâmetros do sistema, tal índice é definido pela Equação 7.

$$ITSE = \int_0^T te^2(t) dt. \quad (7)$$

Zambaldi, Barbosa e Magalhães (2015) compararam duas técnicas de controle: liga/desliga (*ON/OFF*) e PID, para um sistema térmico composto por um ferro de solda, assim como a análise de custo e benefício entre as duas técnicas. Concluíram que, a implementação do controle liga/desliga é bastante simples e econômica, porém é necessário criar uma histerese no sistema para minimizar as oscilações presentes na saída do processo, o que nem sempre é possível. Além disto, a ação de controle liga/desliga não garante precisão no controle e pode apresentar grandes desvios (*offsets*) em relação ao *setpoint*, o que na prática, determina um consumo maior de energia. Pelo contrário, os controladores PID possuem a capacidade de autoajuste, corrigindo alterações nos parâmetros do sistema e distúrbios externos, como mudanças no ambiente. A análise dos índices de desempenho ITSE demonstrou um desvio muito menor para o controlador PID (ITSE (liga/desliga) = $7,5098 \cdot 10^5$ e ITSE (PID) = $4,4791 \cdot 10^3$), mantendo valores muito próximos do *setpoint* e com oscilações mínimas na saída do processo. Esta maior precisão de controle torna o sistema mais estável e eficaz. Portanto, a maior vantagem do controle PID é a capacidade de ajustar o desempenho da resposta transitória e em regime permanente, diminuindo o tempo para a estabilização do sistema.

A diferença de custo para a implementação do controle PID, em contraste com o controle liga/desliga, tem diminuído cada vez mais conforme a diminuição dos custos dos componentes eletrônicos e a evolução dos sistemas informáticos, o que aumenta a vantagem do controlador PID sobre o liga/desliga e justificando-o, devido a economia de energia, em sistemas de aquecimento. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos por Zambaldi, Barbosa e Magalhães (2015), a reta (azul ou linha contínua) representa os valores desejados, a linha vermelha (linha pontilhada), que segue próxima ao *setpoint*, os valores com a ação de controle PID e a linha verde (linha tracejada) com a ação de controle liga/desliga.

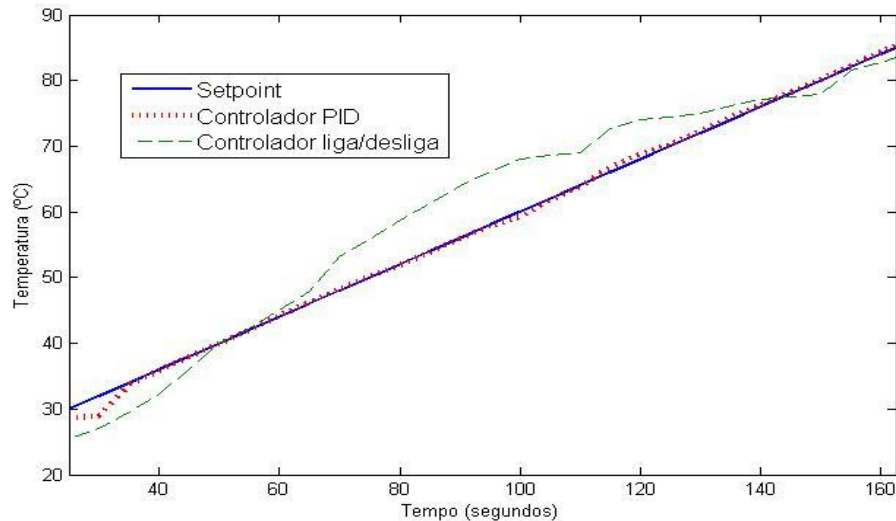


Figura 8 Comparação dos controladores de temperatura liga/desliga e PID
 Fonte: Zambaldi, Barbosa e Magalhães (2015)

3.2.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma tecnológica com *hardware* e *software* livres ou *open source*. Foi desenvolvido em 2005 através de um projeto cujo objetivo era criar um dispositivo com a filosofia *physical computing*, para fins educativos. O crescimento do seu uso se explica por ser uma solução de baixo custo em comparação com outras placas similares existentes no mercado, a criação de projetos é muito simples devido a vasta informação encontrada na internet, é um sistema multiplataforma (capacidade denominada *cross-platform*) e podem ser desenvolvidos projetos nas áreas de automação, robótica e eletrônica. Segundo McRoberts (2015) a maior vantagem do Arduino é a facilidade de sua utilização; pessoas que não são da área técnica podem, rapidamente, aprender o básico e criar os seus próprios projetos. A versão mais popular deste microcontrolador é o Arduino UNO (Figura 9), mas existem outras

versões específicas para cada tipo de projeto, como: Nano, Mini, Bluetooth, LilyPad e Mega 2560.



Figura 9 Arduino modelo UNO
Fonte: Adaptado McRoberts (2015)

Basicamente o Arduino é constituído pelo microcontrolador ATMEGA 328 da ATMEL[®], este possui 14 pinos I/O digitais, 6 entradas analógicas, um oscilador de 16 MHz (a cristal), uma conexão USB, um jaque de alimentação, um header ICSP, e um botão de reset. Todos os pinos digitais e os analógicos possuem mais de uma função. Os pinos podem ser de entrada ou de saída, alguns podem servir para leituras analógicas e também como entrada digital. Existem pinos do Arduino que possuem características especiais, que podem ser usadas efetuando as configurações adequadas através da programação, são eles: PWM (Pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11), que é tratado como saída analógica, na verdade é uma saída digital que gera um sinal alternado (0 e 1) onde o tempo que o pino fica em nível 1 (ligado) é controlado. É usado para controlar velocidade de motores, ou gerar tensões com valores controlados pelo programa. Na Porta Serial USART

utiliza-se um pino para transmitir e um pino para receber dados no formato serial assíncrono (USART). Se pode conectar um módulo de transmissão de dados via *bluetooth* por exemplo e se comunicar com o Arduino remotamente. O pino 0 (rx) recebe dados e o pino 1 (tx) envia dados. Como comparador analógico estão disponíveis os pinos 6 e 7. Pode-se usar dois pinos para comparar duas tensões externas, sem precisar fazer um programa que leia essas tensões e as compare. Essa é uma forma muito rápida de comparar tensões e é feita pelo hardware sem envolver programação. Os Pinos 2 e 3 podem ser utilizados para a interrupção externa, onde pode-se programar um pino para avisar o software sobre alguma mudança em seu estado. Pode-se ligar um botão a esse pino, por exemplo, e cada vez que alguém pressiona esse botão o programa rodando dentro da placa é desviado para um bloco escolhido previamente pelo programa. A porta SPI é um padrão de comunicação serial Síncrono, bem mais rápido que a USART. É nessa porta que se conecta cartões de memória e muitos outros suportes de memória. Além disso, existem uma série de componentes já prontos que podem ser conectados ao Arduino e possuem funções específicas, são os *shields*. Para McRoberts (2015), os *shields* (escudos) são placas de circuitos contendo outros dispositivos (por exemplo: receptores GPS, *displays* de LCD, módulos de Ethernet etc.), que são conectados ao Arduino para obter funcionalidades adicionais, estendendo os pinos do Arduino sobre suas placas para que não se perca o acesso aos mesmos.

As funções são escolhidas pelo programador, quando escreve um programa para a sua placa. Este programa é desenvolvido em linguagem C, através de uma interface gráfica, conhecida como IDE, construída em Java. O programa IDE é muito simples de se utilizar e pode ser estendido com bibliotecas que podem ser facilmente encontradas. As funções da IDE do Arduino são basicamente duas: permitir o desenvolvimento de um software e enviá-lo à placa para que possa ser executado.

A função PWM talvez seja a função mais importante do Arduino no que se refere a parte de controle. Para Wilmshurst (2009) é uma técnica para se obter resultados analógicos com meios digitais. O controle digital é usado para criar uma onda quadrada, um sinal alternado entre ligado e desligado. Assim a técnica consiste em manipular a razão cíclica de um sinal, o *duty cycle* a fim de transportar informação ou controlar a potência de algum outro circuito. Com isso, se tem um sinal digital que oscila entre 0 V e 5 V com determinada frequência (o Arduino trabalha com um padrão próximo a 500 Hz). O *duty cycle* é a razão do tempo em que o sinal permanece em 5 V sobre o tempo total de oscilação. Portanto, o que se controla através do *software* é justamente o *duty cycle*, ou seja, o percentual de tempo em que o sinal fica em 5 V. Dessa forma, é possível utilizar essa técnica para limitar a potência de um circuito, como por exemplo, em um forno elétrico, quando a saída digital PWM se conecta a uma entrada de controle de um relé de estado sólido. Conforme ocorre a oscilação da tensão de controle (*duty cycle*), imediatamente ocorre a abertura ou fechamento do circuito, que passa pelos terminais de carga do relé de estado sólido e, conseqüentemente, ocorre o controle da potência média fornecida aos resistores do forno.

3.2.2 Sensores de temperatura

Verifica-se que todas as características físico-químicas de qualquer substância alteram-se de forma bem definida com a temperatura. Assim sendo, uma determinada substância pode ter suas dimensões, seu estado físico (sólido, líquido, gasoso), sua densidade, sua condutividade, alterados pela mudança conveniente de seu estado térmico. Então, qualquer que seja o tipo de processo, a temperatura afeta diretamente o seu comportamento provocando, por exemplo:

- a) ritmo maior ou menor na produção;
- b) mudança na qualidade do produto;
- c) aumento ou diminuição na segurança do equipamento e/ou do pessoal;
- d) maior ou menor consumo de energia e, por conseguinte, um maior ou menor custo de produção.

Todos os instrumentos de medição sofrem influência da temperatura (inclusive aqueles eletrônicos), por isso a temperatura ambiente padrão de calibração e medição é de 20 °C e os ambientes laboratoriais controlados, entre 20 °C e 23 °C.

Segundo Tipler e Mosca (2009), a energia térmica de um corpo é a somatória das energias cinéticas dos seus átomos, e além de depender da temperatura, depende também da massa e do tipo de substância. O calor é a energia que se transfere de um corpo para o outro por diferença de temperatura. Portanto, a temperatura não é uma medida de calor, mas a diferença de temperaturas que é a responsável pela transferência da energia térmica na forma de calor entre dois ou mais sistemas. Esta transferência de calor pode ocorrer de três maneiras: por condução, convecção e irradiação.

São seis os tipos de sensores mais utilizados: termopares, dispositivos de temperatura por resistência (RTD e termistores), radiadores de infravermelho, dispositivos bimetalicos, dispositivos de expansão de fluídos e dispositivos de mudança de estado.

Para Omega Engineering do Brasil (2014), a principal preocupação ao se medir temperatura é garantir que o dispositivo de medição não crie um distúrbio substancial no meio que está sendo medido. Isto é especialmente importante com medição de temperaturas por contato. Por isso, se deve considerar alguns critérios para a escolha adequada de tamanho, encapsulamento e configuração de fios do sensor.

Segundo Balbinot e Brusamarello (2010), em fornos elétricos para tratamentos térmicos, os sensores de temperatura mais utilizados são os termopares, por apresentarem boa resistência mecânica a altas temperaturas. Este sensor é formado por dois fios de metal distintos unidos em uma ponta e conectados a um medidor. Alterações de temperatura nesta junção induzem uma mudança na força eletromotriz (FEM) entre as extremidades. Na medida que a temperatura na junção aumenta, a força eletromotriz de saída do termopar também aumenta, embora não necessariamente de modo linear. Este princípio foi descoberto em 1821 por Thomas Seebeck que observou uma corrente contínua fluindo pelo circuito termoeletrico quando dois fios compostos por metais diferentes são unidos pela extremidade e uma delas é aquecida, no que hoje se conhece por efeito Seebeck ou tensão Seebeck. Com isso, dependendo dos materiais de cada fio, o que dá a classe do termopar, existe uma aplicação devido a amplitude da temperatura a ser medida e uma função que faz a conversão de tensão em temperatura. O termopar classe ou tipo K, por exemplo, é formado pelos metais Níquel-cromo (Cromel) e Níquel-alumínio (Alumel) e foi escolhido para este projeto por apresentar um intervalo máximo de temperatura entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ e limite de erro em torno de $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para Cohn (2006), a proteção da junção de alguns termopares, geralmente fabricados com liga aço-cromo, exerce grande influência sobre o tempo de resposta, devido à massa e à condutividade térmica da mesma e à resistividade térmica de contato entre o sensor e a proteção. Apesar dos termopares operarem com tensões da ordem de mV, sua baixa impedância torna os circuitos pouco sensíveis à interferências.

3.2.3 Relé de Estado Sólido (RES)

Segundo Omega Engineering do Brasil (2014), um relé de estado sólido (RES) é um dispositivo de controle liga/desliga no qual a corrente de carga é conduzida por um ou mais semicondutores, ou seja, este dispositivo é capaz de completar ou interromper um circuito eletricamente sem nenhuma peça em movimento. Ao contrário do relé mecânico, que completa ou interrompe um circuito conectando fisicamente os contatos elétricos. Neste caso, é possível aplicar frequências mais altas de comutação sem a preocupação da diminuição da vida útil causada pelo desgaste dos componentes mecânicos. Como todos os relés, o RES exige uma potência relativamente baixa do circuito de controle para alterar o seu estado. Uma vez que essa potência de controle é muito menor que a potência de saída controlável pelo relé em plena carga, o "ganho de potência" em um RES é significativo e normalmente muito maior que em um relé eletromagnético (mecânico) de saída nominal comparável.

Os relés de estado sólido fotoacoplados (Figura 10) são aqueles em que o sinal de controle é aplicado a uma fonte de luz ou infravermelha (normalmente, um diodo emissor de luz - LED), e a radiação dessa fonte é detectada em um semicondutor fotossensível (tal como um diodo, transistor ou tiristor fotossensível). A saída do dispositivo fotossensível é utilizada para acionar (comutar) o TRIAC ou os SCRs que alternam a corrente da carga. Sendo a ligação entre a entrada e a saída promovida por um feixe de luz ou radiação infravermelha, o isolamento elétrico é excelente, evitando-se portanto, interferências das altas cargas que passam pela saída com o circuito de controle, que emite as baixas cargas de comando e são bem mais sensíveis.

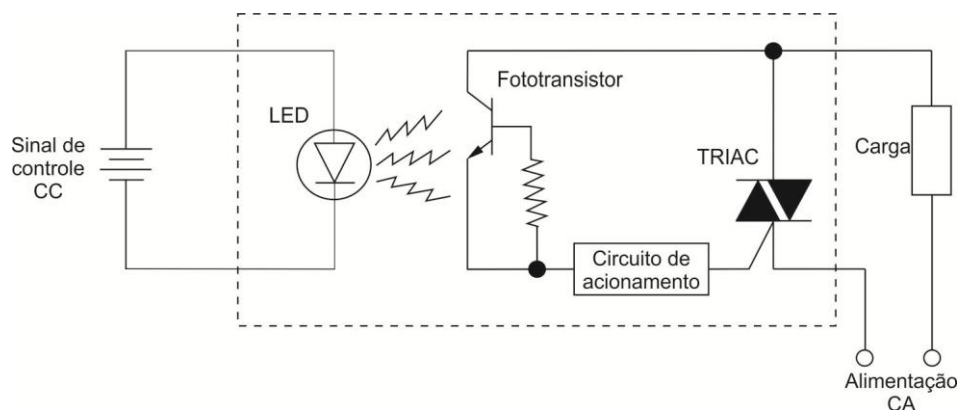


Figura 10 Diagrama de um relé de estado sólido fotoacoplado

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para o atendimento aos objetivos propostos, o desenvolvimento deste projeto foi dividido em cinco etapas: instrumentação do forno, modelagem do sistema, sintonia de controladores, protótipo do sistema de controle e ensaio dos corpos de prova; as quais estão detalhadas a seguir:

4.1 Instrumentação do forno

O projeto teve como ponto de partida a análise da instrumentação em um forno com tensão de alimentação de 110 V, potência 800 W (Figura 11), pertencente ao Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), o qual foi modelado e utilizado nos ensaios de tratamento térmico nos corpos de prova. Este forno elétrico é aquecido por meio de 4 resistores interconectados do tipo mola. Cada resistor possui aproximadamente 40 cm de comprimento e é formado por fio de liga Ni-Cr, com 0,7 mm de diâmetro. Este fio é enrolado com um diâmetro interno de 4,4 mm em um total de aproximadamente 150 espiras. Estes resistores estão dispostos no

forno, aos pares, nas duas laterais. O forno possui um sensor termopar do tipo K, que se encontra no seu interior para a medição da temperatura, cujas dimensões da câmara são de 80 mm de altura por 80 mm de largura e 100 mm de profundidade.



