

**Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia Fluminense**

**Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à
Engenharia e Gestão**

DISSERTAÇÃO

**SISTEMA DE CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO PARA FORNOS
INTERMITENTES EM INDUSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**

YVES ROCHA DE SALLES LIMA

2018

Instituto Federação de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e
Gestão

SISTEMA DE CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO PARA FORNOS
INTERMITENTES EM INDUSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

YVES ROCHA DE SALLES LIMA

Sob orientação da professora
Alline Sardinha Cordeiro Morais

e coorientação da professora
Cristine Nunes Ferreira

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** no Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Área de Concentração em Sistemas Computacionais.

Campos dos Goytacazes, RJ
Maio de 2018

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

L732s Lima, Yves Rocha de
 Sistema de Controle de Alimentação para Fornos Intermitentes em
 Indústria de Cerâmica Vermelha / Yves Rocha de Lima - 2018.
 132 f.: il. color.

 Orientador: Alline Sardinha Cordeiro Morais
 Coorientador: Cristine Nunes Ferreira

 Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e
 Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado
 Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos
 Goytacazes, RJ, 2018.
 Referências: f. 119 a 125.

 1. Controle. 2. Modelagem Matemática. 3. Queima. 4. Cerâmica. I.
 Morais, Alline Sardinha Cordeiro, orient. II. Ferreira, Cristine Nunes,
 coorient. III. Título.

**Instituto Federação de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e
Gestão**

YVES ROCHA DE SALLES LIMA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** no Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Área de Concentração em Sistemas Computacionais.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA EM 24/05/2018

Nilo Américo Fonseca de Melo
Doutor em Ciências de Engenharia – IFF

Jonas Alexandre
Doutor em Ciências de Engenharia – UENF

Cristine Nunes Ferreira
Doutora em Física – IFF
(Coorientadora)

Alline Sardinha Cordeiro Morais
Doutora em Engenharia e Ciências dos Materiais – IFF
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por guiar os meus caminhos e tornar possível a realização dos meus objetivos, mesmo que pareçam difíceis de alcançá-los.

À minha família por se fazer presente e por me auxiliar nos momentos de indecisão.

À Maria, minha namorada, por seu companheirismo, paciência, incentivo e por me ouvir quando a ansiedade e a insegurança estiveram presentes.

À minha orientadora, Alline, pelas suas contribuições e incentivo que foram imprescindíveis para o alcance dos resultados deste trabalho. Nossas conversas, certamente, vão além desta pesquisa e contribuirão para minha formação pessoal e profissional. Meu sincero, muito obrigado.

À minha coorientadora, Cristine, por sua intensa colaboração para o desenvolvimento deste trabalho e pelo tempo dedicado em todas as reuniões para discussão dos resultados do trabalho. Meu sincero, muito obrigado.

Ao Rodolfo por disponibilizar do espaço da Arte Cerâmica Sardinha e de seu conhecimento para que o presente trabalho pudesse ser desenvolvido.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma e que torceram pelo meu sucesso na realização desta pesquisa que representa uma etapa importante da minha formação.

RESUMO

A indústria cerâmica no Brasil é caracterizada pelo baixo nível de automação aplicado em seu processo produtivo e pela mão de obra barata e desqualificada. Dentre os obstáculos observados para a implementação da automação nas cerâmicas brasileiras destaca-se o seu alto custo e a baixa qualificação da mão de obra no nível operacional. Um Sistema de Controle de Alimentação (SCA) simplificado para fornos intermitentes é proposto para que a queima seja mais homogênea, consuma menos combustível e, conseqüentemente, produza menos impactos ambientais. Outro fator importante é conhecer o comportamento da temperatura e como ela se relaciona com a umidade no interior do forno. Isto posto, o objetivo do presente trabalho é demonstrar o desenvolvimento da simulação e o comportamento do sistema SCA bem como a modelagem matemática que correlaciona a temperatura com a umidade. A simulação é feita utilizando a técnica *Hardware-in-the-loop*, onde a planta do sistema e a sua interação é recriada no Simulink do *Software* do Matlab através de diagrama de blocos e o sistema de controle é executado em um CLP através de uma lógica de controle. O resultado da modelagem permitiu afirmar que o modelo matemático desenvolvido se comporta como o sistema real e efetua o acoplamento entre temperatura e umidade. O comportamento da temperatura com o sistema SCA a partir da simulação comprova que o sistema se comporta de forma mais estável, linear e controlado e o gasto com combustível diminui consideravelmente quando comparado com o sistema real. O processo de simulação de sistemas é de fundamental importância nas indústrias, sobretudo a de cerâmica vermelha, para que seja possível conhecer como o sistema irá se comportar antes mesmo de ser executado na prática e assim evitar possíveis gastos desnecessários.

Palavras-Chave: Controle; Modelagem matemática; Queima; Cerâmica

ABSTRACT

The ceramic industry in Brazil is characterized by the low level of automation applied in its production process and by the cheap and low-skilled workforce. Among the obstacles observed for the implementation of automation in Brazilian ceramics, it is worth mentioning its high cost and the low qualification of the workforce at the operational level. A simplified Feed Control System (FCS) for intermittent kilns is proposed so that the firing is more homogeneous, consumes less fuel and, consequently, produces fewer environmental impacts. Another important factor is to know the temperature behavior and how it relates to the humidity inside the oven. Therefore, the objective of this paper is to demonstrate the development of the simulation and the behavior of the FCS system as well as the mathematical modeling that correlates the temperature with the humidity. The simulation is done using the hardware-in-the-loop technique, where the system plant and its interaction is recreated in the Simulink of Matlab Software through blocks diagrams and the control system is executed in a PLC through control logic. The result of the modeling allows to affirm that the developed mathematical model behaves like the real system and effects the coupling between temperature and humidity. The behavior of temperature with the FCS system from the simulation proves that the system behaves in a more stable, linear and controlled manner and the fuel expense decreases considerably when compared to the real system. The process of system simulation is of fundamental importance in the industries, especially of red ceramics, so that it is possible to know how the system will behave before even being executed in practice and thus avoid possible unnecessary expenses.

Key-words: Control; Mathematical modeling; Burn; Ceramic

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ANICER	Associação Nacional das Indústrias Cerâmicas
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
RCC	Rede Campos Cerâmica
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PI	Proporcional e Integral
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data acquisition</i>
MTU	Unidade Terminal Mestre
IHM	Interface Homem-Máquina
RTU	Unidade Terminal Remota
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada.
SCA	Sistema de Controle de Alimentação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Etapas do processo produtivo da indústria cerâmica	26
Figura 2- Forno intermitente de chama invertida	29
Figura 3- Esquema de Forno Contínuo tipo Túnel	30
Figura 4- Curvas de queima de um forno intermitente.....	34
Figura 5 - Sistema de controle em malha aberta	36
Figura 6 - Sistema de controle em malha fechada.....	37
Figura 7- Sistema de Primeira Ordem Com Realimentação.....	38
Figura 8- Função de Transferência de um Sistema de primeira ordem.....	38
Figura 9- Resposta a uma entrada degrau.....	38
Figura 10- Resposta a rampa unitária	39
Figura 11- Resposta ao Degrau Unitário de um sistema de segunda ordem	40
Figura 12- Resposta ao impulso unitário de um sistema de segunda ordem.....	40
Figura 13- Resposta ao Degrau Unitário com os termos especificados	41
Figura 14- Equação do controle On/Off	43
Figura 15- Controle Proporcional.....	43
Figura 16- Controle Proporcional Integral	44
Figura 17- Comparação entre o sistema sem controle e os controles, P, P.I. e P.I.D.....	45
Figura 18- Diagrama de um Inversor de Frequência.....	52
Figura 19- Arquitetura básica de um sistema SCADA.....	54
Figura 20 - Localização de São Sebastião	60
Figura 21- Localização da Arte Cerâmica Sardinha em São Sebastião	61
Figura 22- Forno Intermitente Cerâmica Vermelha	62
Figura 23- Termopares Instalados na Porta 1	64
Figura 24- Termopares instalados na Porta 2	65
Figura 25- Termopar instalado no Topo da Abóboda	65
Figura 26- Máquina de pó de serra conectada a uma das fornalhas	67
Figura 27- Modelo do SCA	68
Figura 28- C.L.P. Phoenix	69
Figura 29- Ambiente de programação Pc Worx Express	69
Figura 30- Criação do canal de comunicação entre Simulink e InTouch.....	70
Figura 31- Bloco Matlab Function	70
Figura 32- Função de leitura ddereq.....	71

Figura 33- Função de Escrita ddepoke	71
Figura 34- Configuração da Matlab Function do Parâmetro Kp	72
Figura 35- Configuração do driver de comunicação OPC	72
Figura 36- Configuração do IP no PC Worx Express	73
Figura 37- Variáveis no PC Worx Express que utilizam o protocolo OPC.....	73
Figura 38- Bloco OPC Config Real-Time	74
Figura 39- Configuração do Bloco OPC Config Real-Time	74
Figura 40- Configuração do OPC Toll	75
Figura 41- Bloco e configuração do OPC read.....	76
Figura 42- Bloco e configuração do OPC Write	76
Figura 43- Lógica de Controle no C.L.P.	78
Figura 44- Controle Feedback	80
Figura 45- Comportamento do sistema	80
Figura 46- Valor de tempo correspondente a 63,2% da resposta final.....	81
Figura 47- Código para obtenção da função de transferência e plotagem dos gráficos	82
Figura 48- Comparação Sistema real x Função de transferência	82
Figura 49- Identificação do tempo de acomodação.....	83
Figura 50- Código para obtenção da função de transferência de segunda ordem	84
Figura 51- Comparação do sistema real com função de transferência de 2º ordem.....	84
Figura 52- Comparação do sistema dos sistemas 1º ordem x 2º ordem	85
Figura 53- Diagrama de blocos principal	85
Figura 54- Diagrama de Blocos do Controlador	86
Figura 55- Obtenção de Valores de Ti e Td a partir do Kp, Ki e Kd	87
Figura 56- Obtenção do Setpoint proveniente do C.L.P para o InTouch	87
Figura 57- Leitura do Valor de Temperatura que sai da Planta e é levado para o C.L.P	88
Figura 58- Ação de controle lida do C.L.P e enviado ao Simulink para intereção com a Planta	89
Figura 59- Seleção Manual/Automático através de botoeira Virtual	90
Figura 60- Alarme de temperatura acima de 950°C	90
Figura 61- Tela principal da IHM	91
Figura 62- Tela principal com visualização dos parâmetros do TIC.....	92
Figura 63- Parâmetros do Controlador de temperatura	92
Figura 64- Comparação Temperatura real x modelo matemático	94
Figura 65- Queima 1	98

Figura 66- Queima 2.....	98
Figura 67-Queima 3.....	99
Figura 68- Comparação Queima 1x Modelo Matemático	100
Figura 69- Comportamento da Umidade no Modelo Matemático	101
Figura 70- Comparação Queima 2 x Modelo Matemático	102
Figura 71- Comportamento da Umidade no Modelo Matemático	103
Figura 72- Comparação Queima 3 x Modelo Matemático	104
Figura 73- - Comportamento da Umidade no Modelo Matemático	105
Figura 73- - Comportamento da Umidade no Modelo Matemático	105
Figura 74- Comportamento da Temperatura na Simulação 1	106
Figura 75- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 1	107
Figura 76- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 2.....	107
Figura 77- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 3.....	108
Figura 78- Comportamento da temperatura com o SCA.....	110
Figura 79- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 1	111
Figura 80- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 2.....	111
Figura 81- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 3.....	112
Figura 82- Comparação da temperatura no modelo matemático x SCA.....	113
Figura 83- Comparação da temperatura no modelo matemático x SCA.....	113