Figura 11 Forno utilizado no projeto

A partir de um diagrama teórico (Figura 12) foram definidos os requisitos do sistema e as variáveis de entrada e saída para o controle do sistema.

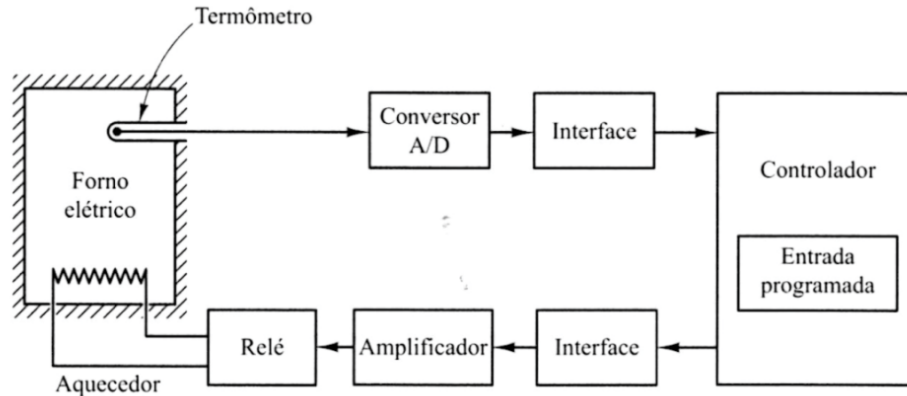


Figura 12 Diagrama de um sistema controle de temperatura em fornos
 Fonte: Ogata (2010)

4.2 Modelagem do sistema

Para a obtenção de um modelo matemático que seja capaz de representar o sistema dinâmico, é importante conciliar a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados da análise. Neste caso, para um modelo matemático relativamente simplificado, geralmente algumas propriedades físicas do sistema e certas não linearidades são ignoradas. O sistema foi considerado linear e invariante no tempo com erro máximo admissível de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a temperatura medida e aquela referenciada.

O primeiro passo para o controle de um sistema é a identificação do mesmo por uma função transferência ($G(s)$), considerando o sistema linear e invariante no tempo (LIT). O mesmo sistema de controle proposto neste projeto foi utilizado para a coleta dos dados. Este foi conectado ao termopar do forno e programado para obter amostras de temperatura, a cada segundo, e registrá-las na memória de um computador. O aquecimento do forno ocorreu em regime máximo de operação (sistema em malha aberta com degrau de acionamento em

1, o que significa 100%) até atingir o regime permanente de operação, e logo após foi desligado (acionamento em 0) e registrados os valores das temperaturas, em função do tempo, durante o resfriamento natural do forno até a temperatura ambiente. Os valores registrados no computador foram inseridos em um *software* matemático (Matlab™), o qual utiliza a função "ident", contida na seção de ferramentas (*toolbox*), para o levantamento da função transferência; sendo o sistema devidamente caracterizado e identificado.

4.3 Sintonia de controladores

Com a função de transferência conhecida, foi realizada a aproximação dos ajustes de sintonização PID com o auxílio do aplicativo de simulação, *Simulink* do Matlab™ e utilizando o segundo método Ziegler-Nichols (ZIEGLER; NICHOLS, 1942). Neste caso, foi criado um diagrama de blocos, conforme o modelo da Figura 13 utilizado para simulação do sistema. Para obter o valor do ganho crítico K_{cr} , repetiu-se várias simulações com valores de ganho (K_p) diferentes e de modo empírico, até o osciloscópio do simulador apresentar oscilações constantes, ou seja, amplitudes e períodos de ondas constantes (Figura 7). Neste ponto, foi possível medir o período crítico, P_{cr} . O atraso de transporte ou tempo morto é o tempo transcorrido entre o aparecimento do distúrbio e o início da resposta do sistema de controle (COHN, 2006).

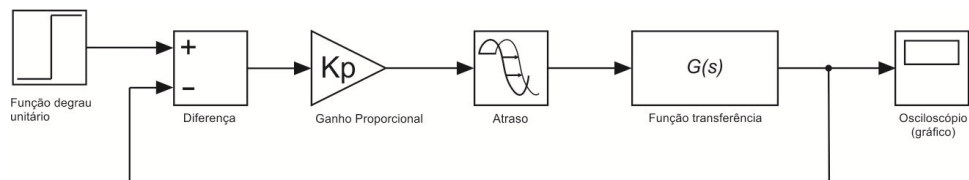


Figura 13 Diagrama de blocos usado nas simulações para obter K_{cr}

Com os valores de K_{cr} e P_{cr} tabulados (Quadro 2) foram calculados os coeficientes aproximados PID, sendo construído novo diagrama de blocos, conforme modelo da Figura 14, no simulador, e estes afinados até a otimização da resposta. A saturação está relacionada aos limites do sistema, pois este possui uma potência finita.

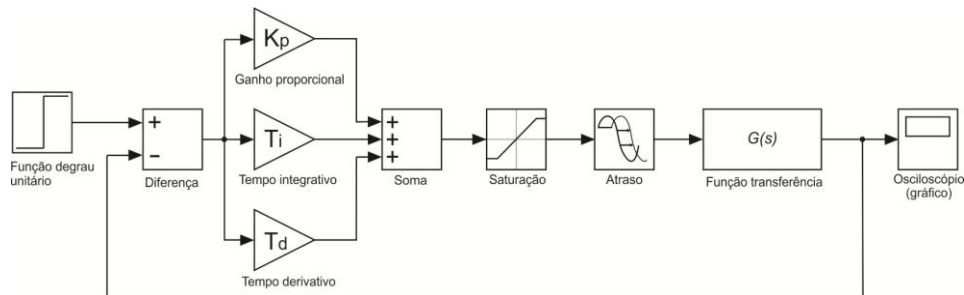


Figura 14 Diagrama de blocos usado para afinar os valores PID

4.4 Protótipo do sistema de controle

Para controlar o sistema foi desenvolvido um protótipo. Para isto foi utilizada a plataforma Arduino modelo UNO. Nesta etapa, o sensor de temperatura foi conectado à entrada analógica do Arduino, o qual foi programado para controlar a temperatura do forno, corrigindo os erros encontrados na diferença entre a leitura obtida pelo sensor e comparada com os valores de referência ou *setpoints* de um ciclo de aquecimento previamente programado (Figura 15). A correção do erro foi através de um algoritmo controlador PID inserido no mesmo programa do controlador, como uma biblioteca da plataforma. O acionamento do resistor do forno foi realizado utilizando a modulação PWM, implementado por meio da saída digital do módulo Arduino que, conectada a um Relé de Estado Sólido (modelo SSR240DC25), controla a variação da potência fornecida ao forno e, conseqüentemente, sua temperatura interna. A interface é realizada por meio de

um *display* de cristal liquido (LCD) com 6 teclas do tipo *push button*, que se encaixa e se conecta sobre o Arduino. Para a leitura da temperatura, por meio do termopar tipo K, foi utilizado o módulo de conversão analógico/digital MAX6675.

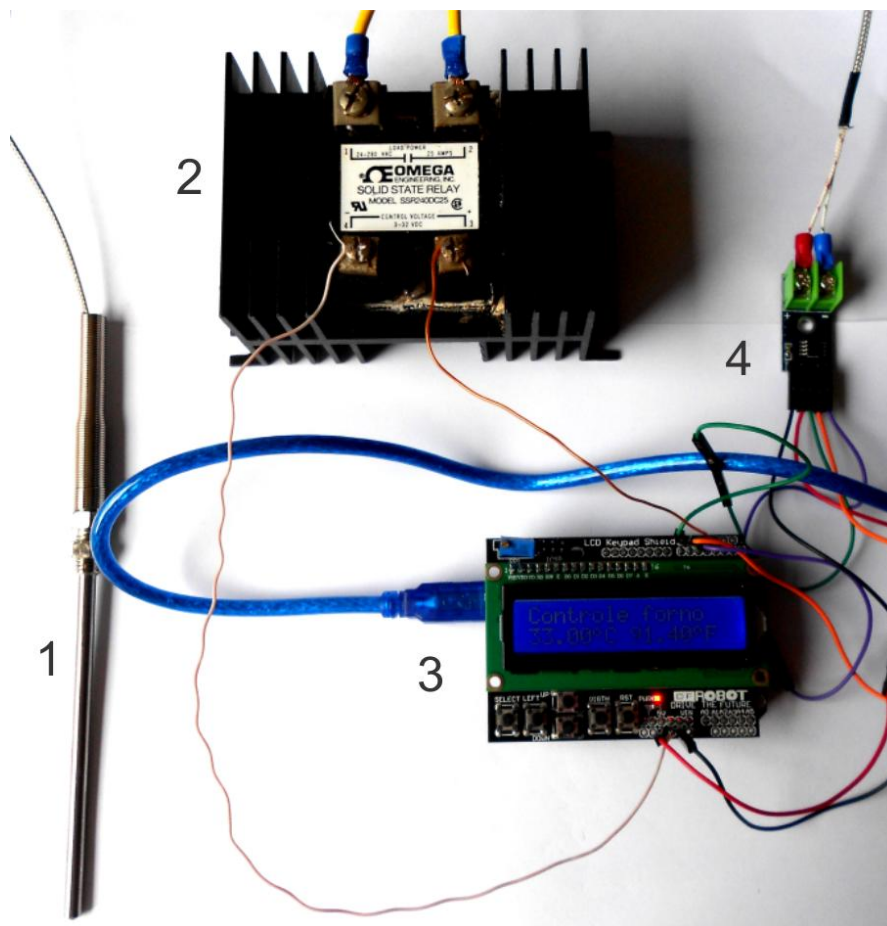


Figura 15 Protótipo do sistema de controle: (1) termopar, (2) relé de estado sólido, (3) Display LCD e Arduino, (4) módulo A/D

A leitura obtida pelo termopar tipo K (Figura 15, item1) é transferida ao módulo MAX6675 (Figura 15, item 4), que, através de um conversor analógico/digital (A/D), transforma a variação da tensão termoelétrica em

temperatura. O valor da temperatura é enviado para o microcontrolador (Figura 15, item 3), que compara o valor da leitura com o valor desejado no qual foi programado, em função do tempo (Figura 16). As correções são enviadas para uma porta PWM do microcontrolador, que atua na porta de controle do relé de estado sólido modelo SSR240DC25 (Figura 15, item 2), fazendo o controle da potência média fornecida aos resistores do forno através de uma fase, que parte da rede elétrica, passa pelo terminal de carga do relé e chega a uma tomada de tensão onde o forno é alimentado, e assim, controlando a temperatura interna do forno. As teclas do módulo poderão ser utilizadas futuramente para inserir informações como: tipo de tratamento ou temperatura máxima de aquecimento, tipo de material, espessura da peça e dureza final (na escala de dureza Rockwell C) ou temperatura de revenimento, por exemplo. Porém, para este protótipo as características do tratamento térmico foram enviadas diretamente ao controlador pelo computador, o qual estava conectado pela porta USB.



Figura 16 Detalhe do display LCD com o controle de temperatura

4.5 Ensaio dos corpos de prova

Para a validação do protótipo do sistema de controle foram efetuados os tratamentos térmicos de têmpera seguido de revenimento nos corpos de prova em aço D2 e D6 (Figura 17). As peças em D2 possuem seção circular com 13 mm de diâmetro e 15 mm de altura e as peças em D6, também com seção circular, possuem um diâmetro de 26 mm e com 15 mm de altura. O primeiro grupo de amostras (A e C) ou grupo de controle, foi submetido ao tratamento térmico de modo tradicional, sem o controle da temperatura, executado por um operador experiente no tratamento térmico para esses dois materiais. O segundo grupo de amostras (B e D) foi submetido ao tratamento térmico com o controlador PID do protótipo e seguindo o ciclo de aquecimento sugerido pelo fabricante do material. Todas as amostras foram identificadas para facilitar a sua distinção.



Figura 17 Corpos de prova dos materiais D6 e D2

O objetivo da têmpera é aumentar a dureza do aço, transformando a estrutura austenítica em martensítica, e consiste em elevar a temperatura do material acima da temperatura de austenização, permanecer no tempo necessário à homogeneização e resfriar bruscamente a amostra. O revenimento tem por objetivo o alívio de tensões originadas pelo tratamento de têmpera e o aumento da tenacidade. O revenimento é o que determina a dureza final da peça e consiste em elevar a temperatura do componente abaixo da linha de transformação e mantê-la pelo tempo necessário à homogeneização. Quanto maior a temperatura do revenimento, menor será a dureza final. O processo executado nas amostras de controle (grupos A e C) foi a reprodução do processo de têmpera, seguido de revenimento, que é realizado em empresas que possuem fornos sem controladores, ou seja, as temperaturas de têmpera (Figura 18) e revenimento (Figura 19) foram inferidas em função da cor do material, que varia com o calor.

Correlação da cor do aço aquecido com a temperatura (Têmpera)

Temperatura		Cor do aço aquecido
°F	°C	
752	400	Vermelho; visível no escuro
885	474	Vermelho; visível ao crepúsculo
975	525	Vermelho; visível à luz do dia
1077	581	Vermelho; visível à luz do sol
1292	700	Vermelho opaco
1472	800	Levemente vermelho cereja
1652	900	Vermelho cereja
1832	1000	Vermelho cereja brilhante
2012	1100	Vermelho alaranjado
2192	1200	Laranja amarelado
2372	1300	Branco
2552	1400	Branco brilhante
2732	1500	Branco ofuscante
2912	1600	Branco azulado

Figura 18 Relação entre a cor do aço e a sua temperatura de têmpera (tradução livre)
Fonte: Adaptado de Totten (2007)

Correlação da temperatura do revenido com a cor do aço aquecido

Temperatura permanência por 1 hora		Cor da oxidação	Temperatura permanência por 8 minutos	
°F	°C		°F	°C
370	188	Amarelo pálido	370	188
390	199	Palha claro	390	199
410	210	Palha escuro	410	210
430	221	Castanho	430	221
450	232	Púrpuro (roxo claro)	450	232
490	254	Azul escuro	490	254
510	265	Azul claro	510	265

Figura 19 Relação entre a cor do aço e a sua temperatura de revenimento (tradução livre)
Fonte: Adaptado de Totten (2007)

A têmpera das amostras em D2 foi efetuada a uma temperatura entre 1.000 °C e 1.080 °C (cor vermelho cereja brilhante da peça) e após 30 minutos de permanência nesta temperatura, para a homogeneização térmica das peças, estas foram retiradas do forno e mergulhadas em óleo. A têmpera das amostras em D6 foi efetuada a uma temperatura entre 900 °C e 980 °C (cor vermelho cereja da peça) e após 30 minutos de permanência nesta temperatura, as peças foram retiradas do forno e resfriadas em óleo. Para o revenimento, tanto as amostras em D2 quanto aquelas em D6 foram colocadas no forno, após resfriamento natural do mesmo, a uma temperatura de 350 °C ainda em queda. As peças foram retiradas quando atingiram a cor "palha escuro" (Figura 20).



Figura 20 Detalhe da cor do revenimento "palha escuro" (aproximadamente 300 °C)

O mesmo procedimento ocorreu no tratamento térmico dos corpos de prova do grupo B e D utilizando o protótipo do controlador, porém foi o sistema que determinou os ciclos de aquecimento, ou seja, a temperatura e o tempo para o final de cada processo.

Segundo informações da empresa Bohler do Brasil, fabricante dos aços D2 e D6, o tratamento térmico deveria seguir as temperaturas para a têmpera e o revenido conforme o Quadro 3. As amostras B e D foram aquecidas inicialmente até 550 °C e permaneceram nesta temperatura até a homogeneização térmica, que segue a proporção de 1 hora a cada polegada (25,4 mm) de espessura do material. Logo após, o aquecimento prosseguiu até a temperatura de austenização (têmpera) de cada material, 960 °C para as amostras em D6 (grupo B) e 1.030 °C para as amostras em D2 (grupo D), onde se mantiveram pelo mesmo período de homogeneização, sendo em seguida, mergulhadas em óleo.

Para o revenimento, aguardou-se o forno perder temperatura naturalmente até atingir 300 °C, as peças foram recolocadas no forno e com a temperatura controlada em 300 °C, ali permaneceram pelo período de homogeneização de 30 minutos. Os ciclos de aquecimento para cada tipo de amostra foram determinados considerando a capacidade máxima de aquecimento do forno, ou seja, uma função cuja equação é conhecida, com taxas de aquecimento pouco abaixo da curva de aquecimento do forno em regime máximo, sendo os períodos de homogeneização inseridos nesta curva, nas temperaturas indicadas pelo fabricante.

Quadro 3 Comparativo de nomenclatura e temperaturas de referência dos tratamentos térmicos

Fonte: Aços Bohler do Brasil (2015)

SAE/ABNT	Bohler	Recozimento	Normalização	Têmpera/Dureza	Dureza HRC depois do Revenimento			
					100°C	200°C	300°C	400°C
D2	K110	800-850°C	650-700°C	1030°C / 63-65HRC	63	61	59	58
D6	K107	800-850°C	650-700°C	960°C / 64-66HRC	65	63	61	60

Tanto a medição da dureza, por meio de um durômetro, quanto a análise metalográfica, por meio de um microscópio metalográfico, das amostras, nos diferentes tratamento térmicos, foram avaliados utilizando os instrumentos e o apoio técnico da empresa Ciclope Componentes Automotivos. Além disto, foi utilizado um registrador de qualidade de potência e energia, da empresa FLUKE®, modelo Fluke 430 II (Figura 21, item 3), para a comparação do consumo de energia entre os métodos (tradicional e com o sistema de controle).



Figura 21 Registros dos dados de tratamento térmico: (1) registrador de temperatura; (2) forno com termopar; (3) analisador de qualidade de energia e potência

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores registrados pelo computador referentes ao aquecimento do forno, obtidos em regime máximo de operação (sistema em malha aberta com degrau de acionamento em 1, o que significa 100%) até a entrada em regime permanente, que ocorreu a 1104 °C; e os valores do resfriamento natural com o forno desligado (acionamento em 0) até a temperatura ambiente, foram inseridos em um *software* matemático (Matlab™) originando a curva conforme Figura 22. Em resumo, o forno foi desligado após 5.591 segundos do início do aquecimento em um processo de coleta de dados, que durou no total 30.756 segundos.

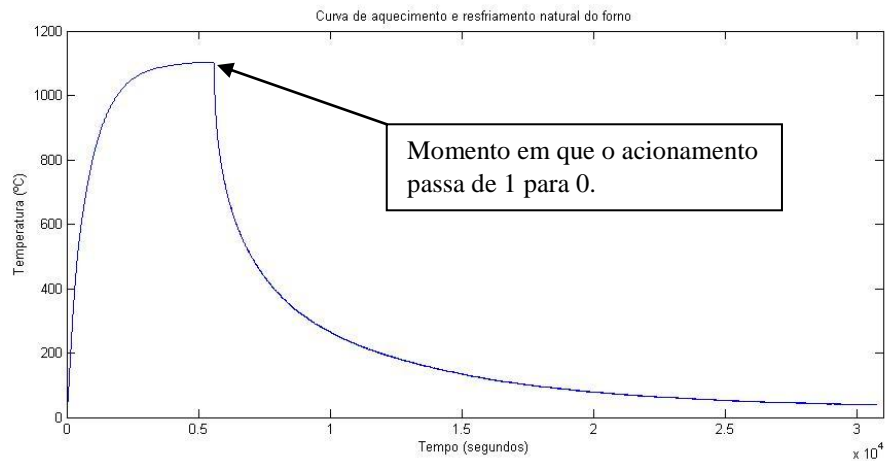


Figura 22 Curva gerada a partir dos dados obtidos

Para este projeto seria suficiente a função de transferência durante o acionamento em 1 (ligado) do forno, devido ao processo de têmpera ocorrer na fase de aquecimento e o processo de revenimento a uma temperatura constante, porém, para caracterizar o forno como um sistema térmico completo, toda a curva foi analisada.

Inicialmente, através do software matemático Matlab™, foi avaliada uma mesma função transferência para toda a curva, para isso foram analisadas as simulações com 1, 2 e 3 polos, conforme resultados apresentados na Figura 23.

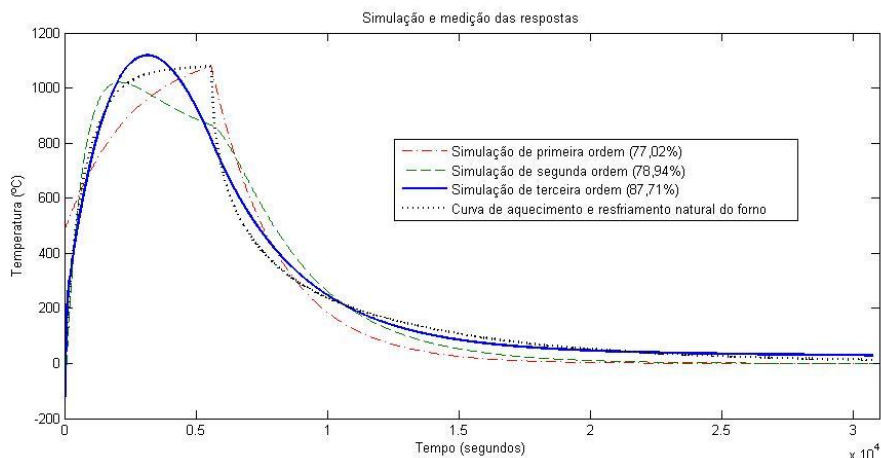


Figura 23 Simulação de toda a curva com respostas e percentuais de aproximação

Nesta simulação, a que mais se aproximou foi uma função transferência de terceira ordem com 87,71%. Não obstante, a curva foi dividida em duas partes, sendo a primeira a curva de aquecimento (Figura 24) e a segunda a curva de resfriamento (Figura 25), com o objetivo de se obter uma melhor aproximação por uma função transferência para o forno ligado e uma outra quando desligado.

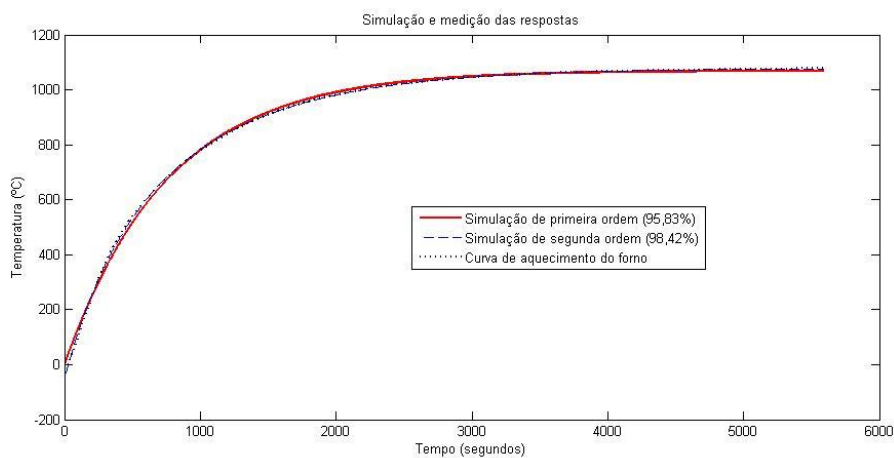


Figura 24 Simulação da curva de aquecimento com respostas e percentuais de aproximação

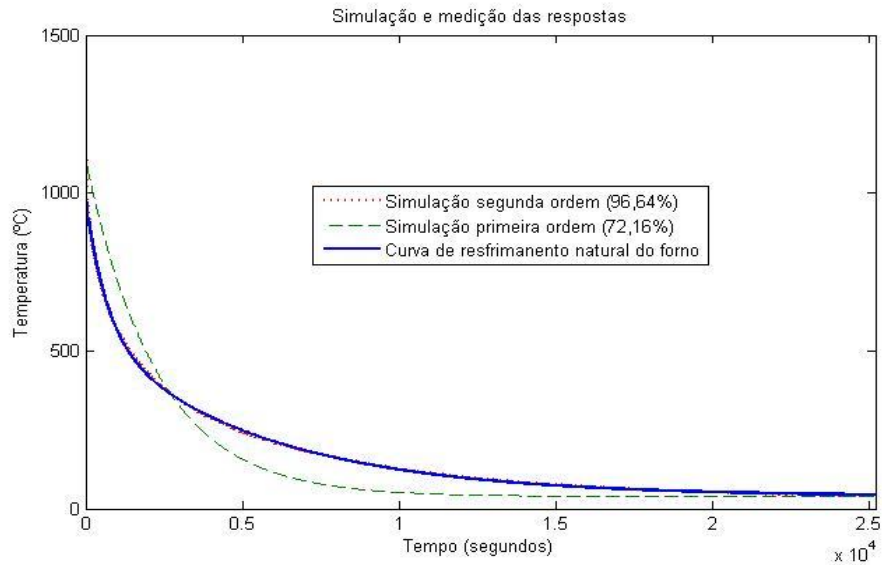


Figura 25 Simulação da curva de resfriamento com respostas e percentuais de aproximação

Para a curva de aquecimento (Figura 24) foi possível obter uma melhor resposta para a curva de aquecimento com uma função transferência de segunda ordem (98,42%). Porém um polo a mais torna o sistema mais complexo e não se justifica, pois a diferença na aproximação por uma função transferência de primeira ordem (95,83%) foi muito pequena. Além disso, a função assinala um atraso de 0,2 segundos. Portanto, a função transferência que melhor caracteriza a curva de aquecimento, considerando a relação simplicidade *versus* precisão, no seu período de acionamento em 1 foi definida por,

$$G(s) = \frac{1069,9}{765,6s+1} e^{-0,2s} . \quad (8)$$

Já para a curva de resfriamento (Figura 25), a melhor função seria a de segunda ordem com 96,64% de aproximação, sendo que a função em Laplace da resposta à entrada nula é definida por,

$$Y(s) = \frac{3,14 \cdot 10^6 (1143s+1)}{(5562s+1)(693s+1)} \quad (9)$$

Comparando a função transferência para o aquecimento do forno (Equação 8) com a função para o resfriamento do forno (Equação 9), percebe-se, pelas constantes de tempo, que o resfriamento é muito mais lento do que o aquecimento, o que já era esperado pela análise da curva da Figura 22.

Com a função transferência no período de aquecimento conhecida (Equação 8), foi realizada a aproximação dos coeficientes de ganhos do PID através do segundo método de Ziegler-Nichols, ou seja, através de simulações foram utilizados valores de ganho proporcional diferentes até a obtenção de oscilações constantes (valores iguais para amplitude e período da resposta transitória), conforme Figura 26. Esta estabilidade ocorreu com $K_{cr} = 11,26$ e $P_{cr} = 0,4$, obtendo-se assim os valores aproximados dos coeficientes PID (Quadro 4), que posteriormente foram otimizados através de simulações no aplicativo *Simulink* do Matlab™, apresentando resultados conforme Quadro 5. Estes resultados indicam que, para esse controlador de aquecimento uma ação derivativa não se faz necessária. Por isso, o sistema de controle é do tipo PI.

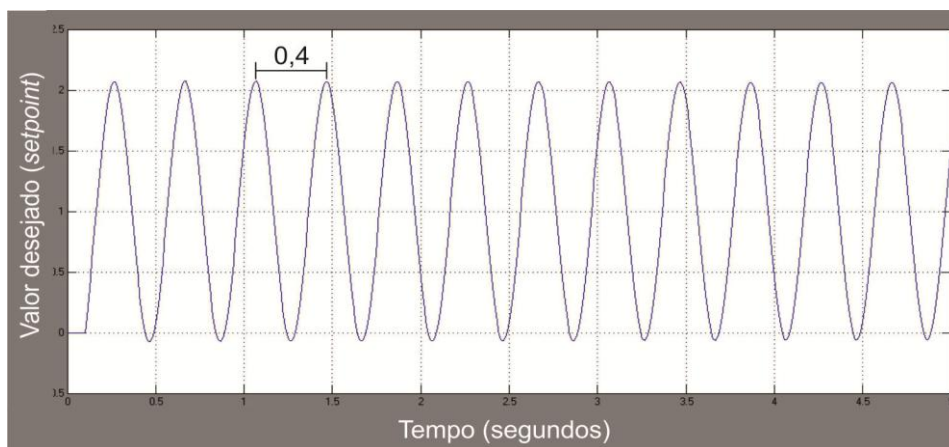


Figura 26 Simulação para $K_p = K_{cr} = 11,26$ e obtenção de $P_{cr} = 0,4$

Quadro 4 Valores PID calculados a partir dos valores encontrados para K_{cr} e P_{cr}

P (K_p)	I (T_i)	D (T_d)
5,07	0,33	0

Quadro 5 Valores PI obtidos após sintonia fina dos valores através de simulações

P (K_p)	I (T_i)	D (T_d)
4,66	0,21	0

Nos programas do controlador foram inseridos, além dos coeficientes do PI, os ciclos de aquecimento para cada material com as temperaturas de referência em função do tempo (segundos). Para validar o processo, as curvas de aquecimento foram programadas a partir de uma curva, cuja equação é conhecida. A curva utilizada foi baseada na Equação 10 no intervalo de tempo de 0 a 1.413 segundos, por esta apresentar características semelhantes a curva de aquecimento do forno em regime máximo de operação, onde foram acrescentados os patamares de temperatura constante para a homogeneização térmica (30 minutos) necessários ao processo de difusão e modificação da estrutura cristalina do material. Outro critério para a escolha da Equação 10 foi o fato desta curva apresentar taxas de aquecimento pouco abaixo da curva de aquecimento do forno em regime máximo, o que permite ao sistema reagir mais rapidamente a um distúrbio que cause uma baixa repentina na temperatura interna do forno; Este distúrbio ou perturbação poderia ser, como exemplo, a abertura indevida do forno durante o aquecimento, sendo definida por:

$$f(t) = 1221e^{-3,3*10^{-5}t} - 1044e^{-1,1*10^{-3}t}, \quad (10)$$

onde t corresponde ao tempo (segundos) e $f(t)$ corresponde à temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Esta opção foi adotada para demonstrar a capacidade de criar no sistema curvas a partir de qualquer função conhecida, não se limitando somente a funções lineares como ocorre nos controladores comerciais, que são programados através de rampas (funções lineares) e patamares (períodos de temperatura constante). Neste caso, seria possível através de testes encontrar as curvas ideais de aquecimento de cada material, considerando não somente as dimensões, mas as formas e a condutividade térmica de cada componente, evitando-se, inclusive, os períodos de temperatura constante para a homogeneização da temperatura externa com aquela interna dos componentes, ou seja, o forno seria capaz de transferir calor ao material na mesma taxa que o material seria capaz de absorver, por condução, até ao seu núcleo.

Deste modo, o ciclo de aquecimento para a têmpera do material em D6 foi programado conforme a Figura 27 e o ciclo de aquecimento para a têmpera do material em D2 de modo semelhante, sendo a temperatura final de têmpera de $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$. No caso do revenimento, o forno foi desligado e aguardou-se que este perdesse naturalmente calor até a temperatura de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a partir deste ponto o controlador manteve o forno nesta temperatura pelo mesmo período necessário à homogeneização térmica (30 minutos).

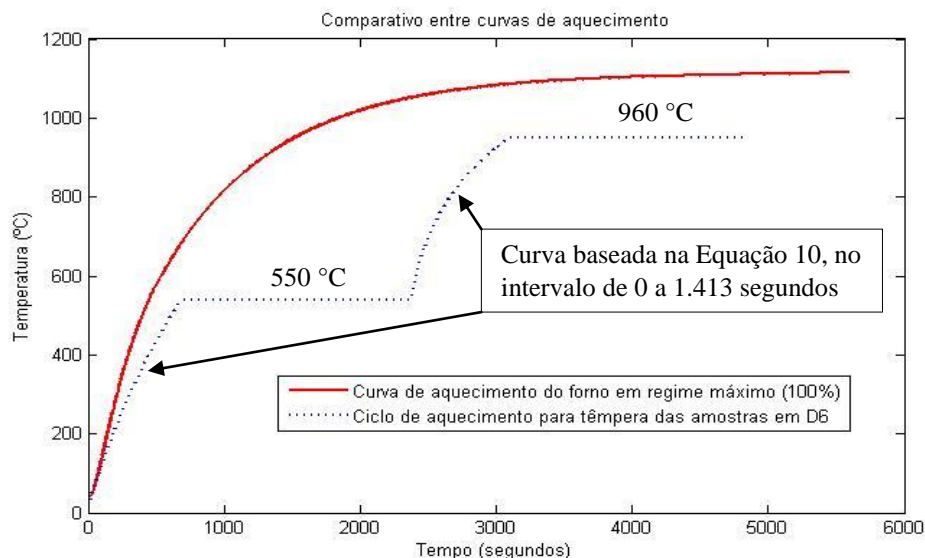


Figura 27 Curva de aquecimento do forno utilizada na têmpera das amostras em D6

O Quadro 6 apresenta os resultados de dureza das amostras, que foram tratadas termicamente pelos métodos tradicionais, executado por um profissional experiente, onde as temperaturas de têmpera foram estimadas visualmente, em função da cor do material. O Quadro 7 apresenta os resultados das amostras que foram tratadas termicamente com o controlador PI. Todos os valores foram obtidos por meio de durômetro devidamente calibrado. Os valores para a dureza nas amostras cujo o tratamento térmico foi controlado estão mais próximos do esperado do que das amostras onde foi aplicado o método tradicional.