LISTA DE QUADROS

Quadro1- Características dos métodos de controle	25
Quadro 2- Principais defeitos e suas causas durante a queima.....	33
Quadro 3- Valores Usuais de α	35
Quadro 4- Vantagens e Desvantagens dos sensores de proximidade.....	47
Quadro 5- Principais Sensores analógicos.....	48
Quadro 6- Modelos e características das válvulas de controle.....	51
Quadro 7 - Controle e automação nas etapas do processo produtivo cerâmico	58
Quadro 8 - Parâmetros Modelo Matemático	95
Quadro 9- Parâmetros Caso 1.....	100
Quadro 10- Parâmetros Caso 2.....	100
Quadro 11- Parâmetros Caso 3.....	100
Quadro 12- Parâmetros Caso 1.....	102
Quadro 13- Parâmetros Caso 2.....	102
Quadro 14- Parâmetros Caso 3.....	102
Quadro 15- Parâmetros Caso 1.....	103
Quadro 16 - Parâmetros Caso 2.....	104
Quadro 17- Parâmetros Caso 3.....	104
Quadro 18 - Parâmetros do P.I.D	106
Quadro 19- Parâmetros do P.I.D.	110
Quadro 20- Custo dos Equipamentos do SCA	114

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo Principal.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	Justificativa.....	18
1.4	Metodologia.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Indústria Cerâmica.....	20
2.1.1	Industria Cerâmica no Brasil	20
2.1.2	Polo Ceramista de Campos dos Goytacazes	21
2.1.3	Processo Produtivo de Cerâmica Vermelha.....	23
2.1.3.1	Etapas do Processo Produtivo	25
2.1.4	Fornos Cerâmicos	28
2.2	Processo de Queima	31
2.3	Sistema de Automação Industrial	35
2.3.1	Malha Aberta	36
2.3.2	Malha Fechada.....	36
2.3.3	Sistemas Lineares Temporais	37
2.3.3.1	Sistemas de Primeira Ordem	38
2.3.3.2	Sistemas de Segunda Ordem	39
2.3.4	Técnicas de Controle	42
2.3.4.1	Controle <i>On/Off</i>	42
2.3.4.2	Controle P.I.D.....	43
2.3.5	Instrumentos de Controle.....	45

2.3.5.1	Sensores	45
2.3.5.2	Controladores	49
2.3.5.3	Atuadores.....	50
2.3.6	Sistema SCADA	53
2.4	<i>Hardware-in-the-loop</i>	54
2.5	Automação na Indústria Cerâmica	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	Descrição do Forno Intermitente tipo abóboda	60
3.1.1	Localização.....	60
3.1.2	Características Técnicas	61
3.2	Modelagem Matemática	62
3.2.1	Equações Diferenciais para o aquecimento de um forno	63
3.2.1.1	Para a Temperatura.....	63
3.2.1.2	Para a Umidade.....	63
3.3	Sistema de Controle.....	64
3.4	Simulação do processo utilizando a técnica <i>Hardware-in-the-loop</i>	68
3.4.1	Integração e Comunicação entre <i>Software's e Hardware's</i>	69
3.4.1.1	Integração e Comunicação InTouch x Simulink	70
3.4.1.2	Integração e Comunicação C.L.P. x Simulink	72
3.4.2	Lógica de Controle	77
3.4.3	Diagrama de Blocos	79
3.4.3.1	Obtenção da Planta do Sistema	80
3.4.3.2	Diagrama de Blocos no Simulink.....	85
3.4.4	Interface Homem-Máquina.....	91
4	RESULTADOS	94
4.1	O modelo do forno para a temperatura e umidade	94
4.1.1	Confirmação do modelo matemático através de cálculos	95

4.2	Comparação Modelo Matemático x Curva de queima real	97
4.2.1	Queima 1 x Modelo Matemático	99
4.2.2	Queima 2 x Modelo Matemático	101
4.2.3	Queima 3 x Modelo Matemático	103
4.3	Comportamento do sistema de controle de alimentação	105
4.3.1	Simulação 1	106
4.3.2	Simulação 2	110
4.4	Comparação Sistema de Controle SCA x Modelagem Matemática.....	112
4.5	Custos do projeto	114
5.	CONCLUSÃO.....	115
	REFERÊNCIAS	118

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A cerâmica se configura como uma das principais atividades industriais no Brasil, sendo o 2º maior produtor de revestimento cerâmico bem como o 2º maior mercado consumidor do mundo estando atrás apenas da China. Ademais, nos últimos anos, o Brasil ultrapassou mercados importantes e tradicionais como Itália e Espanha (ANICER, 2017)

Dentre os tipos de materiais cerâmicos existentes, o que possui maior número de produtores, cerca de 6903 indústrias, é o ramo da cerâmica vermelha, ou cerâmica estrutural, que utiliza a argila como matéria-prima e engloba produtos como tijolos e blocos estruturais principalmente. Tal ramo industrial não possui um desenvolvimento tecnológico muito avançado sendo em sua maioria empresas de micro, pequeno e médio porte (ANICER, 2016).

Para que sejam implantadas novas tecnologias no setor cerâmico é necessária a quebra de algumas barreiras que impedem o seu desenvolvimento. As dificuldades enfrentadas são muitas, no entanto, algumas possuem um destaque quando se remetem ao ramo das cerâmicas. Por serem empresas de pequeno a médio porte, em sua maioria, o seu processo produtivo é bastante artesanal e defasado não ocorrendo controle das principais variáveis de forma automática, sendo todo o processo gerido manualmente com base na experiência da mão de obra utilizada (Braga, Santos, & Sales, 2016).

Desta forma, a qualidade do produto final pode ser afetada pela não linearidade das condições em cada etapa do processo produtivo ou até mesmo na própria etapa, assim a produção de um lote de peças para outro pode haver diferenças significativas e até mesmo não atenderem as especificações técnicas exigidas pelas normas.

Outro fator que é visto como obstáculo para implementação de um melhor controle do processo, através de sua automação, é o custo elevado que traz o desenvolvimento do projeto de controle e a sua execução. As cerâmicas mesmo possuindo produtos de baixo valor agregado até veem nessa estratégia uma forma de melhorar a qualidade da sua produção e assim aumentarem o seu mercado consumidor. No entanto, na sua grande maioria, não possui aporte financeiro para efetuar tais modificações no processo produtivo.

Essas dificuldades também são encontradas no polo ceramista da cidade de Campos dos Goytacazes situada ao norte do estado do Rio de Janeiro. Segundo (Rocha & Palma, 2012), grande parte das cerâmicas da região apresentam baixa capacidade de inovação, seja na parte de produto, processo e gestão. Os principais fatores para tal acontecimento são

principalmente a falta de profissionalização da mão de obra, como já mencionado, além da falta de visão inovadora por parte dos proprietários, visto que o seu processo já “funciona” daquela forma há anos.

Para que essas dificuldades sejam superadas são necessárias algumas ações por parte dos ceramistas. A primeira delas é o treinamento e profissionalização da mão de obra, outra medida importante é a melhoria do processo produtivo estabelecendo a automação e o controle do sistema. Tais medidas requerem tempo e principalmente recursos financeiros. Desta forma, devem ser priorizadas etapas do processo produtivo que interfiram diretamente no produto final, além de utilizar alternativas de baixo custo para implementação do controle do processo.

A etapa do processo produtivo que pode ser considerada como crítica, e assim priorizada quando se trata de efetuar o controle, é a queima, pois é nela que são conferidas às peças suas características técnicas e estéticas finais através da sinterização que geram transformações físico-químicas no material cerâmico. Desta forma, se não controlada corretamente o lote final pode apresentar características fora dos padrões de qualidade e com coloração irregular (Paiva Filho, Agostinho, Júnior, Bezerra, & Aquino, 2004).

Além do problema com a qualidade tem-se o problema energético, a queima é a etapa do processo produtivo que gera o maior custo de energia, seja através da queima da lenha ou gás nas fornalhas (energia térmica) ou da energia elétrica para energizar os motores, trocadores de calor e demais instrumentos. No Brasil, cerca de 30% do custo total de uma cerâmica é proveniente da queima, principalmente nos fornos intermitentes devido a sua grande perda de calor e aquecimento irregular (Nassetti, 2010; Sposto, Medeiros, Ramos, Naya, & Moraes, 2007).

Desta forma, e com todos impasses financeiros e estruturais encarados pelo setor cerâmico, deve ser priorizada a etapa crítica do processo que é a queima e utilizar de alternativas para melhoria do processo produtivo em níveis intermediários de automação, opções que sejam simples, de fácil implementação, manutenção e que resultem em uma melhoria direta no processo produtivo, sendo implementadas fundamentalmente para uma automatização e controle das variáveis de máquina (nível 2) e das variáveis de processo (nível 3) encontradas em (Gasch, 2007).

1.2 Objetivos

Para uma melhor compreensão dos objetivos desse trabalho, eles são divididos em objetivo principal e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Principal

Esta pesquisa tem como principal objetivo projetar, desenvolver e simular um sistema de controle de alimentação simplificado para fornos intermitentes em indústrias de cerâmica vermelha.

1.2.2 Objetivos Específicos

Diante do objetivo principal desdobram-se alguns objetivos secundários, como:

- Desenvolver uma modelagem matemática que relaciona a temperatura no interior do forno intermitente cerâmico com a umidade do material;
- Desenvolver simulação do sistema de controle de alimentação e comparar o seu comportamento com a queima atual;
- Evidenciar a melhoria da eficiência do processo de combustão, reduzindo a quantidade de combustível queimado e diminuindo conseqüentemente o custo de geração de energia.
- Orçar e analisar os custos envolvidos no desenvolvimento e implementação do sistema.

1.3 Justificativa

A principal justificativa dessa pesquisa é de exercer ao processo de queima um melhor controle da temperatura e assim levar uma maior linearidade ao processo, desta forma, gerar uma melhoria da qualidade do produto final cerâmico através do desenvolvimento de um sistema de controle de simplificado para a etapa crítica do processo produtivo, a queima, pois é nessa fase onde são conferidas as peças suas características técnicas e estéticas finais.

Esta etapa se configura como uma das mais onerosas de todo processo produtivo, em função do gasto com combustível, ficando atrás somente do custo com mão de obra. Portanto, sob a perspectiva de custo de produção, o trabalho em questão também se justifica pela possibilidade de redução no gasto energético durante a etapa de queima, uma vez que um maior controle neta etapa implicará em um consumo mais otimizado da lenha.

Desta forma, controlando a queima além de engendrar produtos com maior qualidade, podendo assim expandir o seu mercado consumidor. O gasto excessivo com combustível, seja ele lenha ou gás, é reduzido abrindo espaço para o investimento em outras etapas do processo produtivo.

Outra vantagem associada ao controle da queima se dá na redução dos impactos ambientais que são gerados nesta etapa, pois com um melhor aproveitamento do combustível utilizado, principalmente a lenha, que ainda hoje é a principal matriz energética das cerâmicas, reduz-se a sua aplicação, sendo empregado de uma forma mais racional e controlada, além de reduzir a liberação de gases poluente provenientes da queima já que são liberados ao ambiente sem o tratamento adequado.

1.4 Metodologia

O método utilizado para desenvolvimento do trabalho envolve cinco etapas. A primeira etapa é a de coleta de dados e informações do forno em que a pesquisa foi realizada para desenvolvimento da modelagem matemática do mesmo e análise de sua atual eficiência de queima.

Na segunda etapa, foi elaborada uma pesquisa bibliográfica para identificar os principais gargalos e deficiências no processo produtivo cerâmico e também para definir qual a melhor estratégia de controle a ser efetuada.

Com base nos estudos realizados identificou-se que com a utilização dos termopares instalados ao longo do forno em vários pontos para verificação da temperatura interna do forno. Tais termopares em comunicação com um controlador lógico programável executando a ação de controle através de um inversor de frequência acoplado a uma máquina de pó de serra onde o mesmo ficará estocado. A máquina efetuará a rotação de uma pá para que o combustível seja jogado para o interior da fornalha e controle a temperatura de queima e da mesma forma um soprador de ar foi controlado afim de gerar a melhor relação de combustível e comburente.