Quadro 6 Resultados do tratamento térmico (têmpera e revenido) nas amostras submetidas ao método tradicional, em fornos sem o controle de temperatura

	Temperatura estimada		Dureza pós têmpera HRC		Dureza pós revenido HRC	
	Têmpera	Revenido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido
D2	1030°C	300°C	63-65	62	59	57
D6	960°C	300°C	64-66	65	61	60

Quadro 7 Resultados do tratamento térmico (têmpera e revenido) nas amostras submetidas no forno com o controlador PI

	Temperatura estimada		Dureza pós têmpera HRC		Dureza pós revenido HRC	
	Têmpera	Revenido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido
D2	1030°C	300°C	63-65	64	59	60
D6	960°C	300°C	64-66	65	61	61

A Figura 28 apresenta as alterações de dureza das amostras no tratamento térmico com o controlador PI. O material fornecido com uma dureza de 25 HRC, ou seja, macio suficiente para ser trabalhado e transformado mecanicamente por meio de máquinas ferramentas de usinagem, obteve, após o tratamento térmico de têmpera uma dureza de 64 HRC e 65 HRC para as amostras em D2 e D6, o que as tornam muito frágeis. Para aliviar as tensões do tratamento de têmpera, ajustar o tamanho dos grãos e aumentar a tenacidade, a têmpera foi seguida de revenido, o que baixou esta dureza para 60 HRC e 61 HRC respectivamente.

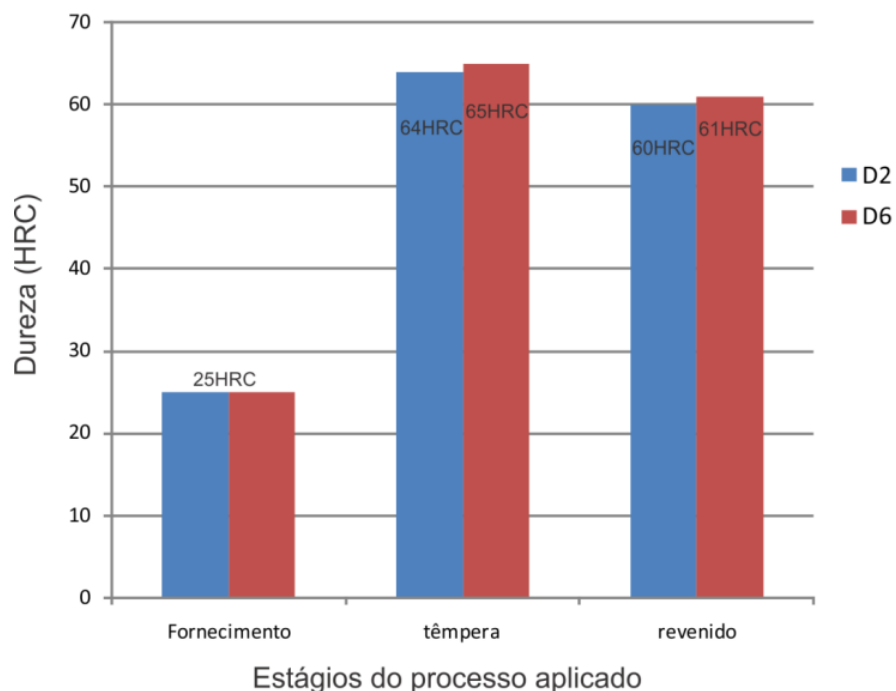


Figura 28 Resultados das durezas das amostras nas várias fases do processo de tratamento térmico, no qual foi utilizado o controlador PI

Através das análises metalográficas, algumas imagens foram obtidas. As amostras foram previamente preparadas, sequencialmente, com lixas de granulatura 200, 400 e 600; seguido de polimento com Alumina e ataque com Nital 10% durante 3 segundos. A Figura 29 destaca as imagens da amostra do material D6 submetido ao tratamento térmico tradicional, ou seja, sem o controle. A Figura 30 apresenta imagens da amostra do material D6 submetido ao tratamento térmico com o controle PI. Ambas imagens são apresentadas com aumento de 40x para as imagens coloridas e 400x para as imagens em preto e branco e foram obtidas através do programa de imagens Qualiview[®], conectado ao microscópio por meio de uma câmera digital. As imagens apresentam a estrutura esperada para o tratamento e o tipo de material, ou seja, a estrutura

martensítica (áreas escuras) se apresenta revenida (grãos ligeiramente arredondados) e com a dimensão média de grãos, normal. Na comparação das imagens, estas não demonstram consideráveis diferenças entre as amostras, mas percebe-se uma ligeira maior homogeneidade nas amostras onde foi utilizado o controle automatizado.

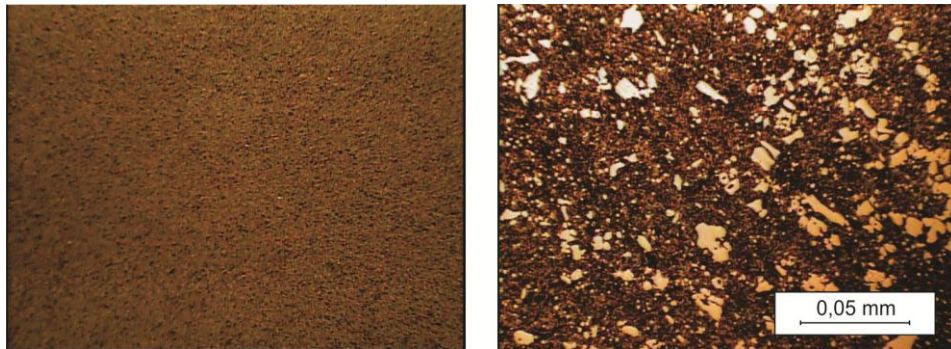


Figura 29 Análise metalográfica da amostra do material D6 submetida ao método tradicional de tratamento térmico (têmpera e revenido), em fornos sem o controle de temperatura

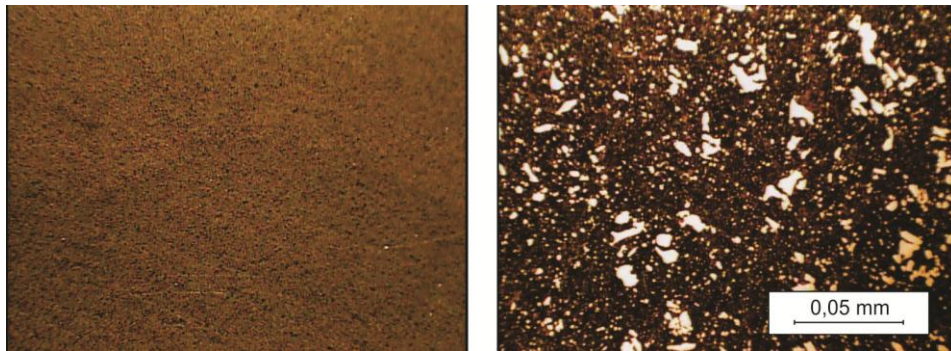


Figura 30 Análise metalográfica da amostra do material D6 submetida ao tratamento térmico (têmpera e revenido), em fornos com controlador PI

Com o objetivo de comparar processos e desempenho de métodos de controle, foram realizadas algumas medições relativas ao consumo de energia

durante o processo de têmpera. Para isto, além da medição durante a aplicação do método tradicional de tratamento térmico, foi utilizado o mesmo ciclo de aquecimento para o D6, no qual foi utilizado o controlador PI, porém, desta vez, com um controlador do tipo liga/desliga (*ON/OFF*), onde o forno era ligado (*ON*) quando a temperatura atingisse o limite de 20 °C abaixo da temperatura de referência e desligado (*OFF*) quando a temperatura atingisse o limite de 20 °C acima da temperatura de referência (Figura 31). Esta variação de temperatura é muito próxima a variação máxima de um termostato utilizado em alguns fornos de tratamento térmico.

Na medição relativa ao consumo médio de energia nos processos de tratamentos térmicos de têmpera foram obtidos resultados conforme Quadro 8, comparando-se o método tradicional com o uso do controlador PI, com uma diferença superior a 6%, menor, para o controlador PI. O Quadro 9 demonstra os resultados, da mesma análise comparativa, entre o controlador liga/desliga (*ON/OFF*) e o controlador PI, com uma diferença de quase 3,8%, menor, para o controlador PI, no consumo de energia. Estes resultados servem de referência para métodos diferentes com resultados finais similares, pois o tratamento térmico com o forno submetido ao controlador PI é capaz de amenizar, de modo mais eficiente, os distúrbios de processo.

Quadro 8 Registros comparativos do consumo médio de energia no tratamento térmico de têmpera (método tradicional *versus* controlador PI)

Consumo médio sem controlador	0,897 KWh / 0,906 KVAh
Consumo médio com controlador PI	0,849 KWh / 0,854 KVAh
Diferença	0,048 KWh (5,65%) / 0,052 KVAh (6,09%)

Quadro 9 Registros comparativos do consumo médio de energia no tratamento térmico de têmpera (controlador *ON/OFF versus* controlador PI)

Consumo médio com controlador <i>ON/OFF</i>	0,873 KWh / 0,886 KVAh
Consumo médio com controlador PI	0,849 KWh / 0,854 KVAh
Diferença	0,024 KWh (2,83%) / 0,032 KVAh (3,74%)

Na análise comparativa entre o método tradicional de tratamento térmico (malha aberta) com o método que utiliza o controlador (malha fechada), observa-se que a grande vantagem dos sistemas em malha fechada é o fato de que o uso da realimentação torna o sistema insensível a distúrbios, que podem ter origem no ambiente externo e em variações internas nos parâmetros do sistema. Caso a massa do material a ser submetido ao tratamento térmico seja grande, isto naturalmente significará um maior distúrbio para o processo, que muito provavelmente um sistema em malha aberta não seria capaz de perceber e corrigir, onde se justifica o uso do sistema com realimentação. Os sistemas nos quais as entradas são conhecidas com antecipação e que são isentos de distúrbios, o controle em malha aberta é conveniente pela sua simplicidade de construção. Os controles em malha fechada, no entanto, podem apresentar uma tendência de correção de erros além do necessário, o que geralmente causa oscilações de amplitudes.

Um índice de desempenho é uma medida quantitativa do desempenho de um sistema. Portanto, busca-se ajustes nos parâmetros do sistema de modo que o índice alcance um valor mínimo ou menor, se comparado com outro índice oriundo de um outro método ou sistema de controle com o mesmo objetivo. A Integral do erro ao quadrado multiplicado pelo tempo, do inglês *Integral of Time multiplied by the Square Error* (ITSE), é considerado um índice de desempenho apropriado e, este dentre os índices, é o que possui maior seletividade na identificação dos parâmetros do controlador PID. A equação utilizada para o cálculo deste índice é, conforme o nome do próprio índice, o produto da integral do tempo pelo quadrado do módulo do erro ou desvio entre a temperatura de referência e a temperatura medida, conforme Equação 7.

Para este projeto foram calculados o ITSE do sistema com o controlador liga/desliga (Figura 31) e comparado com o controlador PI (Figura 32), onde o Quadro 10 apresenta um exemplo de monitoramento do processo durante a

coleta de dados, onde percebe-se as correções com o controlador liga/desliga sobre o atuador (resistor do forno), que é ligado ou desligado, sem nenhum estado intermediário.

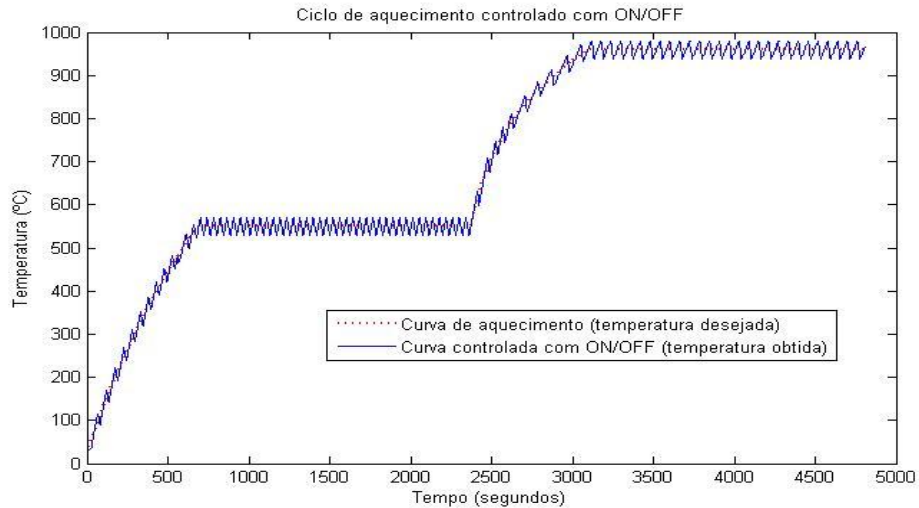


Figura 31 Ciclo de aquecimento de têmpera das amostras em D6 com controlador liga/desliga

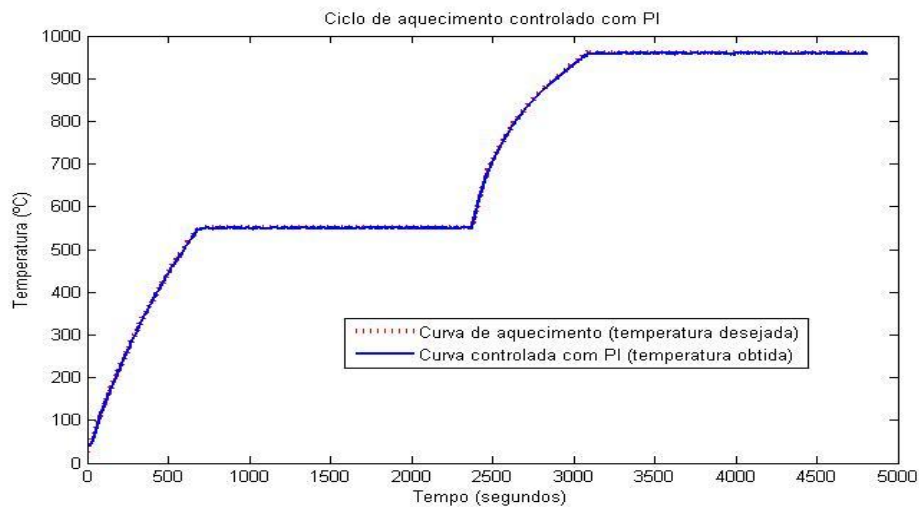


Figura 32 Ciclo de aquecimento de têmpera das amostras em D6 com controlador PI

No Quadro 11 observa-se o exemplo de monitoramento durante a coleta de dados com o controlador PI, onde os valores de correção correspondem ao *duty cycle*, que é a razão cíclica do sinal de controle. Neste caso, indica a razão (percentual) do tempo em que o sinal permanece em 5 V sobre o tempo total de oscilação fornecido pelo PWM do pino digital do Arduino. Com isso, ambos valores da temperatura de referência e aquela medida, para cada controlador, foram inseridas no Matlab™ onde foram obtidos os resultados de desempenho dos sistemas conforme Quadro 12, evidenciando o melhor desempenho para o controlador PI, com variações máximas de ± 3 °C. A Figura 33 apresenta um comparativos dos desvios (erros) entre os dois controladores, PI e o liga/desliga. Pode-se diminuir consideravelmente o erro do controlador liga/desliga, porém quanto menor esse erro, maior a frequência de acionamento e, portanto, maior a oscilação na saída do sistema.