A próxima etapa, a terceira, envolve o desenvolvimento de uma modelagem matemática que relaciona a temperatura no interior do forno com a umidade e efetuar a simulação do sistema de controle, previamente desenvolvido com base nas informações da segunda etapa, utilizando a técnica *hardware-in-the-loop*, assim verificar o comportamento do mesmo em comparação com o sistema atual indicando as melhorias fornecidas pelo sistema de controle tanto para a queima quanto para a redução de gastos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são evidenciados conceitos teóricos relacionados à Indústria cerâmica, processo de queima, sistemas de automação industrial e a automação na indústria cerâmica. Tais conceitos foram fundamentados em trabalhos, pesquisas científicas e livros para melhor entendimento deste trabalho.

2.1 Indústria Cerâmica

Cerâmica vem da palavra grega *keramikos* que significa matéria-prima queimada, assim por definição, são materiais que necessitam de um processo de queima para adquirir as características desejáveis. Os materiais cerâmicos são compostos formados por pelo menos dois materiais, em sua grande maioria um metálico e um não metálico, e possuem características inorgânica e não metálicas sendo a argila a principal matéria-prima da cerâmica dita tradicional, que engloba louças, porcelanas, tijolos, telhas e azulejos (Callister, 2002).

Segundo Harper (2001), as cerâmicas são de natureza cristalina, com uma escassez de elétrons livres. Eles têm uma alta resistividade elétrica, são muito estáveis, quimicamente e termicamente, e têm um ponto de fusão elevado e podem existir como óxidos, nitretos, carbonetos ou silicetos, desta forma possui uma alta resistência mecânica, sendo usualmente duros, no entanto, frágeis e suscetíveis a fratura.

2.1.1 Indústria Cerâmica no Brasil

Setores da Indústria ganharam muita força com o desenvolvimento da economia do Brasil e com a indústria cerâmica não foi diferente. Nos últimos anos a produção de produtos cerâmicos aproximadamente dobrou no Brasil, se tornando o segundo maior produtor mundial e também o segundo maior mercado consumidor, outro país que se destaca é a Espanha que como o Brasil concebem produtos diferenciados dos demais países (ANICER, 2017)

Segundo a ANICER (2016), o Brasil possui 6903 fábricas de cerâmicas vermelhas, desse total 4346 são indústrias de blocos e tijolos, 2547 de Telhas e 10 de tubos, onde geram um faturamento total de 18 bilhões de Reais, com 293 mil empregos diretos e 900 mil empregos indiretos. Outro dado importante é que a indústria da cerâmica vermelha representa 90% das coberturas e alvenarias construídas no Brasil além de ser 4,8% da indústria da construção civil.

A produção mensal do setor da cerâmica vermelha no Brasil chega em média a 3500 milheiros desta forma a produtividade de cada trabalhador permanece em torno de 18,3

milheiros por mês, o que gera uma produção de 31,1 toneladas por mês. A grande concentração das indústrias de cerâmica vermelhas está nas regiões Sul e Sudeste com destaque para o Rio Grande do Sul, São Paulo e Paraná que juntos produzem cerca de 40% da produção total do país (Henriques Jr & Rodrigues, 2017).

Um dos grandes problemas enfrentados pela indústria cerâmica são os impactos ambientais causados durante todo o processo de produção. Tais impactos provém da extração da matéria-prima, desmatamento para a produção de lenha que serve como combustíveis para os fornos que gera a poluição do ar através da queima (Silva, 2011).

Além dos fatores ambientais temos a questão econômica e cultural do setor. Grande parte das indústrias de cerâmica vermelha são de micro e pequenas empresas que usualmente apresentam dificuldades devido a administração informal do negócio e sua natureza familiar. Desta forma pode-se criar algumas dificuldades para obtenção de créditos, licenças ambientais, competição no mercado e qualidade dos produtos (Henriques Jr & Rodrigues, 2017).

2.1.2 Polo Ceramista de Campos dos Goytacazes

Localizada na região sudeste, mais precisamente no norte do estado do Rio de Janeiro, Campos dos Goytacazes, é a maior produtora de blocos de vedação do Brasil e a segunda maior produtora de tijolos do Brasil. Os principais mercados consumidores do polo ceramista campista são as cidades do Grande Rio, Sul Fluminense, Zona da Mata Mineira e Espírito Santo (Ramos, Alves, & Alexandre, 2006; Ribeiro, 2008).

Segundo a Rede Campos Cerâmica (2016), também conhecida como R.C.C., existem hoje cerca de 116 cerâmicas em Campos com uma capacidade de produção de 96 milhões de tijolos por mês, no entanto, devido à dificuldades financeiras que assolam o setor cerâmico, são produzidos 50 milhões de tijolos por mês, circulando uma renda de aproximadamente 11 milhões de reais por mês. Outro fator relevante é a quantidade de empregos diretos gerados pelo setor: por volta de 2000 pessoas vivem da atividade cerâmica na região. O Apêndice A mostra a lista de todas as cerâmicas ativas em Campos dos Goytacazes.

A R.C.C. uma rede de indústrias cerâmicas localizada em Campos que foi criada para criar uma cooperação entre as empresas da região, que visa melhorar os seus processos através da troca de informações, conhecimentos, além de estabelecer inter-relações de compras e vendas.

Um fator fundamental para o desenvolvimento da atividade cerâmica na região de Campos dos Goytacazes se dá principalmente por sua localização próxima às jazidas de argila. Segundo Almeida, Petrucci, Pessanha, Paixão, & Maia (2010) a argila encontrada na região possui propriedades caulínicas que através da composição química se mostrou ideal para produtos da cerâmica vermelha além de obter valores exigidos dentro da norma.

Não obstante, segundo Vieira, Holanda, & Pinatti (2000), são encontrados dois tipos de argilas em campos, uma argila “gorda” em camadas mais inferiores e uma argila “magra” em camadas superiores e tais argilas são misturadas de forma empírica em uma proporção 1:1 para se obter uma melhor composição.

A argila encontrada no norte-fluminense, quando utilizadas sem algum tipo de mistura não oferece condições para uma estrutura cerâmica bem consolidada quando queimadas a temperaturas de 900°C, por ser extremamente refratária, desta forma é necessário misturar com agentes com alto teor de óxidos alcalinos para diminuir a porosidade em temperaturas abaixo de 100°C. Tal fator não interfere diretamente para a produção de tijolos mas que para a produção de telhas é requerido a adição de fluxantes (Alexandre *et al.*, 2014).

Sabe-se que se misturar as argilas encontradas em Campos com as argilas das demais jazidas do estado, principalmente a de Itaboraí, Localizada no Grande Rio, resulta em produtos melhorados do que se utilizar apenas a argila local de Campos (Babisk, Ribeiro, Monteiro, & Vieira, 2014).

Ainda que a argila empregada na região tenha propriedades para produzir produtos dentro das normas, a qualidade do material ainda deixa um pouco a desejar devido principalmente a falta de padronização e controle das etapas do processo produtivo e pela estrutura organizacional das empresas da região, que possuem baixa capacidade para inovação limitando assim seu crescimento e a qualidade dos seus produtos.

A cultura dos proprietários e de todos envolvidos no setor dificultam a predisposição a inovação devido à falta de profissionalização da mão de obra, falta de visão inovadora, baixa cooperação interorganizacional e falta de incentivos e programas para auxiliar essas empresas a investir em inovação mesmo que existam oportunidades de crescimento no desempenho empresarial. Ainda que tais problemas citados sejam uma dificuldade para o desenvolvimento da indústria cerâmica na região, o principal deles ainda continua sendo a mão de obra sem qualificação, para que se diminua essa adversidade, são necessários investimentos em treinamentos e melhor remuneração do pessoal (Rocha & Palma, 2012).

O processo produtivo encontrado nas cerâmicas de Campos dos Goytacazes ainda é bastante artesanal com poucas cerâmicas que detêm uma maior tecnologia empregada. Com a relação ao processo de secagem de todas as cerâmicas apenas 3 possuem estufas, todas as outras secam ao ar livre.

Os fornos utilizados variam sendo em sua maioria o forno tipo Hoffman, ainda se encontram o Caieira, Túnel, Vagão, câmara e abóboda. Há uma disparidade tecnológica muito acentuada na indústria cerâmica campista, de um lado tem-se a grande maioria que trabalha com sistemas rudimentares e do outro lado tem-se as grandes cerâmicas, detentoras dos processos produtivos mais avançados (Ramos *et al.*, 2006).

2.1.3 Processo Produtivo de Cerâmica Vermelha

A cerâmica vermelha é aquela que trabalha com materiais predominantemente utilizados na construção civil, como blocos, tijolos, telhas e é usualmente conhecida como cerâmica estrutural. A cor avermelhada dos materiais é devido a presença de compostos ferrosos em sua composição (SEBRAE, 2015).

No Brasil existem vários ramos industriais que se destacam, seja pelo alto valor agregado ou pela quantidade de produtos comercializados. Um desses ramos industriais em destaque é a cerâmica vermelha.

Este setor é encontrado em todo o Brasil, no entanto se concentra em sua maioria na região Sul e Sudeste, regiões essas que possuem maior densidade demográfica, alta atividade industrial e melhor distribuição de renda, facilitando assim o desenvolvimento da indústria cerâmica pois grande parte das unidades produtivas são próximas aos mercados consumidores, sendo em sua grande maioria organizações simples e familiar (Prado & Bressiani, 2013; Rocha & Palma, 2012).

Sendo assim, a grande preocupação por parte dos ceramistas na melhoria do desempenho na indústria cerâmica é a qualificação da mão de obra, já que são trabalhadores com baixa escolaridade e com necessidade de capacitação para uma melhoria na performance. Aliado a mão de obra como fator chave para evolução do desempenho está o apoio do governo aos ceramistas, seja com projetos para ajudar a desenvolver os micro e pequenos negócios, seja com melhoria na infraestrutura da região (Rocha & Palma, 2012).

O desenvolvimento da cerâmica vermelha nos dias atuais é de vital importância para a sobrevivência e competição no mercado, grande parte das cerâmicas no Brasil são artesanais, com processos produtivos, métodos e sistemas defasados, com pouquíssima

inovação tecnológica e inexistindo qualquer tipo de controle de qualidade dos seus produtos. Com isso gera-se problemas muito graves de desperdício, desta forma as que possuem algum tipo de melhoria em seu processo, como controle de alguma etapa do processo, já dão um pulo de qualidade no seu produto final e conseqüentemente no mercado, isso ocorre normalmente nas cerâmicas de médio e grande porte (Braga *et al.*, 2016).

Segundo Martín (2004), o processo em uma indústria cerâmica deve ser controlado em sua totalidade, não apenas em uma etapa ou processo específico, pois em cada etapa, desde a retirada da matéria-prima até o produto final, o produto adquire características específicas. Se não forem controladas podem gerar propriedades nos produtos que vão se suceder nas demais etapas até o produto final. Desta forma o controle do processo cerâmico deve ser contínuo de forma a alcançar um produto dentro das normas especificadas.

Para que isso ocorra é necessário uma mudança de mentalidade por partes dos donos do processo produtivos e também pelos próprios funcionários, ou seja, deve haver uma mudança cultural dentro do setor cerâmico (Braga *et al.*, 2016).

Segundo Teixeira, Melchades, & Boschi (2002), os principais métodos de controle em uma indústria cerâmica tem o mesmo objetivo: manter as características finais do produto dentro das especificações, no entanto, cada um busca alcançar esse objetivo de uma forma diferente. Dentre os métodos mais conhecidos pode-se citar o fixo, semiflexível, flexível e bombeiro.