Quadro 10 Monitoramento do processo com o controlador liga/desliga

tempo	leitura	ideal	correção
67	114	95	on
68	116	96	off
69	116	97	off
70	114	99	off
71	112	100	off
72	110	101	off
73	108	102	off
74	106	103	off
75	104	104	off
76	102	105	off
77	100	106	off
78	98	106	off
79	96	107	off
80	94	108	off
81	92	109	off
82	90	110	on
83	92	112	on
84	94	113	on

Quadro 11 Monitoramento do processo com o controlador PI

tempo	leitura	ideal	correção
151	169	169	0%
152	170	170	30%
153	172	171	0%
154	172	172	20%
155	173	173	0%
156	174	174	16%
157	175	175	52%
158	175	175	10%
160	176	177	60%
161	176	178	100%
162	177	179	100%
163	178	180	100%
164	179	181	100%
165	180	181	100%
166	181	182	100%
167	182	183	100%
168	183	184	90%
169	184	185	80%

Quadro 12 Resultados dos cálculos dos índices de desempenho dos controladores liga/desliga e PI

Controlador	Índice de desempenho ITSE
Liga/desliga	$1,7451 * 10^9$
PI	$1,9882 * 10^6$

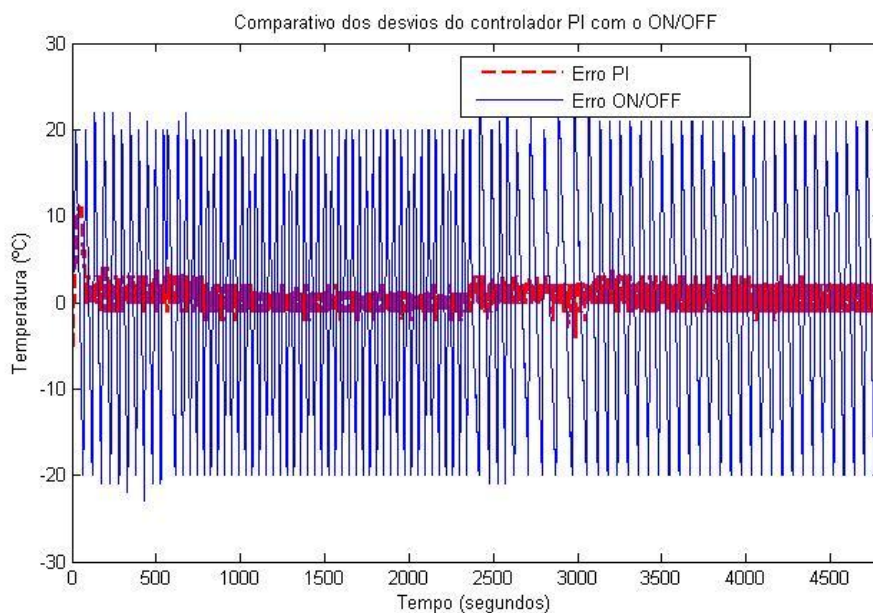


Figura 33 Comparação dos desvios durante o monitoramento dos ciclos de tratamento térmico nas amostras em D6 com os controladores liga/desliga e PI

A Figura 34 apresenta as variações de corrente aplicadas ao forno durante o ciclo de tratamento térmico de têmpera nas amostras em D6. Demonstra como o sinal PWM, aplicado à entrada de controle do relé, altera a potência fornecida ao forno e, portanto, a sua temperatura interna. No intervalo aproximado entre 2.500 segundos e 3.500 segundos, observa-se um período mais constante na potência aplicada ao forno, inclusive de potência máxima (100%). Isto significa que, neste intervalo a curva do ciclo de aquecimento aproximou-se da capacidade máxima do forno.

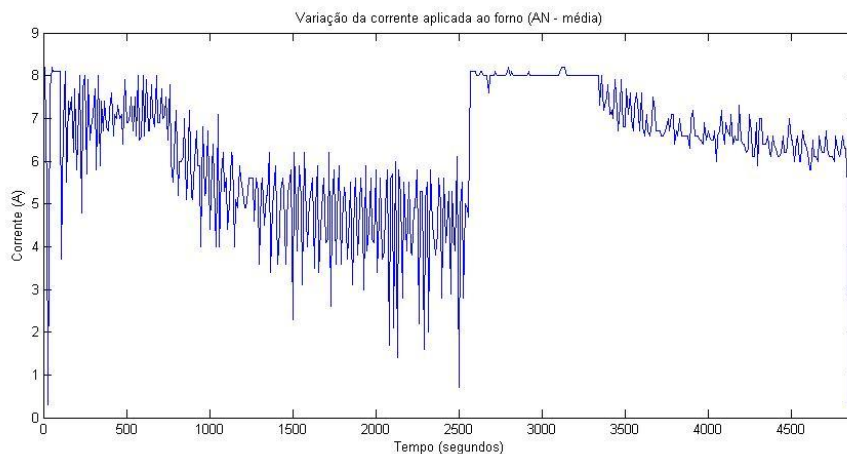


Figura 34 Variação da corrente durante o ciclo de aquecimento para a temperatura das amostras em D6 com o controlador PI

Nos controladores comerciais disponíveis no mercado, como exemplo o da empresa NOVUS[®] modelo N1100, o período de aquecimento e o período de permanência na temperatura são programados na forma de rampas e patamares (Figura 35), com no máximo sete períodos, que podem ser ampliados concatenando o limite de programas disponíveis para o controlador, que também são sete. A Figura 36 apresenta uma comparação hipotética entre uma curva similar a que foi usada nos ensaios de tratamento térmico com uma possível programação utilizando rampas e patamares, como no controlador comercial modelo N1100. Na simulação gráfica de controle, o processo de aquecimento obteve um tempo total estimado de 190 minutos, enquanto no N1100 este tempo foi estimado em 197 minutos.

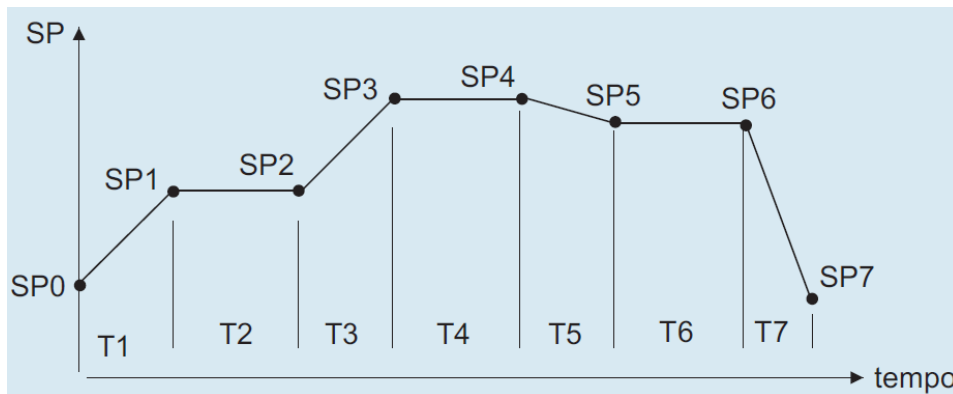


Figura 35 Programação em forma de rampas e patamares utilizado pelo controlador N1100

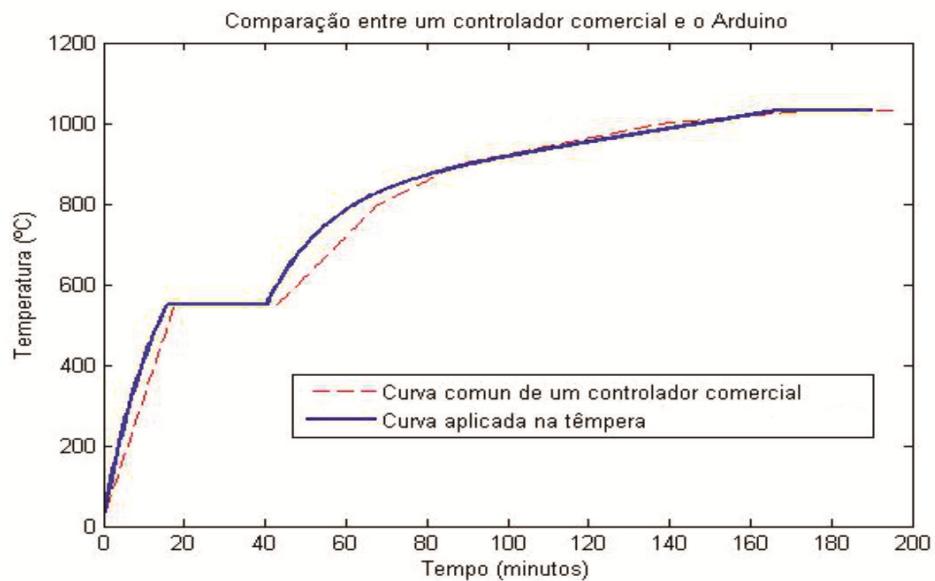


Figura 36 Comparação da programação entre as curvas de aquecimento do sistema proposto e do controlador NOVUS® modelo N1100

Esta variação se justifica não somente pela limitação da programação em rampas, mas também pelas diferentes velocidades de aquecimento do forno em intervalos diferentes de temperatura conforme apresentado na Figura 37, ou seja,

mesmo para se obter uma aproximação como aquela da Figura 36, com a programação das rampas e patamares, é necessário conhecer as taxas de aquecimento do forno para cada intervalo de temperatura. No sistema proposto não existe esta limitação. A curva de aquecimento pode ser representada por qualquer função.

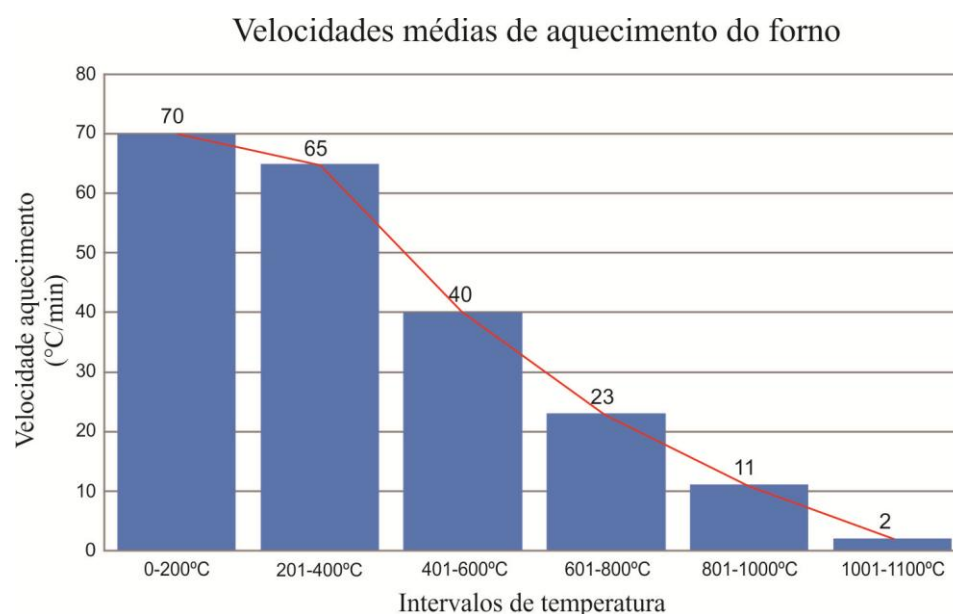


Figura 37 Velocidade média de aquecimento do forno em vários intervalos de temperatura

Em média, o preço de venda do controlador N1100, que possui algumas características semelhantes ao sistema proposto, é de R\$ 765,00 (incluindo o sensor termopar e o relé de estado sólido, que não acompanham o produto; cabos e instalação). A estimativa de custo de produção e despesas de comercialização para o sistema proposto, sugere um preço final de R\$ 442,90, uma diferença de 42,1% menor, sendo que os valores apresentados são de peças adquiridas no varejo (Quadro 13), ou seja, os custos unitários seriam menores na produção em escala e na compra dos componentes no atacado com importação direta.

Quadro 13 Estimativa de preço para o controlador proposto

Sistema de controle proposto		Controlador comercial N1100	
Componentes	Valores	Componentes	Valores
Arduino UNO R3	R\$ 37,00	N1100	R\$ 517,00
Display LCD Keypad 16x2	R\$ 24,90	RES 25A 3-32vdc/24-380vac	R\$ 39,90
Módulo MAX6675	R\$ 17,80	Termopar tipo K	R\$ 65,50
Fonte Arduino 12V	R\$ 12,90	Cabos+conexões+caixa	R\$ 22,60
Termopar tipo K	R\$ 65,50	Custo estimado montagem	R\$ 120,00
RES 25A 3-32vdc/24-380vac	R\$ 39,90		
Cabos+conexões+caixa	R\$ 22,60		
Custo estimado montagem	R\$ 12,50		
Total estimado	R\$ 233,10		
Comercialização			
Mark up (40%)	R\$ 93,24		
Despesas de	R\$ 48,95		
Impostos (18%)	R\$ 67,55		
Preço estimado final	R\$ 442,90	Preço estimado final	R\$ 765,00

6 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um sistema econômico para o controle automatizado de fornos utilizados em tratamentos térmicos de aços. Para isso, foi utilizado um sistema computacional simples, que pode ser embarcado ou não, baseado na plataforma de tecnologia aberta (*hardware e software*) Arduino. Nos experimentos foram utilizados corpos de prova com seção circular submetidos ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento, utilizando um forno com e sem o controle PI, demonstrando a viabilidade técnica na implementação de um controle automatizado em fornos de baixo custo.

Para o controle de temperatura que exige uma precisão maior, como exemplo na análise do comportamento de material biológico em função do

tempo e da temperatura, a mudança a ser feita seria a adaptação de sensores mais precisos e uma plataforma com um conversor analógico/digital com maior capacidade.

Na comparação entre os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, pelo método tradicional (visual e subjetivo) e com o controlador PI (segundo a orientação do fabricante do material), efetuados neste experimento, ficou evidente, nos resultados da análise de dureza, a maior proximidade de valores com o que se era esperado para as amostras que sofreram tratamento térmico controlado. Enquanto a análise metalográfica, demonstra normalidade nos grãos e pouca diferença de estrutura com uma homogeneidade ligeiramente maior na amostra submetida ao tratamento térmico com o controlador PI. Ressalta-se que o operador que executou os tratamentos térmicos nas amostras, pelo método tradicional e visual, possui grande experiência nesta operação. Por isso, os valores entre as amostras não foram tão divergentes.

Outra diferença considerável está no consumo de energia durante o processo de aproximadamente 6%. Este valor indica uma economia no processo que utilizou o sistema com o controlador PI em comparação com o método tradicional; onde, se os resultados finais nos testes das amostras com o controlador não foram muito melhores, foram pelo menos muito próximos, ou seja, no mínimo obteve-se resultados similares com economia de energia.

Obviamente existem no mercado fornos com controladores, mas os seus altos preços tornam-se inviáveis para muitas empresas do setor. Para as empresas que possuem o forno e deseja automatizá-lo com um controlador comercial, o custo estimado é de aproximadamente R\$ 765,00 (modelo Novus[®] N1100 incluído relé de estado sólido, sensor termopar tipo K, cabos e instalação), porém a sua adaptação nos fornos existentes não é uma operação simples e, além disto, o operador necessita ainda conhecer a programação e as diferentes velocidades ou taxas de aquecimento do forno para cada intervalo de

temperatura, pois os controladores disponíveis no comércio trabalham através da programação de períodos de aquecimento em rampas e patamares para os períodos de temperatura constante. Neste caso, as curvas de aquecimento são funções lineares cujas inclinações ou coeficientes angulares são programados em função do tempo inicial e final, o que depende do conhecimento e da experiência do operador, ocasionando uma maior propensão a erros. O sistema proposto não está limitado a isto, e qualquer função pode ser programada.

No modelo proposto a adaptação do sistema nos fornos comerciais seria muito mais simples, pois a alimentação do forno é na própria saída do controlador e o seu valor estimado de comercialização (incluído os impostos) seria de R\$ 442,90, ou seja, 42,1% menor do que um modelo comercial. Programas para o tratamento térmico de outros materiais poderiam ser criados e facilmente instalados no sistema, aumentando consideravelmente o seu campo de atuação e versatilidade. Uma outra vantagem do sistema proposto é a possibilidade de "baixar" programas e atualizações do processo de tratamento térmico diretamente do site do fornecedor, seguindo assim, estritamente as normas estabelecidas, ou mesmo, conectar com um sistema de gestão de tratamento térmico e a montagem de banco de dados para histórico do componente e operações de tratamentos térmicos. A conectividade presente na tecnologia aberta do Arduino poderá criar várias possibilidades, mesmo com o sistema embarcado ou conectado a um computador.

Portanto, considera-se que, as questões abertas e os objetivos desta pesquisa foram plenamente atendidos.

6.1 Trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros destacam-se:

- a) ampliação do programa para outros tipos de tratamentos térmicos e para novos materiais com a identificação de ciclos otimizados para cada um;
- b) implementação no sistema de um sintonizador PID automático;
- c) desenvolvimento de um programa de simulação, que considere a geometria do componente e determine a curva ideal para o tratamento térmico.

REFERÊNCIAS

AÇOS BOHLER DO BRASIL. **Catálogo de produtos: K110 e K107**. São Bernardo do Campo, 2009. Disponível em: <<http://www.bohler-brasil.com.br/br/b-611.php>>. Acesso em: 13 jun. 2015.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 740 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 136**: Informação e documentação: tratamentos térmicos de aço: terminologia e definições. Rio de Janeiro, 2000. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6189**: Informação e documentação: tratamentos térmicos de aço. Rio de Janeiro, 1982. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6215**: Informação e documentação: produtos siderúrgicos. Rio de Janeiro, 2011. 20 p.

ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. The future of PID control. **Control Engineering Practice**, [s.l.], v. 9, n. 11, p. 1163-1175, nov. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0967-0661\(01\)00062-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0967-0661(01)00062-4).

ASTROM, K. J.; KUMAR, P. R. Control: a perspective. **Automatica**, [s.l.], v. 50, n. 1, p. 3-43, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2013.10.012>.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 404 p. 1 v.

BELLMANN, M. P. et al. 3D dynamic simulation of heat transfer and melt flow in an inductively heated crystallization furnace for mc-silicon with PID temperature control. **Journal of Crystal Growth**, [s.l.], v. 383, p.119-125, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.08.022>.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 844 p.

CAPELLI, A. **Automação industrial: controle do movimento e processos contínuos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008. 236 p.

COHN, P. E. Temperatura. In: BEGA, E. A. (Org.). **Instrumentação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. p.207-248.

DORF, R. C.; BISHOP R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 838 p.

FAZANO, C. A. T. V. **A prática metalográfica**. 1.ed. São Paulo: Hemus, 1980. 453 p.

FERGUSON, B. L.; LI, Z.; FREBORG, A. M. Modeling heat treatment of steel parts. **Computational Materials Science**, [s.l.], v. 34, n. 3, p.274-281, nov. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.02.005>.

FERREIRA, T. A. **Tecnologia dos materiais**. 1.ed. Minas Gerais: Ed. UFLA/FAEPE, 2005.

GNANN, B.A. et al. Implantação e controle automatizado de um forno conforme NBR de tratamento térmico. **Profissionais da Indústria**, São Paulo, p.73-88, Ed. SENAI, 2014.

HAO, X. et al. 3-D Numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 14-15, p.1925-1931, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.007>.

HOMBERG, D.; WEISS, W. PID Control of Laser Surface Hardening of Steel. **IEEE Transactions on control systems technology**, [s.l.], v. 14, n. 5, p.896-904, set. 2006. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tcst.2006.879978>.

LARIN, A. A. et al. Control system for steel heat treatment regimes. **Metallurgist**, Moscow, Russia, v. 58, n. 2, p. 76-79, 2014.

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 856 p.

MCRBERTS, M. **Arduino básico**. 2.ed. São Paulo: Novatec, 2015. 512 p.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 760 p.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 824 p.

OMEGA ENGINEERING BRASIL, **Manual de referência técnica de temperatura**. São Paulo, 2014. 299 p. (Publicação Técnica, 1 ed.).

PURUSHOTHAMAN, R. **Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model**. 2008. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso Manufacturing Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, EUA, 2008.

SONNTAG, R.; WYLEN, G. V. **Fundamentos da termodinâmica**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 740 p.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012. 734 p.

SVERDLIN, A. V.; NESS, A. R. Fundamental Concepts in Steel heat treatment. In: TOTTEN, G. E. (Ed.) **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 121-164.

TENSI, H. M.; STICH, A.; TOTTEN, G. E. (Ed.) Quenching and quenching technology. In: TOTTEN, G. E. (Ed.) **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 539-605.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 824 p. 1 v.

WILMSHURST, T. **Designing embedded systems with PIC microcontrollers: principles and applications**. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009. 704 p.

ZAMBALDI, E. S.; BARBOSA, B. H. G.; MAGALHÃES, R. R. Estudo comparativo de ações de um controle liga/desliga e um controlador proporcional, integral e derivativo (PID). In: CONGRESSO MINEIRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA, 1., 2015, Lavras, MG. **Anais...** Minas Gerais: UFLA, 2015. p. 569-575.

ZHAO, J. et al. Enhancing mechanical properties of a low-carbon microalloyed cast steel by controlled heat treatment. **Materials Science & Engineering A**, [s.l.], v. 559, p.427-435, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.122>.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controller **Transactions of the ASME**, n. 64, p. 759-768, 1942.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Aços e tratamentos térmicos

O objetivo do tratamento térmico é causar mudanças desejadas na estrutura metalúrgica e deste modo, nas propriedades das peças metálicas. O tratamento térmico afeta as propriedades da maior parte dos metais, mas o seu efeito e influência é muito maior no ferro e suas ligas, principalmente no aço. O aumento do grau de vibração térmica (temperatura) provoca no ferro uma transformação polimórfica ocasionando o aumento dos seus espaços intersticiais, onde o carbono consegue se solubilizar até um determinado limite até a saturação das suas estruturas, quando se precipita formando carbeto, e em função das temperaturas e das velocidades de aquecimento e resfriamento, formam-se novas estruturas, definem-se as dimensões e orientações dos grãos e alteram-se a tensão interna destas estruturas. Portanto, o devido controle das temperaturas (aquecimento, permanência e resfriamento) em função do tempo, é fundamental para o objetivo e na eficiência destes processos. O controle preciso destas variáveis é diretamente proporcional à complexidade da liga, principalmente no tratamento térmico de aços especiais, cujos componentes ou peças serão submetidos aos mais rigorosos esforços. Geralmente uma peça sofre tratamento térmico quando se encontra na fase final do seu processo de fabricação, pois já passou pelas fases de corte de material, desbaste, usinagem e muitas vezes acabamento. Isto significa que, a peça durante o processo de tratamento térmico já se encontra em suas medidas finais. A negligência no controle do processo, além de não transferir ao componente todas as propriedades planejadas, pode ocasionar deformações dimensionais e geométricas que a inutilizam para a função na qual foi projetada. No caso de componentes como punções e matrizes, em ferramentas de corte, dobra e

embutição. O não alcance das suas qualidades máximas acarreta uma frequência maior de manutenção, como a afiação ou a troca do componente por desgaste, até mesmo a quebra dos componentes que são submetidos a variados esforços, inclusive por fadiga.

Para a devida compreensão do processo de tratamento térmico é importante entender toda a cadeia e os processos específicos desde as matérias primas responsáveis pela composição do aço e a sua influência na estrutura reticular e fases de equilíbrio. Apesar das diferentes composições químicas e diferentes teores de elementos na formação de suas ligas, o aço continua sendo conhecido como uma liga binária entre Ferro e Carbono, pois o teor de carbono será o elemento que determina as suas principais características, principalmente a dureza. Todas as influências que ocorrem nas propriedades químicas, físicas e mecânicas dos aços ocorrem com a variação e na relação entre seus diversos elementos de liga, que se apresentam em proporções muito baixas em relação a presença base do ferro. Por isso, o controle preciso desta composição química seguido de um tratamento térmico controlado, resulta em peças capazes de suportar os esforços para os quais foram projetadas e dimensionadas, de maneira mais eficiente possível. Para a indústria isto significa menor quantidade de material para suportar um mesmo esforço, diminuição no peso do conjunto, maior resistência à fadiga e aumento da vida útil, o que acarreta maior qualidade e redução de custos.

Os aços são produzidos basicamente de duas formas: na redução do minério de ferro ou pela reciclagem de sucata de aço. Na produção por redução, o minério de ferro é previamente preparado e transformado no sinter para conter entre 50% a 70% de Óxido de ferro (FeO), Fe_2O_3 ou Fe_3O_4 , no processo denominado sinterização. Após esta etapa, o sinter é fundido em um alto-forno na presença de oxigênio, fundentes (calcário e dolomita) e de coque, ou seja, carvão mineral previamente processado na coqueria. Durante a fusão o coque

reduz o óxido de ferro a um ferro fundido intermediário conhecido como gusa ou ferro gusa, com presença de outros elementos residuais como: Silício, Manganês, Enxofre e Fósforo. A escória é um subproduto do processo de redução no alto-forno (Figura 38) e contém sílica, óxido de cálcio (CaO) e outras impurezas na forma de silicato fundido, que são logo separados por diferença de densidades.

Antes de chegar na aciaria, o ferro gusa sofre refino, inicialmente passando por uma estação de dessulfuração, pois o enxofre presente em altos teores no gusa é um elemento indesejado por afetar os processos de transformação do aço e, portanto, é prejudicial às propriedades mecânicas. O processo ocorre com o sopro de uma mistura, através de uma lança, de nitrogênio, carbeto de cálcio em pó (CaC_2), óxido de cálcio (CaO) e magnésio. Ocorre uma reação de formação de sulfeto de cálcio (CaS), que sendo menos denso que o gusa líquido, flota até a superfície onde é removido.

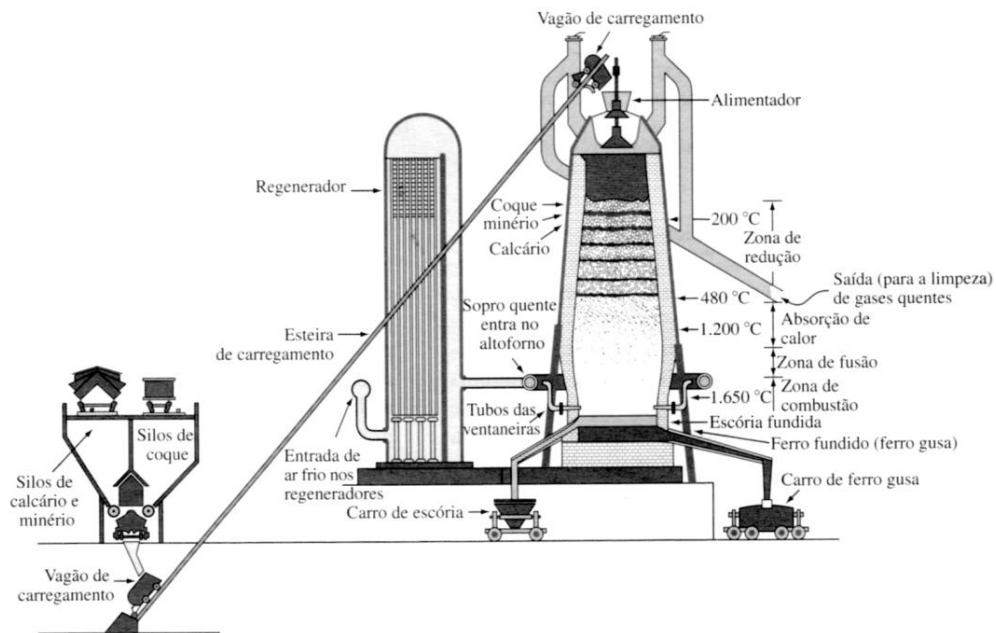


Figura 38 Diagrama de alto forno para a produção de ferro
Fonte: Smith e Hashemi (2012)

A transformação de ferro gusa em aço é realizada comumente em conversores por meio do sopro de oxigênio, onde se promove a oxidação dos elementos residuais do ferro gusa que se deseja remover ou diminuir os seus teores aos limites especificados, como o carbono, silício e fósforo (Figura 39). Segundo NBR 6215:2011 (ABNT, 2011), o termo aço designa a liga ferrosa que apresenta teor de carbono igual ou inferior a 2% em peso (%p) na sua forma combinada ou dissolvida e que pode conter elementos de liga adicionados ou residuais.

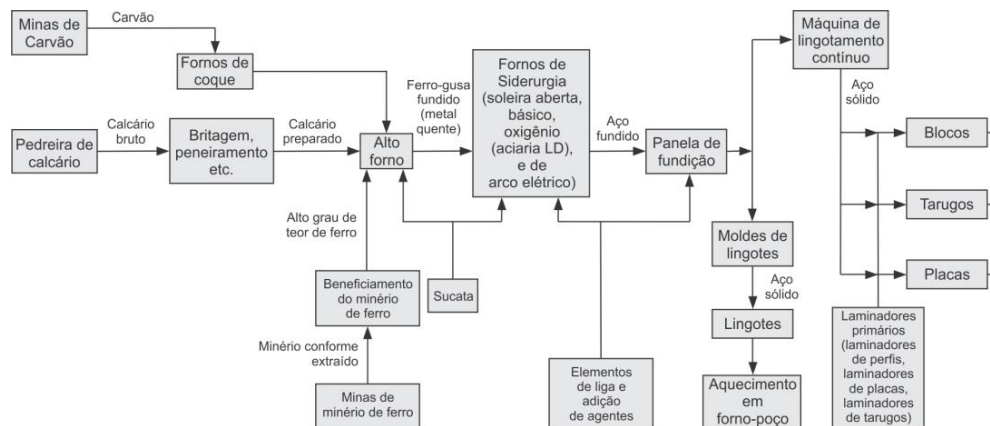


Figura 39 Diagrama de produção aço
Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012)

As propriedades mecânicas dos aços estão relacionadas à sua estrutura cristalina. Os materiais cristalinos são classificados de acordo com a regularidade do arranjo entre seus átomos e a relação entre eles. Um material pode apresentar mais de uma estrutura cristalina, um fenômeno conhecido como polimorfismo, em sólidos elementares, como o ferro, essa condição é denominada alotropia. Geralmente a estrutura cristalina prevalente depende tanto da temperatura quanto da pressão externa a qual está submetida o material.

No caso do ferro puro, à temperatura ambiente e à pressão de 1 atm, a forma estável predominante apresenta uma estrutura cristalina do tipo Cúbica de Corpo Centrado (CCC), chamada de ferro α ou ferrita. Conforme o aumento do grau de agitação dos átomos, ou seja, aumento de temperatura a ferrita apresenta uma transformação polimórfica a 912 °C, na qual a forma estável predominante é a estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC), neste caso conhecida como austenita ou ferro γ , esta austenita persiste até 1394 °C, quando a austenita CFC passa por uma nova transformação voltando à forma CCC, conhecida como ferrita δ , e que finalmente se funde a 1538 °C, sendo que a única diferença entre a ferrita δ e a ferrita α é a faixa de temperatura de existência de cada uma. Os primeiros investigadores observaram que o comportamento ferromagnético do ferro desaparecia a 768 °C, o que foi interpretado inicialmente como uma mudança de fase a qual denominaram ferro β , porém foi constatado posteriormente que este fenômeno não era resultado de uma mudança de fase, mas sim do comportamento do material com a proximidade da mudança de fase da ferrita para a austenita que não é ferromagnética, por isso, a presumida fase não existe.

O diagrama de fases Fe-Fe₃C (Figura 40) demonstra a solubilidade do carbono no ferro nas diferentes temperaturas e mudanças de fase. Geralmente o eixo das composições se estende somente até 6,67 %p (percentual em peso) de carbono, pois acima deste ocorre a formação de grafita pura. Entre o ferro puro e o teor de 6,67 %p de Carbono existe uma solução sólida de ferro e carbono, portanto aço, cuja solubilidade máxima ocorre na fase austenita, a 2,11 %p, na temperatura de 1148 °C. Segundo Ferreira (2005) a análise do diagrama de equilíbrio ferro carbono, na região dos aços, é a seguinte:

- a) Teor de carbono até 0,77 % (aço hipoeutetóide): conforme o teor de carbono cresce até 0,77 %, a temperatura do início de transformação

do $Fe\gamma$ em $Fe\alpha$ diminui segundo a curva A_3 . Existe uma região de transição de $Fe\gamma$ em $Fe\alpha$ até que abaixo de $727\text{ }^\circ\text{C}$ todo $Fe\gamma$ se transforma em $Fe\alpha$. O resultado é a formação de grãos de ferrita envolvendo grãos de perlita (ferrita + cementita).

- b) Teor de carbono de $0,77\%$ (aço eutetóide): como foi dito anteriormente, nesta temperatura de $727\text{ }^\circ\text{C}$ ocorre somente a formação da perlita.
- c) Teor de carbono acima de $0,77\%$ (aço hipereutetóide): à medida que o teor de carbono cresce, acima de $0,77\%$, a temperatura de transformação do $Fe\gamma$ em $Fe\alpha$ também cresce segundo a curva A_{cm} e, abaixo desta curva, existe uma região de transição (não há transformação instantânea como no eutético). Dá-se formação nessa região também à cementita, que atravessa a linha dos $727\text{ }^\circ\text{C}$ na forma Fe_3C .