O método fixo visa reduzir as variações das características da matéria-prima, assim com ela constante, a formulação da massa e as circunstâncias de processamento podem ser fixadas de forma a garantir a máxima qualidade do produto e eficiência do processo. No entanto, para que a matéria-prima permaneça com características constantes, é necessário uma apropriada prospecção da jazida gerando um alto custo e portanto se tornando inviável para a grande parte dos ceramistas devido ao baixo valor agregado do produto.

O método semiflexível adota uma caracterização da matéria-prima e formulação da massa de modo a compensar possíveis variações das propriedades das mesmas, já as circunstâncias de processamento são mantidas constantes com o objetivo de aumentar a qualidade do produto final, rendimento do processo e reduzir os custos de produção. Este método é empregado e muito efetivo em situações onde a massa é composta de duas ou mais matérias-primas (argilas), no entanto, em processos que possuem apenas um tipo de argila a aplicação deste método fica prejudicado.

Outro método de controle muito utilizado é o flexível, nesse método o além da matéria-prima, também há o ajuste das condições de processamento visando compensar possíveis falhas das mesmas.

Por último tem-se o método bombeiro caracterizado pela verificação das características apenas do produto final, ou seja, quando as peças já estão saindo do forno e possuem defeitos que inviabilizam sua comercialização. Com isso, em uma nova queima é alterada a composição da massa ou as condições de processamento a partir da experiência dos profissionais, o que gera um pobre controle de qualidade, reduzindo apenas a níveis aceitáveis a qualidade do produto final.

Desta forma não se consegue otimizar as condições de processamento e a variação das características das peças geradas é muito grande, no entanto diminui-se consideravelmente o gasto com a caracterização das jazidas. O método bombeiro é indicado em cerâmicas onde a característica da matéria-prima varia muito pouco (Teixeira *et al.*, 2002). Um resumo com a comparação de todos os métodos de controle pode ser visto no quadro 1.

Quadro1- Características dos métodos de controle

Método de Controle do Processo	Características da Matéria-Prima	Composição da Massa	Condições de Processamento	Características do Produto Final
Fixo	Fixas	Fixa	Fixas	Constantes
Semiflexível	Avaliadas	Ajustada	Fixas	Constantes
Flexível	Avaliadas	Ajustada	Ajustada	Constantes
Bombeiro	Variáveis	Ajustada	Ajustada	Avaliadas

Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2002)

2.1.3.1 Etapas do Processo Produtivo

O processo produtivo da cerâmica vermelha se divide em 4 grandes etapas: preparação da massa, formação das peças, secagem, queima e em alguns casos acabamento e esmaltação. O processo como um todo pode ser melhor visto na figura 1.

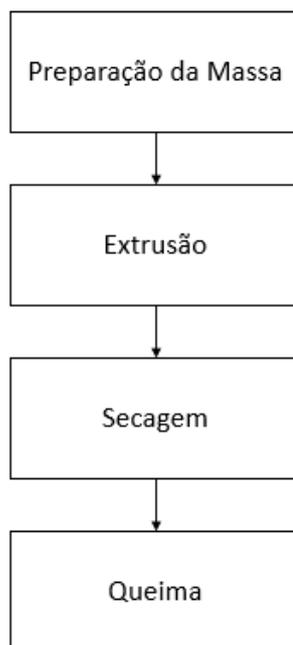


Figura 1- Etapas do processo produtivo da indústria cerâmica vermelha
Fonte: Adaptado ABCERAM (2016)

A primeira etapa do processo produtivo da cerâmica vermelha visa preparar a massa para uso na indústria cerâmica. A matéria-prima utilizada é encontrada em sua forma natural em grandes jazidas e se colocadas diretamente para fabricação dos materiais podem ocasionar sérios problemas de qualidade no processo e no produto. Para que seja feita uma boa preparação da massa a argila devem ser desintegradas, ou seja, quebradas em pequenos pedaços, logo após precisam ser homogeneizadas onde será feito uma moagem e mistura da argila e por último misturadas e laminadas. Somente com uma preparação adequada da massa problemas comuns durante o processo, como trincas, deformações e variações no processo de extrusão, podem ser minimizados e até mesmo evitados (Tubino, 2006)

A próxima etapa é a da Extrusão, no qual a massa preparada anteriormente passa por um processo de conformação plástica, que irá gerar o formato do produto. Dentre os fatores que podem atrapalhar na extrusão os principais são o molde utilizado (boquilha), a qualidade da extrusora e a composição e preparação da massa (Wieck & Fh, 2013).

Na extrusão a massa deve ser menos viscosa do que nos outros métodos citados pois ela é forçada através de uma matriz (Harper, 2001), matriz essa que possui uma câmara de alta pressão com um sistema de desaeração à vácuo e um molde, também chamada de boquilha, por onde a massa é forçada a passar e assim toma sua forma desejada. A perfeita conformação de um bloco se dá com base em um molde com as dimensões centralizadas para

que ocorra uma retração média da massa e assim com pouca deformação, variação estreita do teor de água e corte preciso (Tubino, 2006).

Segundo a ABCERAM (2016), a terceira etapa, a secagem, envolve a perda de água das massas já extrudadas (blocos) através da evaporação da água contida nas massas. Esse processo ocorre de forma lenta e pode ser feito ao natural ou por equipamentos chamados secadores, intermitentes ou contínuos, que alcançam temperaturas de 50°C até 150°C.

Uma peça cerâmica é considerada seca quando a umidade remanescente permanece entre 1% e 2%. Quando a secagem é feita muito rapidamente a peça também se contrai de uma forma mais rápida, desta forma podem ocorrer trincas, deformações e até mesmo estouros e rupturas se tiver a ocorrência de ar no diluído no interior da peça (Tubino, 2006).

A última, mais importante e mais delicada etapa do processo produtivo, é a queima. Na maioria dos casos, somente nesta etapa, que muitos problemas estruturais e estéticos que vem de etapas anteriores se revelam. A queima nada mais é do que expor as peças previamente conformadas e secas a uma dada temperatura para que ela obtenha as características técnicas desejadas (Tubino, 2006).

Esta etapa pode ser feita de duas formas distinta, através de uma queima (Monoqueima), onde logo após a secagem o bloco é queimado e em seguida é classificado ou através de duas queimas (Biqueima), onde é realizada uma primeira queima, posteriormente ocorre uma esmaltação dos blocos e somente após é feita uma segunda queima e finalizado o processo (Martín, 2004). O processo da queima e suas propriedades pode é evidenciado de uma forma mais profunda na seção 2.2.

São vários os combustíveis utilizados para queima do produto cerâmico, dentre os combustíveis sólidos podemos citar o pó de serra, carvão e a lenha que é o mais empregado nas cerâmicas do Brasil. Como combustíveis gasosos tem-se o gás natural que com o decorrer dos anos revela-se como uma boa alternativa a lenha principalmente por ser um combustível mais fácil de ser controlado e com menos impactos para o meio ambiente, porém demanda de altos investimentos e incentivos para a instalação. Como opções para alimentar a queima também temos os combustíveis líquidos, querosene e óleo, que em comparação com os demais são menos utilizados (Silva, 2011)

Um fator relevante quando se trata da queima é o custo energético gerado por essa etapa, sendo a que mais consome energia e por tanto onde se tem a maior despesa financeira em todo processo produtivo. No Brasil cerca de 30% do total dos custos energéticos é

proveniente da queima sendo desse total um terço gastos com energia elétrica e dois terços com energia térmica, como comparação, na Itália esse custo chega a 20%. Uma medida que pode ser tomada para que esse custo diminua é a troca dos fornos que consomem muita energia no entanto tal medida é muito cara e inviável para a grande parte dos ceramistas (Nassetti, 2010).

2.1.4 Fornos Cerâmicos

O coração do processo produtivo cerâmico são os fornos e existem dois tipos principais, os fornos intermitentes e os contínuos. Os fornos intermitentes são os mais comuns e mais utilizados na indústria de cerâmica vermelha no Brasil e podem ser encontrados em sua maioria em 4 tipos: caieira, chama reversível, abóboda e plataforma. Eles têm como característica principal a obrigatoriedade de parada da produção para carga e descarga, ou seja, em cada fornada o processo deve parar para a retirada e colocação de novos blocos (Paiva Filho *et al.*, 2004).

O funcionamento de um forno intermitente consiste basicamente em uma câmara construída de tijolos de alvenaria onde as fornalhas são colocadas nas partes laterais podendo ter de 4 a 6 fornalhas. O piso possui fendas chamadas de crivos por onde o calor sai e vai para os aquecedores e chaminés. Normalmente, os métodos de produção das cerâmicas que utilizam esse tipo de forno, são fundamentados na experiência dos trabalhadores que os operam. Desta forma é comum que o desempenho de uma queima para outra seja muito diferente, podendo ter diferenças significativas tanto no gasto energético quanto no tempo empregado em cada fase do processo e principalmente no produto final (Messias, 1996). Um exemplo de um forno intermitente pode ser visto na figura 2.

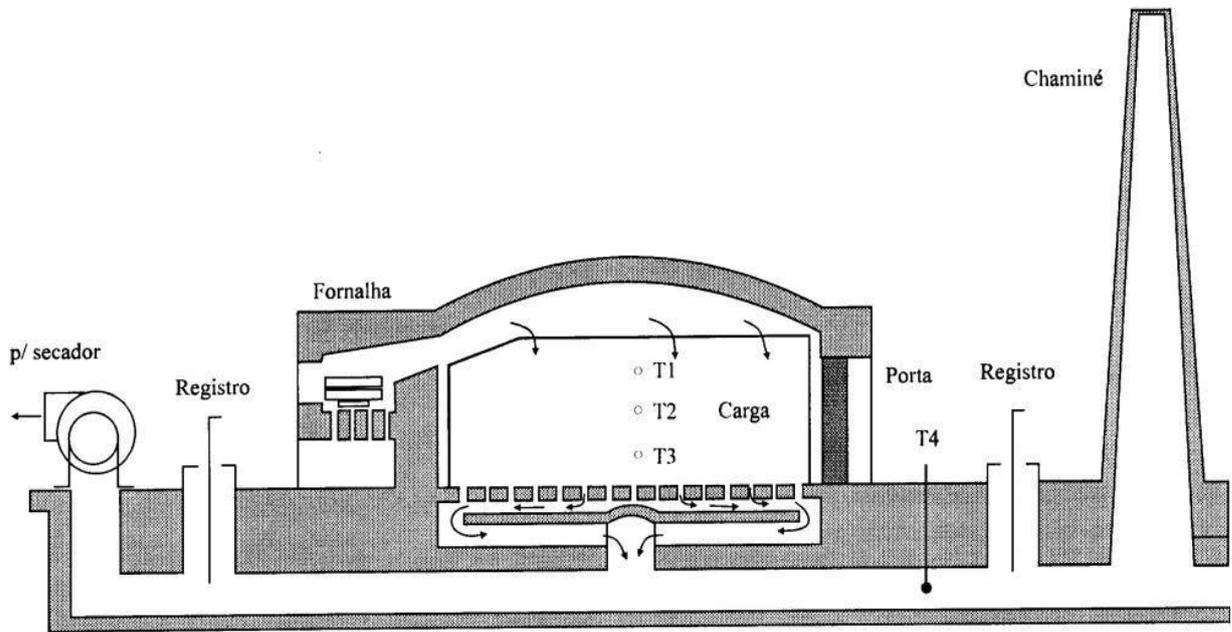


Figura 2- Forno intermitente de chama invertida
Fonte: Messias (1996)

Os fornos intermitentes tipo caieira e abóboda se diferenciam basicamente na perda de calor, onde o forno caieira possui uma abertura na parte superior resultando em uma perda de calor de duas a três vezes mais que a abóboda, acarretando assim um aumento do custo do processo produtivo e do impacto ambiental já que grande parte do combustível utilizado nesses tipos de fornos é a lenha. Mesmo com essas diferenças de rendimento térmico ambos os fornos produzem peças como características termo físicas, mecânicas e geométricas semelhantes (Silva, 2011).