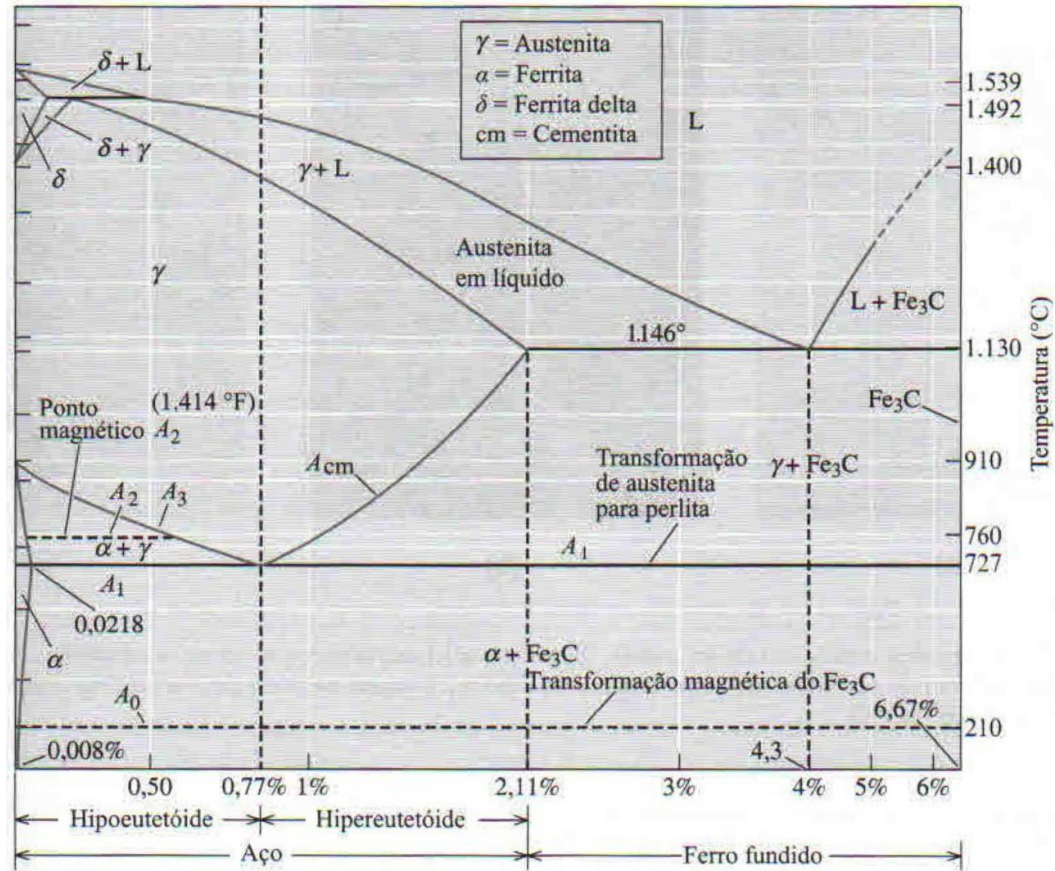


Figura 40 Diagrama de fases Fe-Fe₃C
 Fonte: Askeland e Wright (2014)

A cementita (Fe₃C), extremamente dura e frágil, se forma a partir deste limite como um novo composto, ou seja, é considerado aço a liga de Fe-C que possui de 0,02 %p C a 2,11 %p C, acima desses valores aparece o ferro fundido e o ferro gusa até a grafite pura. Observa-se que a solubilidade do carbono no ferro, na austenita é aproximadamente 100 vezes maior do que na ferrita. Esta maior solubilidade é explicada pelas posições intersticiais na estrutura CFC

serem pouco maiores do que na estrutura CCC, embora o fator de empacotamento da estrutura CFC seja maior do que o da CCC.

O aquecimento da liga de composição eutetóide produz uma microestrutura constituída somente de austenita. Segundo Askeland e Wright (2014), quando esta austenita resfria a reação eutetóide tem início e tal reação cria duas novas fases com composições químicas diferentes, assim os átomos devem se difundir durante a reação eutetóide. A maior parte do carbono na austenita se difunde para formar cementita e, similarmente, a maior parte dos átomos de ferro difunde para a ferrita. A microestrutura lamelar de $Fe\alpha$ e Fe_3C que se desenvolve no sistema ferro-carbono é chamada perlita. Com uma difusão mais lenta e, portanto, com o tempo global de transformação maior, surge uma outra nova estrutura a bainita, o resultado da precipitação de cementita como partículas discretas e esféricas em uma matriz de ferrita.

No caso de resfriamento brusco, a austenita se transforma em martensita, uma estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) supersaturada em carbono. A relação cristalográfica entre a austenita CFC e a martensita TCC mostra que átomos de carbono nos interstícios localizados em $(1/2,0,0)$ da célula CFC (Figura 41) dificultam a transformação para a estrutura CCC, levando, por cisalhamento da rede, à estrutura tetragonal. O resfriamento brusco evita a difusão atômica e a formação de perlita, bainita ou microconstituintes primários que ocorrem por difusão. A martensita em aços é muito dura e frágil, semelhante às cerâmicas sendo a sua resistência proporcional ao aumento do teor de carbono.

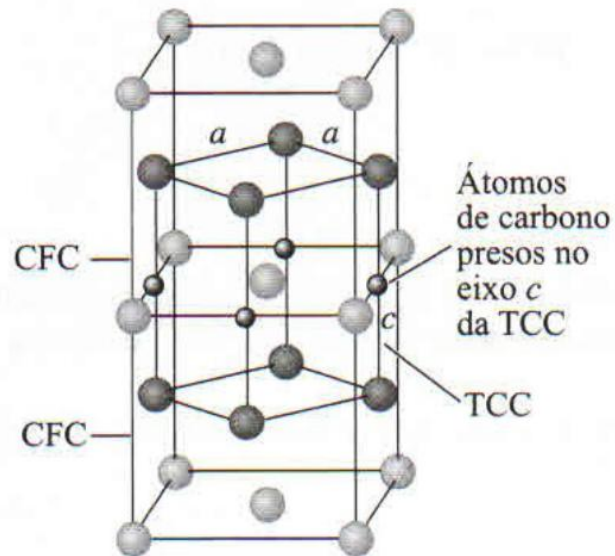
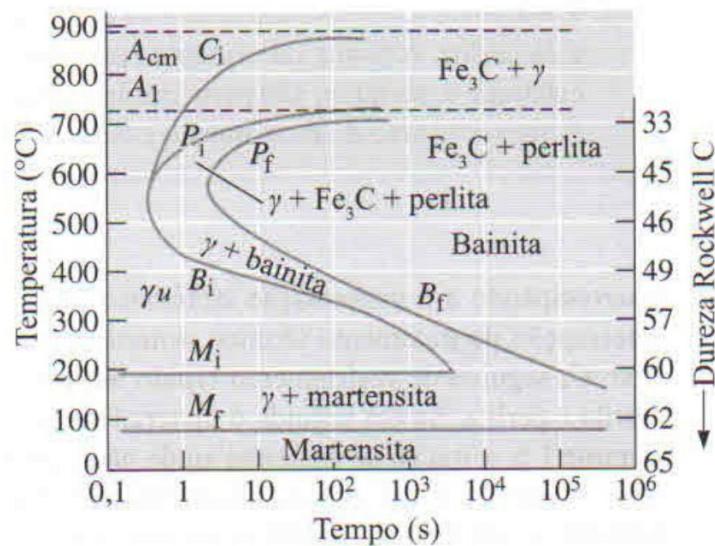


Figura 41 Célula Unitária TCC
 Fonte: Askeland e Wright (2014)

Em resumo, os aços são basicamente ligas de ferro e carbono, sendo o percentual de carbono o principal responsável pela sua dureza. Outros elementos ainda podem ser acrescentados a esta liga e promover novas características e propriedades mecânicas diversas, como: aumento da dureza, maior resistência à corrosão e ao choque, melhoras na usinabilidade e soldabilidade entre outros. Callister e Rethwisch (2013) afirmam que uma das funções dos elementos de liga é deslocar a linha eutetóide do diagrama de equilíbrio do ferro, aumentando assim a solubilização do carbono que, ocupando os espaços intersticiais e com o tratamento térmico apropriado, é capaz de aumentar consideravelmente a dureza, ou seja, a resistência ao desgaste de um componente. Neste caso, a chave do processo de transformação está no controle da temperatura em função do tempo em suas várias fases. Para Askeland e Wright (2014), a reação eutetóide pode ser empregada para controlar a microestrutura e as propriedades de aços através de

tratamento térmico e por efeito da adição de outros elementos de liga. Portanto, os tratamentos térmicos nos aços permitem controlar a quantidade, o tamanho e a forma da cementita e, com isto, ajustar as diversas propriedades mecânicas do aço.

Alguns dos tratamentos térmicos mais utilizados em aços são: têmpera, revenimento, recozimento e normalização. A têmpera tem por objetivo o aumento da dureza através da formação de estruturas martensíticas e o seu processo ocorre com a elevação da temperatura da peça acima da linha de transformação austenítica, seguida de resfriamento brusco. Dependendo da composição química do aço, o resfriamento pode ser em água ou óleo e o resultado da sua estrutura conforme curva Temperatura-Tempo-Transformação (TTT), conforme Figura 42.



C = Cementita	P = Perlita	M = Martensita	f = fim
F = Ferrita	B = Bainita	i = início	γ_u = fase gama instável

Figura 42 Curva TTT
Fonte: Askeland e Wright (2014)

A martensita não é uma fase de equilíbrio. Por isso, não aparece no diagrama de fases Fe-Fe₃O. Quando a martensita é aquecida abaixo da temperatura eutetóide, as fases ferrita-cementita termodinamicamente estáveis se precipitam. Esse processo é chamado de revenimento. A decomposição da martensita causa a diminuição da resistência mecânica e da dureza, aumento da tenacidade e alívio das tensões provocadas pelo choque térmico. Este procedimento é obrigatório após a têmpera, onde a peça é aquecida entre 100 °C e 600 °C com resfriamento ao ar calmo ou forçado. É o revenimento que determina a dureza final no tratamento de têmpera e quanto maior a temperatura aplicada ao processo, menor a dureza e maior a tenacidade. Na normalização o material é aquecido na região pouco abaixo da austenita e sofre resfriamento ao ar calmo ou forçado. O seu objetivo é refinar os grãos e melhorar a uniformidade da microestrutura. Geralmente é utilizada antes da têmpera para aliviar tensões de trabalho à frio, como por exemplo, da usinagem. Finalmente, o recozimento é um processo similar à normalização com temperaturas acima da linha A3 (Figura 40), porém o seu processo de resfriamento é muito lento, sendo muito comum manter a peça dentro do forno e deixá-la resfriar naturalmente. O recozimento tem como objetivo melhorar a usinabilidade da peça com a formação de perlita grosseira, que proporciona uma resistência mecânica mais baixa e boa ductibilidade. Em todos os casos a velocidade de aquecimento deve ser controlada e, no caso da têmpera, a de resfriamento, para a correta formação da nova microestrutura do aço. Segundo Tensi, Stich e Totten (2007), o principal objetivo do controle no processo de aquecimento é obter microestrutura, dureza e resistência desejadas, enquanto as distorções dimensionais e o acúmulo de tensões residuais são minimizadas.

Uma das formas mais utilizadas de classificar os aços é aquela que considera a composição química, de acordo com o sistema de designação SAE-AISI (SAE - Society of Automotive Engineers, AISI - American Iron and Steel

Institute) a mesma aplicada pela NBR 6189/82 (ABNT, 1982). A partir desta, se pode classificar globalmente os aços em quatro grandes classes:

- a) aços Carbono;
- b) aços liga ou de construção mecânica (baixa e média liga);
- c) aços Inoxidáveis;
- d) aços Ferramenta (Alta liga e especiais).

APÊNDICE B - Aços especiais

Inicialmente os nossos antepassados tiveram acesso aos materiais que ocorriam naturalmente e com o passar do tempo foi possível desenvolver técnicas capazes de alterar as propriedades originais destes materiais através de tratamentos térmicos específicos e criar novos materiais com a adição de outras substâncias. Dentre todos os materiais sólidos desenvolvidos pelo homem, provavelmente foi o aço a de maior importância, principalmente com o advento da revolução industrial. Conceitualmente o aço é uma liga binária formada pelo ferro, como material base, e carbono. No entanto, esta microestrutura pode ter as suas propriedades potencializadas através da adição de novos elementos de liga e do tratamento térmico aplicado. Basicamente o que aumenta a dureza no aço é o teor de carbono e de como estes átomos estão organizados na estrutura cristalina. Segundo a norma europeia EURONORM 20 respectivamente EN10020, a definição de aço especial é o tipo de aço que devido a uma precisa combinação da sua composição química e através de condições particulares de fabricação e testes, adquire as mais diversas características de usinagem e aplicação em comparação aos aços de qualidade, estes aços que possuem um grau de pureza superior das suas ligas possuem aplicações diversas. No caso dos aços especiais de baixa liga ao tratamento térmico superficial e materiais pré-

tratados, também conhecidos como beneficiados, e nos de alta liga a aplicação em ferramentas, aços inoxidáveis, refratários e com alto limite de escoamento. O carbono é o elemento que mais influencia as características físico-mecânicas dos aços. Este aumenta fortemente a dureza em todos os estados de tratamento e principalmente na têmpera. As principais variações de características são produzidas pela ação dos elementos de liga. Estes elementos provocam no aço grandes mudanças no seu diagrama de fase e no equilíbrio destas fases. As mais importantes estão na formação das microestruturas, deslocamento da posição eutetóide em relação à temperatura, aumento da solubilização do carbono, ou até mesmo na melhoria da sua resistência à corrosão e na usinabilidade e temperabilidade do material. A variação destas características é em função do elemento adicionado, no seu teor e combinados com as fases e temperaturas do processo de tratamento térmico. O que define o tipo de liga e o processo de tratamento térmico, portanto, as características mecânicas, é a aplicação final do material. A composição química dos aços especiais, devido à sua precisão, lhes garante as vantagens na eficiência e confiabilidade do seu uso, porém o torna suscetível às pequenas variações na conformidade do seu processo de tratamento térmico. Por isso a importância do profundo conhecimento dos seus diversos processos de transformação e no controle das curvas de aquecimento e resfriamento.

Alguns aços especiais ou aços ferramentas são tratados termicamente e utilizados na construção de moldes e matrizes, dentre eles, D2 e D6. Os Aços D2 e D6 representam a série "D" de aços ferramenta para trabalho à frio e são conhecido pela sua composição de alta liga e pela capacidade de têmpera, apresentando baixa distorção dimensional, sendo frequentemente chamados de "indeformáveis". Estes aços apresentam excepcional resistência ao desgaste, conferida pela elevada fração de carbonetos de cromo presentes na sua microestrutura. O Quadro 14 apresenta o percentual em peso da composição

química média dos aços D2 e D6, e; o Quadro 15 apresenta a nomenclatura dos materiais da norma NBR 6189/82 (ABNT, 1982) com os similares da Bohler (empresa europeia fabricante de aços), inclusive as temperaturas indicativas dos tratamentos térmicos e respectivas durezas na escala Rockwell C (HRC).

Quadro 14 Composição química aproximada dos aços D2 e D6 (% em peso)

Fonte: Aços Bohler do Brasil (2015)

SAE/AISI/ABNT	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W
D2	1,55	0,25	0,35	11,8	0,8	/	0,95	/
D6	2,10	0,25	0,30	11,5	/	/	/	0,7

Quadro 15 Comparativo de nomenclatura e temperaturas de referência dos tratamentos térmicos

Fonte: Aços Bohler do Brasil (2015)

SAE/AISI/ABNT	Bohler	Recozimento	Normalização	Têmpera/Dureza	Dureza HRC depois do Revenimento			
					100°C	200°C	300°C	400°C
D2	K110	800-850°C	650-700°C	1030°C / 63-65HRC	63	61	59	58
D6	K107	800-850°C	650-700°C	960°C / 64-66HRC	65	63	61	60

APÊNDICE C - Ensaio de dureza

É fundamental ao engenheiro conhecer o comportamento dos materiais, que quando em uso, são submetidos a uma série de forças ou cargas. Por isso é necessário entender não somente as forças atuantes, mas também a capacidade de resistir a estas forças para a melhor definição da forma e dimensionamento (*design*) do componente a partir do seu material, de modo que, a deformação sofrida durante o esforço não seja excessiva e não ocorra a falha. Como as propriedades mecânicas de um material estão diretamente relacionadas a sua capacidade de suportar esforços, o conhecimento da dureza é um fator

importante, pois consegue-se relacionar com outras propriedades mecânicas. Na engenharia a dureza é definida como a resistência à penetração de um material em outro. Muitas técnicas para quantificar e comparar durezas foram desenvolvidas, a maioria força-se um penetrador sobre a superfície do material até criar um entalhe sob condições controladas, mede-se esta impressão e dá-se um número em uma determinada escala.