Segundo Sposto *et al.* (2007), as principais vantagens na utilização de um forno intermitente se dá pelo fato de ser um forno simples no que diz respeito a sua concepção, construção, operação e manutenção, requer pouco espaço para a sua instalação, o custo associado a ele é muito baixo, possui flexibilidade na produção tendo maior adaptação a variação do mercado. Como desvantagens, o forno intermitente apresenta um baixo rendimento térmico, pois há uma grande perda de calor, seu aquecimento é irregular e não uniforme em toda extensão do forno e há a necessidade de vários operadores e dificuldade em automatizá-lo.

O outro tipo de forno é o contínuo onde a queima é realizada sem interrupções, ou seja, em seu processo, eles podem funcionar por longos períodos de tempos sem que haja necessidade de interromper a produção. Os mais comuns tipos de fornos contínuos utilizados

na indústria cerâmica são o forno Hoffman e Túnel, este último o mais utilizado dentre os fornos contínuos, sobretudo nas indústrias cerâmicas de grande porte por apresentarem boas condições para o controle de algumas variáveis do processo como a temperatura dos gases (Paiva Filho *et al.*, 2004). O funcionamento de um forno contínuo tipo túnel ocorre pela união de três secções: preaquecimento, queima e resfriamento.

O transporte das peças é feito através de uma vagoneta ou esteiras onde entram pela secção de preaquecimento, que é a área mais longa do forno, logo após ele passa pela secção da queima onde alcançará as maiores temperaturas e onde ficam localizados os queimadores e por fim passam pelo resfriamento, esse processo pode levar de 16 a 48 horas, dependendo do forno e das características da peça que se quer produzir. Para uma melhor eficiência o ar quente que sai do resfriamento é reaproveitado na queima e os gases que saem da zona de queima são direcionados a zona de preaquecimento (Santos, 2001), como pode ser visto na figura 3.

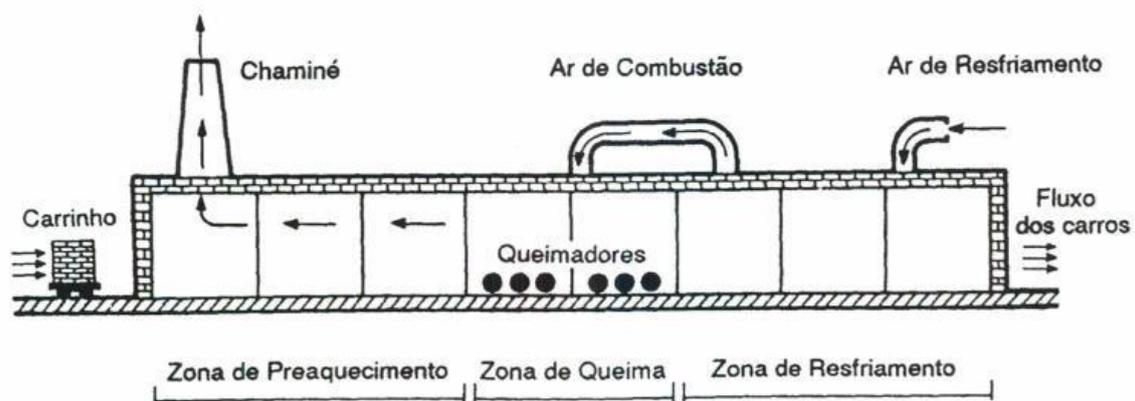


Figura 3- Esquema de Forno Contínuo tipo Túnel
Fonte: Henriques Jr (1993)

Segundo Santos (2001), as principais vantagens no uso de um forno contínuo é que ele possui menor consumo específico, aquecimento mais homogêneo, oferece um melhor controle dos gases e reaproveitamento dos gases da exaustão além uma maior facilidade na automatização da produção. Como desvantagens tem-se a complexidade de concepção do forno, com uma construção mais demorada e de custo mais elevado do que a dos intermitentes, além de possui menor flexibilidade da produção e longas paradas do processo para manutenção.

Comparando o funcionamento de um forno contínuo tipo túnel com um forno intermitente nota-se que, no primeiro o processo toma lugar no comprimento (espaço) já o

segundo toma no tempo, ou seja, enquanto um as etapas dentro do forno são controladas de acordo com a posição em que se encontra a peça no seu interior, no outro o fator crucial é o tempo de queima apenas pois as peças permanecem paradas dentro do forno (Nicolau, 2012).

Mesmo com essas diferenças as curvas de queima de ambos os fornos são muito parecidas, embora cada forno e cada produto queimado tenha suas próprias características e que devem ser consideradas durante a operação. Desta forma, é possível estabelecer uma relação entre o comprimento do forno túnel e o tempo de queima em um forno intermitente, partindo do pressuposto que em ambos que o ciclo de queima levem o mesmo tempo (Nicolau, 2012).

2.2 Processo de Queima

A queima é uma das principais etapas do processo produtivo do material cerâmico, é nesta etapa que é concedido as propriedades físico-químicas ao produto e desta forma suas características técnicas finais e estéticas (coloração), além de ser a etapa que tem o maior gasto energético e conseqüentemente financeiro e assim a que melhor deve ser controlada (Gasch, 2007).

No processo de queima dos produtos de cerâmicos, seja por qualquer combustível e em fornos diversos, a distribuição da temperatura submetida aos produtos exerce um papel importantíssimo na qualidade final do material, tal fato é mais evidente em um forno intermitente onde cada queima pode ter um resultado diferente (Nicolau, 2012).

Para que o produto tenha uma boa qualidade é necessária uma boa queima e assim cada fase da queima deve ser feita respeitando suas características de temperatura e tempo. A queima é dividida em 3 fases: Pré-Aquecimento, Queima (também chamada de fogo forte) e Resfriamento.

A fase de pré-aquecimento acontece logo após a extrusão e a secagem, no entanto, o material cerâmico contém água residual (água não eliminada na etapa de secagem por evaporação), devido a isso a primeira fase do processo de queima gera um aquecimento gradual e lento até temperaturas de 200°C a 400°C em um período de 8 a 24 horas, chamado de resquite. Nesta fase ocorre reações de combustão de substâncias orgânicas, formação de poros e evaporação da água residual, e se não feita corretamente essa etapa pode gerar defeitos nas peças como rachaduras, fragmentações devido às tensões provocadas pela emissão do vapor (Kokot, 1998; Messias, 1996).

A fase de fogo forte ou caldeamento é a etapa da queima em que ocorre a queima propriamente dita, a temperatura é elevada em ritmos mais acelerados até cerca de 1000°C. A temperatura máxima de queima mantida por um determinado tempo é chamada de patamar, dessa forma a câmara aproxima ao máximo o gradiente de temperatura por toda extensão do forno. Esta etapa da queima é fundamental, para pois nela que se verificam as principais reações químicas e mudanças físicas do material cerâmico gerando características de dureza, estabilidade, resistência e a coloração que se pretende (Messias, 1996; Silva, 2011).

As reações que ocorrem nessa fase são provenientes do aumento gradual da temperatura, assim quando a temperatura permanece entre 400°C e 650°C ocorrem reações de inversão do quartzo e decomposição de pirita, que são componentes do material cerâmico, caso ocorra algum problema nessas temperaturas podem ocorrer rachaduras e lascas.

Quando a temperatura chega em valores entre 650°C e 750°C, verifica-se a combustão de substâncias orgânicas, decomposição do calcário e combustão de carbono residual e conseqüentemente liberação de calor, nestas temperaturas de queima podem acontecer problemas de deformações, manchas superficiais e rachaduras. A última fase de fogo forte é o estágio da queima em que a temperatura é mais alta, de 750°C podendo chegar até 1000°C, no entanto, o mais comum são temperaturas por volta de 900°C.

Nota-se neste momento da queima, a formação e expansão do corpo cerâmico e transformação de fase cristalográfica, se o patamar de temperatura não for bem regulado podem aparecer problemas nas propriedades finais do produto fazendo com que o mesmo fique fora das especificações (Kokot, 1998).

Segundo Pinheiro e Holanda (2010), para temperaturas de queima até 950°C obtém-se uma microestrutura porosa propícia a fabricação de tijolos e blocos cerâmicos, pois esses produtos devem ser mais porosos do que a telha por exemplo que deve ser queimada em temperaturas superiores a 950°C para que as microestruturas do material sejam mais suaves e densas.

A última fase do processo de queima é a de resfriamento, na qual o material cerâmico é submetido a uma diminuição de temperatura gradual e cuidadosa, em que o ar frio entra pelas fornalhas descrevendo o mesmo caminho dos gases e assim resfriando a carga. Além do ar frio, em muitos casos, é reaproveitado o calor dessa etapa para os secadores, havendo assim uma melhor eficiência energética do processo. O resfriamento dura cerca de 38 a 50 horas (Messias, 1996; Tubino, 2006).

A temperatura nesta etapa decresce inicialmente até 500°C ocorrendo a inversão do quartzo cristalino e gradualmente irá chegar a 250°C com decomposição da cristobalita, em ambos os casos podem ocorrer defeitos como rachaduras se o resfriamento não for feito progressivamente (Paiva Filho *et al.*, 2004).

A queima é uma das etapas mais suscetíveis a causar defeitos nos produtos cerâmicos. Se o processo de queima não for bem controlado nas 3 etapas, a qualidade e a estética do material são afetadas podendo ocasionar até a inviabilização da sua venda. No Quadro 2 são mostrados os principais defeitos encontrados durante a queima e as suas causas.

Quadro 2- Principais defeitos e suas causas durante a queima

Defeito	Causa
Falta de Ortogonalidade	Queima diferencial centro-lateral do forno
Calibre	Queima diferencial centro-lateral do forno; variações de queima com o tempo; temperatura de queima baixa – absorção alta de água; temperatura de queima alta – absorção baixa de água;
Curvatura	Curva de queima inadequada às condições da: massa, esmalte e formato; temperatura de queima excessivamente alta: maior deformação pirolástica; - movimentação das peças dentro do forno: contato entre elas em zona de alta temperatura
Trinca	Secagem brusca de água: Trinca nas bordas
Quebras nas pontas a cru e Quebras na ponta queimado.	Movimentação Violenta
Porosidade Baixa	Temperatura baixa e/ou ciclo muito rápido.
Porosidade Alta	Temperatura alta e/ou ciclo muito lento
Inchamento	Incorretas curvas de temperatura e/o pressão do forno
Furos	Desgaseificação insuficiente; excessiva temperatura de queima
Tons	Variações das condições de queima: Um lado com temperaturas diferentes do outro além de grandes diferenças de temperatura de topo e base

Fonte: Adaptado de Martín (2004)

Analisando o quadro 2 é possível observar que as principais causas de falhas é devido ao não alcance da temperatura necessária para a queima ou a variações na temperatura.

O processo de queima pode ser dividido de maneira resumida em três grandes fenômenos. O primeiro deles é o de desidratação em que a água contida nos poros evapora e

uma porção da matéria carbonosa é queimada. Logo após vêm a oxidação na qual toda matéria combustível é consumida eliminando-se o carvão e o enxofre, e o óxido ferroso é oxidado transformando-se em óxido férrico. Por último, tem-se o fenômeno de vitrificação que é a contração e o fechamento dos poros da argila, no entanto não ocorre em tijolos comuns (Petrucci, 1997).

Segundo Bouth (2008), na medida em que a temperatura vai aumentando ocorrem alguns fenômenos. Quando o produto cerâmico chega a uma temperatura de 100°C ocorre eliminação da água higroscópica, ou seja, aquela água que é adicionada durante a preparação da massa. Em 200°C há a eliminação da água dos poros ou intersticial e entre 350° e 650°C ocorre a combustão das substâncias orgânicas e eliminação da água de constituição molecular, aquela que faz parte da estrutura cristalina. Em temperaturas mais altas como 700°C, acontecem reações químicas da sílica e alumínio que são elementos fundentes do material cerâmico, além de decomposições de carbonatos até temperatura por volta de 950°C. Acima de 1000° verifica-se o processo de sinterização do material provocando dureza e compactação, no entanto, se a temperatura aumentar muito mais que isso ocorre a fusão do produto cerâmico. Na figura 4 pode ser visto as curvas de queima em um forno cerâmico.

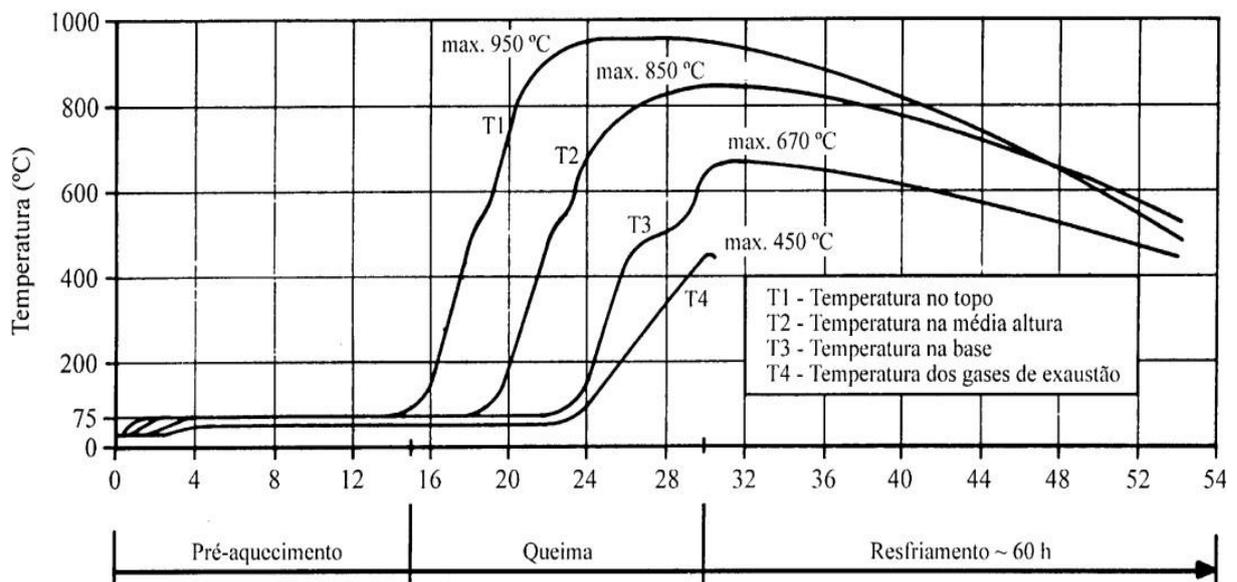


Figura 4- Curvas de queima de um forno intermitente

Fonte: Messias (1996)

Para que a queima ocorra da maneira mais satisfatória possível é necessário que a relação combustível/comburente seja a mais factível e otimizada. Para qualquer combustão

é necessária uma quantidade de ar estequiométrico, que se chama ar teórico. Todavia, para que se promova a combustão total é impreterível um excesso de ar, para manter um teor de oxigênio até o fim da queima.

O coeficiente de excesso de ar (α) é dado pela razão do volume de ar utilizado (V_{ar}) dado em kg/kg combustível ou m^3/kg de combustível e o volume de ar estequiométrico (V_{ar}^o). Além disso, α pode ser alcançado através da análise volumétrica dos produtos da combustão como por exemplo comparação do CO_2 estequiométrico com o CO_2 gerado (P. C. Pinheiro & Valle, 1995), que é descrita pela formula (1).

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^o} \quad (1)$$

Para cada tipo de combustível existe uma relação de excesso de ar que irá gerar o melhor rendimento na queima. No quadro 3 abaixo são descritos os valores de α para os combustíveis mais utilizados.

Quadro 3- Valores Usuais de α

Combustível	α
Carvão	1,20 – 1,60
Óleo Combustível	1,05 – 1,20
Gás Natural	1,05 – 1,12
Madeira	1,20 – 1,25

Fonte: Adaptado de P. C. Pinheiro & Valle (1995)

Ainda baseado em estudos para se conhecer o valor ideal para o ar de combustão, Vlassov (2001) nos mostra que para o gás natural o excesso deve ser de aproximadamente 1,07 e para o óleo combustível e o pó de serra de 1,25.

2.3 Sistema de Automação Industrial

Para que sejam desenvolvidos, projetados e efetuados o controle de processos industriais, devem ser conhecidas as melhores condições para o sistema em que se pretende automatizar. Desta forma é necessário identificar suas principais características e propriedades. Um sistema de automação possui um formato de malha de controle podendo ser aberta ou fechada, além de ser indispensável o conhecimento de técnicas de controle que

podem ser utilizadas e a escolha dos instrumentos que são aplicados para medição, controle e supervisão da variável controlada no processo.

2.3.1 Malha Aberta

O sistema de controle em malha aberta é aquele em que a informação da variável controlada não é empregada para regular qualquer das variáveis de entrada do processo (Eletrobrás, Instituto Euvaldo Lodi, Programa Nacional de Conservação em Energia Elétrica, & Confederação Nacional da Indústria, 2008), ou seja, os sinais de entrada são aqueles que determinam a saída desejada não sendo mudados de acordo com as condições de operação ou perturbações ocorridas no processo, deste modo utiliza-se apenas de um controlador ou atuador para obter a resposta desejada, decorrendo em um sistema sem retroação e por tanto não apresenta informação do estado de saída do processo (Dorf & Bishop, 1998; Ogata, 2007). A figura 5 mostra um exemplo de um sistema de controle em Malha aberta.

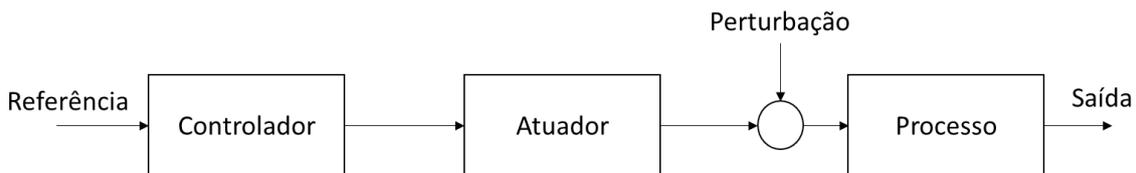


Figura 5 - Sistema de controle em malha aberta

Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

2.3.2 Malha Fechada

O sistema de controle pode ser denominado de malha fechada se o mesmo estiver interconectado em um ciclo, assim tem como principal função engendrar a relação da entrada do processo com sua respectiva saída, assim a variável do processo, que é a grandeza física que afetar no funcionamento do sistema, é controlada dentro dos limites estabelecidos, isto é, o sistema em malha fechada tenta estabilizar a variável controlada efetuando correções em outra variável que é conhecida como variável manipulada (Åström & Murray, 2008; Eletrobrás *et al.*, 2008).

Esse controle é feito através da análise da variável por um instrumento de medição comparando o valor medido com o *setpoint*, assim é gerado um sinal de erro que é corrigido pelo controlador (Ogata, 2007), ou seja, é utilizado um sistema de medida adicional para comparar a saída do sistema com a resposta esperada, essa medida de saída é chamada de

retroação. Um sistema de controle com retroação visa a manter uma relação preestabelecida entre uma variável do sistema e outra, contrastando as funcionalidades de cada variável e utilizando a diferença entre elas como meio de controle (Dorf & Bishop, 1998). A figura 6 mostra um exemplo de um sistema de controle em malha fechada.

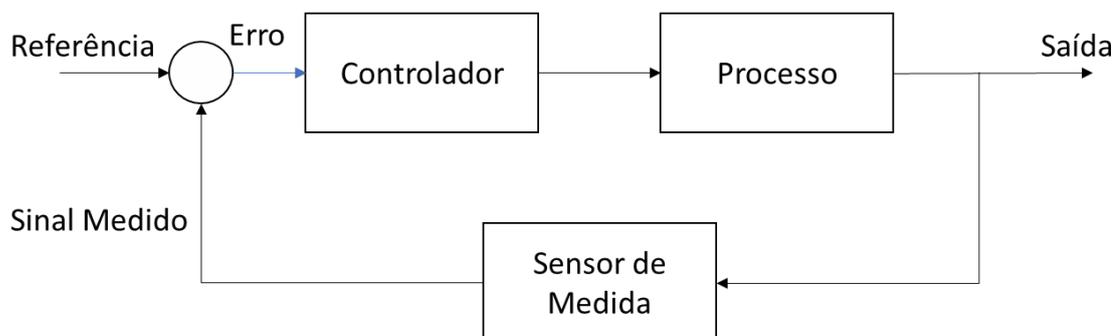


Figura 6 - Sistema de controle em malha fechada
Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

Em um sistema de controle com retroalimentação é possível estabelecer uma relação entre a entrada do processo (referência) e a sua resposta (saída) quando aplicando Laplace em ambos e quando representados por uma equação diferencial linear invariante no tempo. A essa relação se dá o nome de função de transferência, que é de fundamental importância em simulações de processos para gerar uma maior fidelidade à simulação, pois é um modelo matemático que relaciona a variável de saída com a de entrada do processo e inerente ao sistema devido a isso ela inclui apenas as unidades necessárias para relacionar a entrada e a saída não fornecendo nenhuma relação quanto a estrutura física do sistema (Ogata, 2007).

2.3.3 Sistemas Lineares Temporais

Um dos principais ganhos da realimentação é proporcionar que seja possível realizar os ajustes do desempenho transitório e estacionário do sistema de controle. Em muitos casos as especificações do sistema de controle incluem muitos índices de resposta temporal para um determinado sinal e uma exatidão determinada para a resposta estacionária. Uma das principais dificuldades é o desconhecimento do tipo de sinal de referência que podem variar entre degrau, rampa, parábola, impulso e senoidal. Em casos quando se utiliza a temperatura como variável a ser medida, como no caso do forno cerâmico, o degrau é o sinal apropriado (Murrill, 2012)

2.3.3.1 Sistemas de Primeira Ordem

Os sistemas de primeira ordem são representados pela função de transferência mostrado pela figura 7.

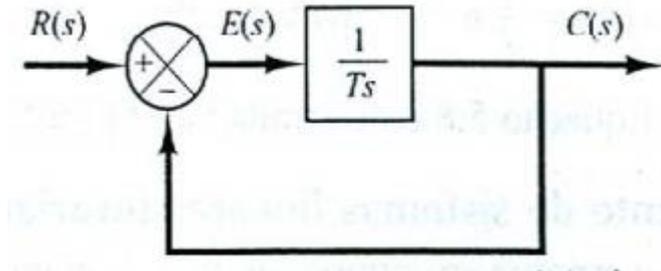


Figura 7- Sistema de Primeira Ordem Com Realimentação
Fonte: Ogata (2007)

Quando se relaciona a entrada $R(S)$ com a saída $C(s)$ é obtida a função de transferência do sistema de primeira ordem que pode ser vista na figura 8.

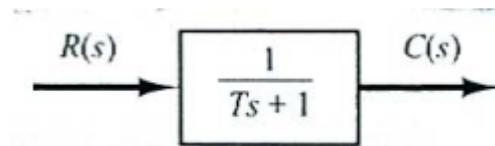


Figura 8- Função de Transferência de um Sistema de primeira ordem
Fonte: Ogata (2007)

Onde T é a constante de tempo em que o sistema alcançou 63,2% de sua variação total, quando excitado por uma entrada de degrau unitário. Sendo assim quanto menor o valor de T , mais rapidamente o sistema responde e fica em equilíbrio em regime permanente. Nas figuras 9 e 10 é possível observar a resposta de um sistema de primeira ordem a uma resposta degrau e rampa.