Os testes de dureza são mais utilizados por várias razões: são simples e econômicos, não são testes destrutivos e outras propriedades mecânicas podem ser estimadas a partir do resultado obtido. O teste de dureza Rockwell é provavelmente o mais utilizado devido a sua simplicidade, a isenção de habilidades específicas da parte de quem executa e de uma grande disponibilidade de penetradores e cargas diferentes para materiais diferentes, desde os mais dúcteis até os mais rígidos. Neste sistema, o número da dureza é determinada em função da profundidade de penetração resultante entre uma leve carga inicial seguida de uma segunda com valor maior de carga. O resultado é colocado em uma escala cuja a variável, além da carga, é o tipo de penetrador. Para materiais considerados duros, ou seja, rígidos, a escala Rockwell utilizada é a C, isto significa dizer que para o teste de dureza foi utilizado um penetrador de diamante com carga final de 150 Kg e o valor obtido possui o símbolo HRC.

APÊNDICE D - Metalografia

A metalografia microscópica ou micrografia é o ramo da tecnologia que estuda e interpreta a estrutura interna dos metais e suas ligas, como também a relação entre as suas composições químicas, propriedades físicas e mecânicas. Segundo Fazano (1980) são três os estágios básicos usados no ensaio metalográfico:

- a) preparação da superfície;
- b) ataque;
- c) observação ao microscópio.

A superfície do corpo de prova deve estar plana e polida. Para isto, é utilizado uma politriz com velocidade variável onde lixas em formatos de discos de diferentes granulometrias são utilizadas. Comumente seguem a sequência de numeração: 220, 320, 400 e 600. Sendo que, as maiores numerações correspondem às lixas mais finas. Após o uso da lixa mais fina, passa-se à utilização de discos de feltros na politriz giratória, sobre a qual se aplica abrasivos de granulação muito fina, tal como o uso de pastas à base de diamante e posteriormente Alumina (Al_2O_3) em suspensão com água.

O ataque à superfície é executado com o reagente químico adequado. O Nital é um dos principais reagentes, sendo uma solução de ácido nítrico a 3% em álcool etílico na qual a amostra é posta em contato por um período entre 3 a 5 segundos. Após o ataque deve-se lavar a superfície com álcool, secar com algodão e posteriormente aplicação de ar seco e quente para eliminar completamente a umidade. O Nital não ataca a ferrita nem a cementita, mas delinea os contornos de ferrita e cementita e a área perlítica se apresentará "hachurada". Com ataque excessivo ou as lamelas estando muito próximas, elas se confundem e a área perlítica torna-se escura.

Na observação ao microscópio basicamente pode-se avaliar o teor de carbono do aço pela quantidade de ferrita, perlita ou cementita presentes. Outra característica importante está nas dimensões dos constituintes, uniformidade e distribuição.

ANEXOS

ANEXO A - Programa Matlab para caracterização do sistema

```
clear all
close all
clc

load curvas

y_subida = temperup - min(temperup);
u_subida = degunitup;

y_descida = temperdown - min(temperdown);

u_descida = zeros(1,numel(y_descida));

%% Curva Inteira

y = temper - temper(1);
u = [ones(1,numel(y_subida)) zeros(1,numel(y_descida))];

%% Subida

Gs_ordem1 = tf(1069.9,[765.6 1]);
Gs_ordem1.OutputDelay = 0;

Gs_ordem2 = tf(1078.2,[864.64*0.001 864.64+0.001 1]);
Gs_ordem2.OutputDelay = 0;

y_sim_subida_o1 = step(Gs_ordem1,timeup) ;
y_sim_subida_o2 = step(Gs_ordem2,timeup) ;

figure
plot(timeup,y_subida + min(temperup))
hold on
```

```

plot(timeup,y_sim_subida_o1 + min(temperup),'r')
plot(timeup,y_sim_subida_o2 + min(temperup),'k')

%% Descida

Gd_ordem1 = tf(1066*2280,[2280 1]);
y_sim_descida_o1 = impulse(Gd_ordem1,timedown);

Gd_ordem2 = tf([3.14*10^6*1143 3.14*10^6],[5562*693 5562+693 1]);
y_sim_descida_o2 = impulse(Gd_ordem2,timedown);

figure
plot(y_descida+39)
hold on
plot(y_sim_descida_o1+39,'r')
plot(y_sim_descida_o2 + 39,'k')

```

ANEXO B - Programa Matlab para cálculo do desempenho ITSE dos controladores PID e ON/OFF

```

clearall
closeall
clc

loadcompara

v_err_pi= curvaq-tpid;
v_err_onoff= curvaq-tof;

%% ITSE do sistema controlado por PI
itse_pi=trapz (time,(v_err_pi.^2).*time)
figure
plot (time, v_err_pi);

%% ITSE do sistema controlado por On/Off
itse_onoff=trapz(time,(v_err_onoff.^2).*time)
figure

```



```

plot (time, v_err_onoff);

%% plotagem comparativo dos dois erros
figure
plot (time,v_err_pi,time,v_err_onoff)

```

ANEXO C - Programa do controlador PID

```

// Programa : Controle temperatura para tratamentos térmicos PID
// Autor : Edimilson Zambaldi (35) 9 9152-2926

//Inserção das bibliotecas
#include <LiquidCrystal.h>
#include "max6675.h"
#include <math.h>
#include "PID_v1.h"
#include <Wire.h>

// Inicialização de portas LCD
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);

// Símbolo de Celsius para imprimir no LCD
uint8_t degree[8] = { 140,146,146,140,128,128,128,128};

// Inicializa termopar K
MAX6675 thermocouple(13, 12, 11);

// Define porta para controle de temperatura (PWM)
const int DIMMER_PIN = 3;

// Tempo inicial de funcionamento
unsigned long _Start;

// Variáveis para uso da biblioteca PID
double _pidSetPoint;          // valor esperado do PID
double _pidInput;            // Valor de entrada para o PID
double _pidOutput;           // Valor de saída para o PID

// Link com o PID, usando valores iniciais de Kp, Ti, Td

```

```
// Função de transferência = 1069.9 / (765.6 * S + 1)
PID _pid(&_pidInput, &_pidOutput, &_pidSetPoint, 4.66, 0.21, 0, DIRECT);

// Configuração do Arduino
void setup()
{
    // Inicializa portas
    pinMode(DIMMER_PIN, OUTPUT);

    // Inicializa comunicação serial
    Serial.begin(9600);

    // Inicializa LCD
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.createChar(0, degree);
    delay(500);

    // Imprime cabeçalho na porta serial
    Serial.print("tempo\tread\tideal\tcorrection\r\n");

    // Inicializa o PID, saída de dados de 0 a 1000ms
    _pid.SetOutputLimits(0, 1);
    _pid.SetMode(AUTOMATIC);

    // Imprime cabeçalho no LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("CONTROLE FORNO");
    lcd.noCursor();

    // Recupera momento da inicialização
    _Start = millis();
}

// Laço principal
void loop()
{
    // Aplica período T1, temperatura 550, estabilizando por 1800 segundos
    SetTemperature(550, 1800, 0, 1221, -0.00003272, -1044, -0.001019);

    // Aplica período T2, temperatura 960, estabilizando por 1800 segundos
    SetTemperature(960, 1800, 550, 1221, -0.00003272, -1044, -0.001019);
}
```

```
// Desliga aquecimento
ApplyDimmer(0);
_pidSetPoint = -1;

// Loop infinito
while (1)
{
    // Imprime informações
    PrintInfo();

    // Aguarda até próxima impressão
    delay(1000);
}

// Aplica uma temperatura 'temp' por um período 'duration' (segundos)
// Curva de aquecimento:  $k + a \cdot \exp^{(b \cdot t)} + c \cdot \exp^{(d \cdot t)}$ , onde 't' é o tempo
// decorrido desde o início da curva
void SetTemperature(double temp, int duration, double k, double a, double b,
double c, double d)
{
    // Temperatura atual
    double current;

    // Temperatura ideal do momento 't'
    double best;

    // Momento inicial desse processo (não confundir com o _Start que
    // indica o momento inicial de todo o processo)
    unsigned long start = millis();

    // Momento 't'
    int t = 0;

    // Recupera temperatura atual e guarda como entrada para o PID
    current = thermocouple.readCelsius();
    _pidInput = current;

    // Enquanto não chegar na temperatura ideal
    do
    {
```

```

// Calcula momento 't'
t = int((millis() - start) / 1000);

// Calcula melhor temperatura e guarda no PID
best = k + a * exp(b * t) + c * exp(d * t)-150;
if (best > temp) best = temp;
_pidSetPoint = best;

// Calcula o PID
_pid.Compute();

// Imprime informações
PrintInfo();

// Aplica correção
ApplyDimmer(_pidOutput);

// Recupera temperatura atual e guarda como entrada para o PID
current = thermocouple.readCelsius();
_pidInput = current;

// Sai do laço (do) caso tenha chegado na temperatura ideal
}while (current<temp);

// Momento em que alcançou a temperatura final
start = millis();

// Enquanto estiver no momento de estabilidade
do
{
// Calcula o PID
_pid.Compute();

// Imprime informações
PrintInfo();

// Aplica correção
ApplyDimmer(_pidOutput);

// Recupera temperatura atual e guarda como entrada para o PID
current = thermocouple.readCelsius();
_pidInput = current;

```

```

_pidSetPoint = temp;

        // Calcula quanto tempo está no momento de estabilidade
        t = int((millis() - start) / 1000);

        // Sai do laço (do) caso tenha acabado o tempo de estabilidade
        }while (t <duration);
    }

// Aplica dimerização temporal usando intervalo de um segundo
voidApplyDimmer(doublevalue)
{
    // Tempo que a porta ficará ativa
    intactive = int(value * 1000);

    // Período ativo?
    if (active > 0)
    {
        // Ativa porta
        digitalWrite(DIMMER_PIN, HIGH);

        // Mantém período ativo
        delay(active);
    }

    // Período dormente?
    if (active < 1000)
    {
        // Desativa porta
        digitalWrite(DIMMER_PIN, LOW);

        // Mantém período inativo
        delay(1000 - active);
    }
}

// Imprime informações na porta serial e no LCD
voidPrintInfo()
{
    // Tempo total de execução, em milisegundos
    unsigned long time = millis() - _Start;
}

```

```
// Temperatura atual
double temperature = thermocouple.readCelsius();

// Imprime temperatura
Serial.print(int(time / 1000));
Serial.print('\t');
Serial.print(int(temperature));

// Imprime temperatura desejada
if (_pidSetPoint != -1)
{
    Serial.print('\t');
    Serial.print(int(_pidSetPoint));
    Serial.print('\t');
    Serial.print(int(_pidOutput * 100));
    Serial.print('% ');
    Serial.print('\r');
    Serial.print('\n');
}

// Imprime temperatura no LCD
lcd.setCursor(0,1);
int pos = lcd.print(temperature);
lcd.write((byte)0);
pos++;
lcd.print('C');
pos++;

// Apagua o restante da linha
for (; pos < 16; pos++)
    lcd.print(' ');
}
```

ANEXO D - Programa do controlador *ON/OFF*

```
// Programa : Controle temperatura para tratamentos térmicos ON/OFF  
// Autor : Edimilson Zambaldi (35) 9 9152-2926
```

```
//Inserção das bibliotecas  
#include <LiquidCrystal.h>  
#include "max6675.h"  
#include <math.h>  
#include <Wire.h>
```

```
// Inicialização de portas LCD  
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
```

```
// Símbolo de celsius para imprimir no LCD  
uint8_t degree[8] = {140,146,146,140,128,128,128,128};
```

```
// Inicializa termopar K  
MAX6675 thermocouple(13, 12, 11);
```

```
// Define porta para controle de temperatura  
const int DIMMER_PIN = 3;
```

```
// Tempo inicial de funcionamento  
unsigned long _Start;
```

```
// Variáveis de temperatura  
double _Ideal; // temperatura ideal  
double _Current; // temperatura atual  
bool _Heat; // forno ligado
```

```
// Configuração do Arduino  
void setup()  
{  
    // Inicializa portas  
    pinMode(DIMMER_PIN, OUTPUT);  
  
    // Inicializa comunicação serial  
    Serial.begin(9600);  
  
    // Inicializa LCD
```

```
lcd.begin(16, 2);
lcd.createChar(0, degree);
delay(500);

// Imprime cabeçalho na porta serial
Serial.print("time\tread\tideal\tcorrection\r\n");

// Imprime cabeçalho no LCD
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("CONTROLE FORNO 3");
lcd.noCursor();

// Recupera momento da inicialização
_Start = millis();
}

// Laço principal
void loop()
{
    // Aplica período T1, temperatura 550c, estabilizando por 1800 segundos
    SetTemperature(550, 1800, 0, 1064, 0.000007356, -1035, -0.00123);

    // Aplica período T2, temperatura 960, estabilizando por 1800 segundos
    SetTemperature(960, 1800, 0, 1064, 0.0000074, -1035, -0.001231);

    // Desliga aquecimento
    _Ideal = -1;
    ApplyDimmer();

    // Loop infinito
    while (1)
    {
        // Imprime informações
        PrintInfo();

        // Recupera temperatura atual
        _Current = thermocouple.readCelsius();

        // Aguarda até próxima impressão
        delay(1000);
    }
}
```



```

}

// Aplica uma temperatura 'temp' por um período 'duration' (segundos)
// Curva de aquecimento:  $k + a \cdot \exp^{(b \cdot t)} + c \cdot \exp^{(d \cdot t)}$ , onde 't' é o tempo
// decorrido desde o início da curva
void SetTemperature(double temp, int duration, double k, double a, double b,
double c, double d)
{
    // Momento inicial desse processo (não confundir com o _Start que
    // indica o momento inicial de todo o processo)
    unsigned long start = millis();

    // Momento 't'
    int t = 0;

    // Recupera temperatura atual
    _Current = thermocouple.readCelsius();

    // Enquanto não chegar na temperatura ideal
    do
    {
        // Calcula momento 't'
        t = int((millis() - start) / 1000);

        // Calcula melhor temperatura e guarda no PID
        _Ideal = k + a * exp(b * t) + c * exp(d * t);

        // Aplica correção
        ApplyDimmer();

        // Recupera temperatura atual
        _Current = thermocouple.readCelsius();

        // Sai do laço (do) caso tenha chegado na temperatura ideal
    } while (_Current < temp);

    // Momento em que alcançou a temperatura final
    start = millis();

    // Seta temperatura ideal
    _Ideal = temp;
}

```

```
// Enquanto estiver no momento de estabilidade
do
{
    // Aplica correção
    ApplyDimmer();

    // Recupera temperatura atual
    _Current = thermocouple.readCelsius();

    // Calcula quanto tempo está no momento de estabilidade
    t = int((millis() - start) / 1000);

    // Sai do laço (do) caso tenha acabado o tempo de estabilidade
} while (t < duration);
}

// Aplica dimerização
void ApplyDimmer()
{
    // Forno está ligado?
    if (_Heat)
    {
        // Porém temperatura atual está muito alta?
        if (_Current > (_Ideal + 20))
        {
            // Desliga forno
            _Heat = false;
        }
    }
    else
    {
        // Porém temperatura atual está muito baixa?
        if (_Current < (_Ideal - 20))
        {
            // Liga forno
            _Heat = true;
        }
    }

    // Imprime informações
    PrintInfo();
}
```

```

    // Grava na porta do forno
    digitalWrite(DIMMER_PIN, _Heat);

    // Aguarda
    delay(1000);
}

// Imprime informações na porta serial e no LCD
void PrintInfo()
{
    // Tempo total de execução, em milisegundos
    unsigned long time = millis() - _Start;

    // Imprime temperatura
    Serial.print(int(time / 1000));
    Serial.print('\t');
    Serial.print(int(_Current));

    // Imprime temperatura desejada
    if (_Ideal != -1)
    {
        Serial.print('\t');
        Serial.print(int(_Ideal));
        Serial.print('\t');
        Serial.print(_Heat ? "on" : "off");
        Serial.print('\r');
        Serial.print('\n');
    }

    // Imprime temperatura no LCD
    lcd.setCursor(0,1);
    int pos = lcd.print(_Current);
    lcd.write((byte)0);
    pos++;
    lcd.print('C');
    pos++;

    // Apaga o restante da linha
    for (; pos < 16; pos++)
        lcd.print(' ');
}

```