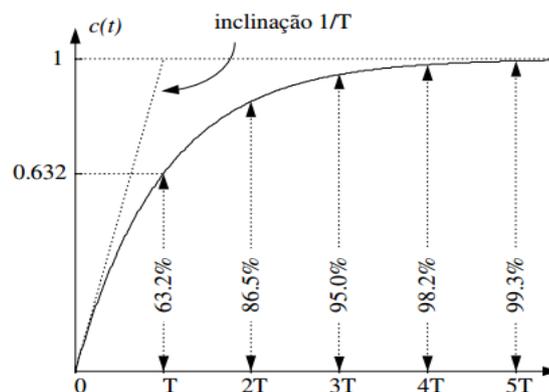


Figura 9- Resposta a uma entrada degrau
Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

Na figura 9 é possível observar que um sistema de primeira ordem quando excitado por uma entrada do tipo degrau tende a se estabilizar e não apresenta erro de regime permanente, no entanto, a estabilização depende da constante de Tempo T.

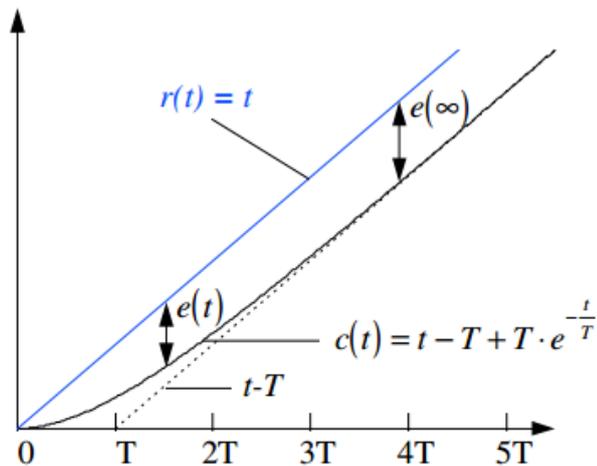


Figura 10- Resposta a rampa unitária
Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

Ao contrário da figura 9, a figura 10 evidencia que a uma entrada do tipo rampa unitária o sistema de primeira ordem se comporta a ter um erro de regime permanente, ou seja, nunca chega ao sinal de referência.

2.3.3.2 Sistemas de Segunda Ordem

O desempenho dinâmico de um sistema de segunda ordem pode ser escrito em função dos parâmetros ζ e W_n , desta forma a relação $C(S)/R(S)$, ou seja, a função de transferência pode ser descrita de modo que:

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2(\zeta W_n)s + W_n^2} \quad (2)$$

se o termo ζ for um número entre 0 e 1 o sistema é dito subamortecido e a resposta transitória é oscilatória. Entretanto, se o valor de ζ for igual a 0 o a resposta oscilatória do sistema não é perdida, se ζ for igual a 1 o sistema é chamado de criticamente amortecido e se ζ maior que 1 o sistema é chamado de superamortecido (Ogata, 2007).

Quando um sistema de segunda ordem é submetido a uma entrada do tipo degrau o sistema se comporta de várias formas, dependendo do valor de ζ . As respostas podem ser visualizadas na figura 11.

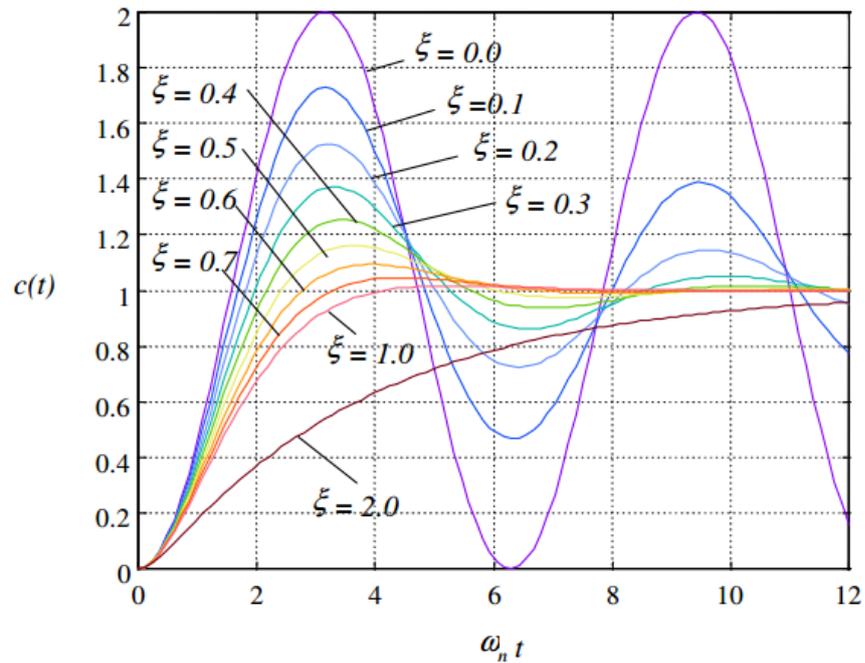


Figura 11- Resposta ao Degrau Unitário de um sistema de segunda ordem
 Fonte: Cruz (2004)

Um sistema de segunda ordem também pode ser excitado por uma entrada tipo impulso unitário e a sua resposta também irá variar de acordo com o valor de ζ , como pode ser visto na figura 12.

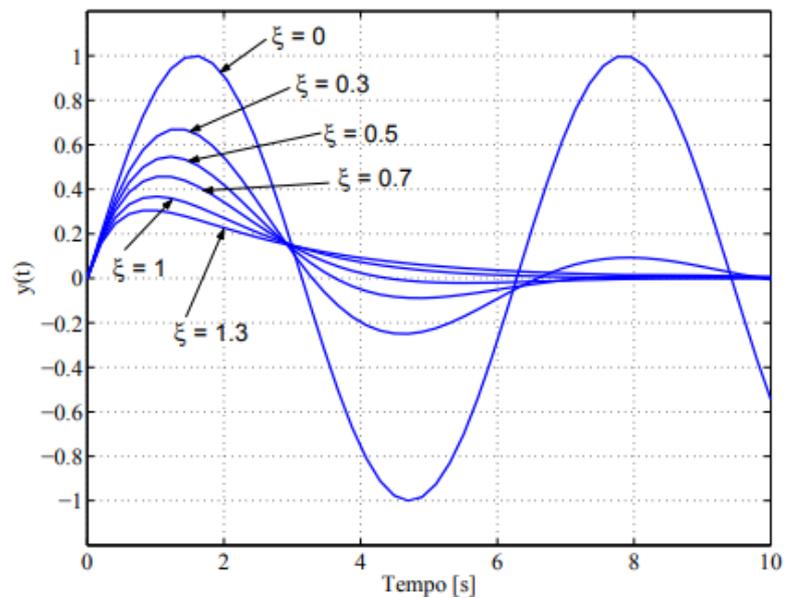


Figura 12- Resposta ao impulso unitário de um sistema de segunda ordem
 Fonte: Ogata (2007)

Com regularidade as propriedades de performance de um sistema de controle são dadas pelo resultado da resposta transitória a uma entrada em degrau unitário. De modo efetivo, previamente ao regime permanente, a resposta transitória de um sistema de controle indica oscilações amortecidas em sua grande parte. Assim, na discriminação das características das respostas transitórias é corriqueiro especificar os seguintes termos: Tempo de Atraso (T_d), Tempo de Pico (T_p), Tempo de Subida (T_r), Tempo de acomodação (T_s) e Máximo Sobressinal (M_p). Esses termos podem ser vistos na figura 13.

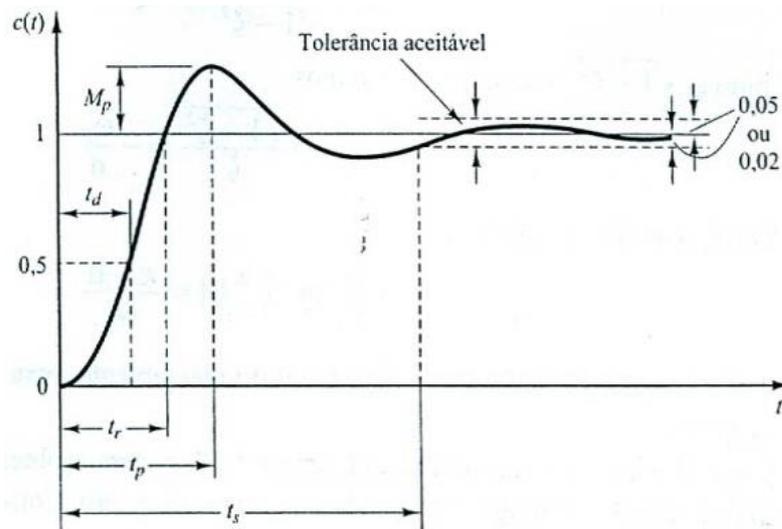


Figura 13- Resposta ao Degrau Unitário com os termos especificados
Fonte: Ogata (2007)

Para calcularmos os valores de M_p e T_s utilizamos dos termos ω_n e ζ da função de transferência, e vice-versa. Desta forma:

$$M_p = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi}, \quad (3)$$

para o tempo de acomodação (T_s) deve-se levar em consideração a tolerância da variação da resposta quando chega ao regime permanente. Essa variação pode ter um a tolerância de 2% ou 5%. Para o critério de 2%, o valor de ζ permanece entre 0 e 0,9 e é calculado da seguinte forma:

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n}. \quad (4)$$

Com os valores de M_p e T_s em conjunto com os valores de ω_n e ζ é possível calcular os demais termos da resposta transitória do sistema. O tempo de subida (T_r) pode ser calculado da seguinte forma:

$$T_r = \frac{\pi - \beta}{W_d}. \quad (5)$$

Sendo que os valores de β e W_d são calculados a partir das formulas 5 e 6, evidenciadas abaixo:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{W_d}{\zeta W_n}, \quad (6)$$

$$W_d = W_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (7)$$

sabendo o valor de W_d é possível também calcular o valor do tempo de pico (T_p), da seguinte forma:

$$T_p = \frac{\pi}{W_d}. \quad (8)$$

2.3.4 Técnicas de Controle

Os sistemas de controle devem possuir técnicas para serem implementados, dentre as técnicas mais conhecidas tem-se a de controle On/Off e o controle proporcional, Integral e Derivativo também conhecida como P.I.D. Ambas são utilizadas em sistemas de controle de malha fechada.

2.3.4.1 Controle On/Off

O controle On/Off age comparando o sinal de referência com a saída do processo, ou seja, gerando um erro, e assim efetuando um comando de atuação, no entanto essa atuação é baseada unicamente no erro, se ele for maior que zero, um tipo de ação é efetuada e se for menos que zero, uma outra ação é efetuada, desta forma nesta técnica de controle só pode-se obter dois tipos de ação por isso o nome de On/Off.

A principal vantagem do seu uso é que não são necessários escolher parâmetros, no entanto, caso o processo tenha variáveis que oscilem muito o controle perde sua estabilidade pois o sistema reage abruptamente posto que uma pequena mudança no erro acarretará em alterações na variável manipulada em toda sua gama (Åström & Murray, 2008).

A figura 14 mostra a equação de um controle on/off, onde $e = r - y$, sendo “r” o sinal de referência e “y” a saída do sistema. A ação de controle é chamada de “u” é a ação de controle.

$$u = \begin{cases} u_{\max} & \text{if } e > 0 \\ u_{\min} & \text{if } e < 0 \end{cases}$$

Figura 14- Equação do controle On/Off
Fonte: Åström & Murray (2008)

2.3.4.2 Controle P.I.D.

O controle P.I.D. tem como conceito primordial a leitura do erro através de um sensor ou elemento de medição, comparando a variável medida com o valor desejável e assim gerar uma resposta de saída através do cálculo proporcional, integral e derivativo (Bristol *et al.*, 2015). Os controladores P.I.D. apresentam-se de em distintas formas, seja como um controlador autônomo, como parte de sistemas distribuídos hierárquicos ou incorporados a componentes embarcados (Åström & Murray, 2008).

Esse tipo de controle tem como principal característica um bom desempenho, precisão e versatilidade sendo muito utilizado em controle de temperatura, pressão, vazão e nível. De acordo com o tipo de controle os parâmetros são ajustados seja manualmente ou através de técnicas de auto sintonia (Bristol *et al.*, 2015).

Diferentemente do controle On/Off o controle P.I.D. consegue evitar oscilações no controle do processo através do seu parâmetro proporcional, pois ele é capaz de acelerar a resposta de saída para pequenos erros, no entanto, tem a desvantagem de se distanciar um pouco do valor de referência, essa diferença entre a variável de processo e o valor desejável se dá o nome de erro de offset. O controle proporcional assim como o erro de offset pode ser melhor visualizado na figura 15.

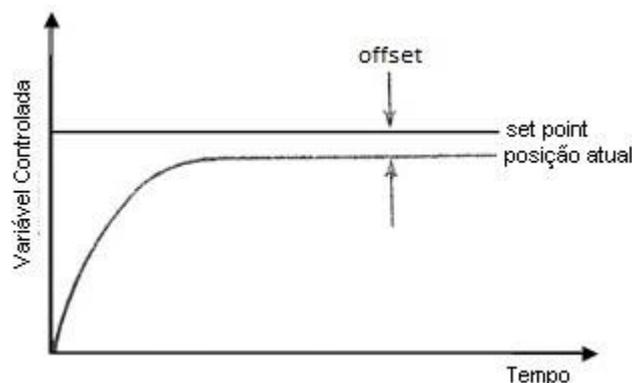


Figura 15- Controle Proporcional
Fonte: Adaptado de Cruz (2004)

Para que esse erro de offset seja retirado do controle do sistema, ou seja, manter o erro igual zero ou o mais próximo possível e acelerar a correção, é necessário fazer a ação de controle (sinal da saída do controlador integrador puro) proporcional a integral do erro. Tal forma de controle é chamada de controle integrador que possui o parâmetro integral, no entanto, a ação integral é usualmente associada acompanhada da ação proporcional, recebendo o nome de controlador Proporcional Integral (P.I.).

Mesmo que tire o erro de offset o controle P.I. traz algumas desvantagens ao processo como o sobressinal gerado toda vez que o valor de referência é alterado (Åström & Murray, 2008; Eletrobrás *et al.*, 2008), outro inconveniente é o aumento exagerado do parâmetro integrador levando o sistema a oscilação, esse problema é chamado de *reset windup* pois quando um erro não é igualado a zero o termo integral torna-se demasiadamente grande e a saída do controlador pode saturar, não havendo o controle do processo (Cruz, 2004). A figura 16 mostra a resposta de um controle proporcional integrador assim como o sobressinal gerado por ele após uma mudança de *setpoint*.

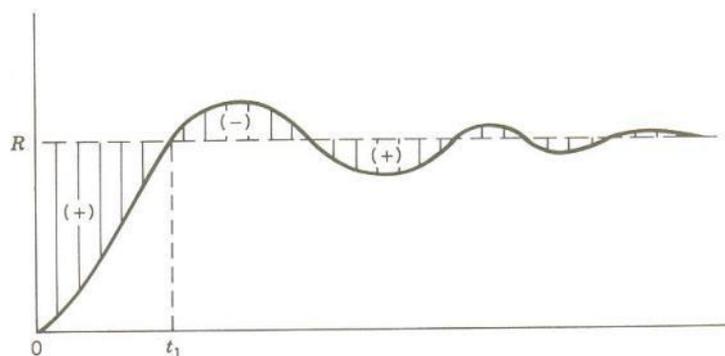


Figura 16- Controle Proporcional Integral
Fonte: Cruz (2004)

O controlador P.I. efetua o controle do sistema, no entanto, a sua estabilização e a ocorrência de um sobressinal muito elevado podem inviabilizar sua aplicação em sistemas em que tal característica não é aceitável, desta forma para que haja um refinamento do controle é adicionado uma habilidade antecipativa, utilizando a previsão do erro. Esse parâmetro capaz de antecipar o erro é chamado de Derivativo (Åström & Murray, 2008).

Essa capacidade é possível pois a ação derivativa compensa o efeito de tempo morto do processo, no entanto, se não forem bem sintonizados o parâmetro derivativo pode causar grande instabilidade ao sistema, por isso em muitos casos ele não é utilizado e também não pode ser utilizado sozinho, sem que já haja o controle proporcional e integral.

A figura 17 mostra uma comparação de um mesmo sistema sem controle, com controle apenas proporcional, com proporcional Integral (P.I.) e com o controle P.I.D.

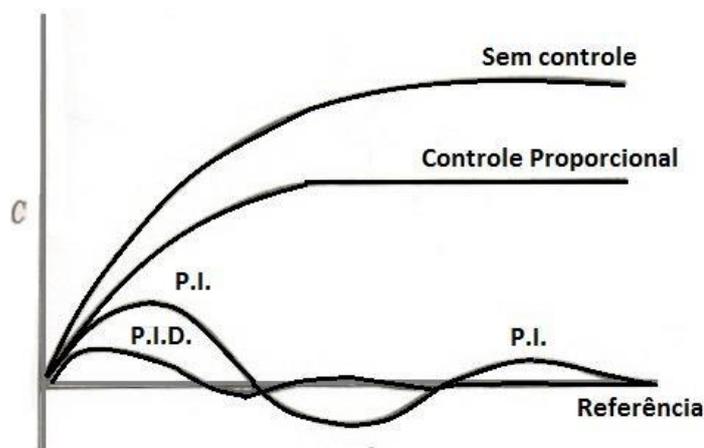


Figura 17- Comparação entre o sistema sem controle e os controles, P, P.I. e P.I.D.
Fonte: Adaptado de Cruz (2004)

É possível notar que o sistema sem controle está muito distante da referência, já com o controle proporcional ocorre a estabilização do sistema, no entanto, em um valor diferente da referência, indicando o erro de offset. Com os controles P.I. e P.I.D. a variável já é controlada mais próxima da referência, não obstante, só ocorre a estabilização no segundo tipo, no P.I. como não tem o parâmetro derivativo ele não consegue antecipar o erro e sempre vai haver um sobressinal ou demora na estabilização do sistema.

2.3.5 Instrumentos de Controle

O controle de um processo só pode ser executado com a utilização de instrumentos de medição, comunicação, controle e de atuação. São vários os tipos de equipamentos que podem ser utilizados, onde cada processo irá necessitar de uma forma particular de controle e assim de diferentes elementos para efetuar esse controle.

2.3.5.1 Sensores

Os sensores são os principais elementos de medição em um processo industrial e é o termo utilizado para indicar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente, seja ela térmica, luminosa, cinética, associando informações sobre uma grandeza que necessita ser medida como temperatura, pressão, corrente, nível e etc. Os sensores também são conhecidos como dispositivos que modificam variáveis físicas em variáveis convenientes como as elétricas que são a tensão e a corrente, quando possuem essas características são

chamados de transdutores. Em muitos casos os termos sensor e transdutor se misturam, desta forma transdutor é o instrumento completo que envolve o sensor e os circuitos de interface preparados para serem utilizados em uma aplicação industrial (Moraes & Castrucci, 2007; Thomazini & Albuquerque, 2005).

Os sensores podem ser digitais ou analógicos. Segundo Thomazini & Albuquerque (2005), os sensores digitais, também chamados de sensores discretos, são aqueles assumem apenas dois valores no sinal de saída, ou seja, suas saídas são binárias. Nenhuma grandeza física é naturalmente binária, mas através desses sensores, as variáveis são mostradas ao sistema de controle em apenas duas situações, 0 ou 1, ligado ou desligado, somente após serem transformados pelo circuito eletrônico do transdutor. Eles podem ser divididos em sensores de contato mecânico e sensores de proximidade.

Os sensores de contato mecânico necessitam de uma força entre o sensor e a matéria medida para efetuar a sua detecção. Esses sensores têm com vantagens o seu baixo custo, imunidade a interferências externas, suportam altas correntes e é um tipo de tecnologia bastante empregada e conhecida. Como desvantagem surge o fato de ser necessário o contato físico com alvo e assim diminuir a vida útil do sensor devido ao desgaste, além de possuir uma resposta lenta quando excitado. Nos sensores de proximidade o objeto é reconhecido pela proximidade ao sensor e existem seis princípios de funcionamentos para esse tipo de sensor, dentre eles temos o indutivo, capacitivo, ótico, ultrassônico, fotoelétrico e Efeito Hall (Moraes & Castrucci, 2007). No quadro 4 é mostrada as vantagens e desvantagens da utilização de cada um desses tipos de sensores de proximidade.

Os sensores analógicos podem apresentar qualquer valor no seu sinal de saída, desde que o mesmo esteja dentro da sua faixa de operação desta forma mesmo que limitados dentro de uma faixa podem variar em vários valores de tensão, pois em um sensor analógico a mudança de uma certa condição seja em resistência, capacitância ou pressão, acarretará em uma variação na mesma proporção seja em tensão, corrente. Através do tipo de resposta de saída dos sensores analógicos (resistivo ou capacitivo) que pode se dizer de que tipo ele é (Patsko, 2006; Thomazini & Albuquerque, 2005). No quadro 5 é possível ver os tipos de sensores analógico quanto a sua classificação e os principais tipos de cada.

Quadro 4- Vantagens e Desvantagens dos sensores de proximidade

Princípio de Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Indutivo	<ul style="list-style-type: none"> → Resiste a Ambientes severos → Não depende do tipo de superfície do objeto → Vida Longa → Fácil instalação 	<ul style="list-style-type: none"> → Limitação da distância → Detecta apenas materiais metálicos → Sensível a Interferências
Capacitivo	<ul style="list-style-type: none"> → Detecta através de algumas embalagens → Pode detectar materiais não metálicos → Vida Longa 	<ul style="list-style-type: none"> → Distância pequena para detecção → Sensível a mudanças ambientais
Ótico	<ul style="list-style-type: none"> → Usado em qualquer material → Vida Longa → Faixa grande de medição → Resposta Rápida → Retira ruído do ambiente → Permite o uso de fibra ótica 	<ul style="list-style-type: none"> → Lentes sujeitas a contaminação → Afetada pela cor e refletividade do alvo → Mudança do foco pode atrapalhar o desempenho → Objetos brilhantes interferem
Ultrassônicos	<ul style="list-style-type: none"> → Mede distâncias longas → Detecta muitos tipos de matérias → Resposta linear com a distância 	<ul style="list-style-type: none"> → Requer alvo com área mínima → Requer uma distância mínima → Resolução depende da frequência → Sensível a mudança de ambiente → Não funciona com materiais de baixa densidade
Efeito Hall	<ul style="list-style-type: none"> → Vida Longa → Fácil instalação → Resposta rápida → Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> → Não é seletivo em relação ao alvo → Sensível a Interferência → Alvo deve ter imã fixado

Fonte: Adaptado de Moraes & Castrucci (2007)

Quadro 5- Principais Sensores analógicos

Sensores Analógicos		
Classificação	Funcionamento	Exemplos
Resistivo	Variam a sua medição de acordo com a variação de resistência que a variável medida gera no sensor.	LDR (Luminosidade) Termistor (Temperatura) Sensor de peso
Capacitivo	Variação da medição de acordo com a mudança na capacitância do componente	Acelerômetro Sensor de umidade
Pressão	Variação da medição de acordo com a pressão ou vibração que é gerada no elemento sensor	Sensores piezoelétricos Microfone Sensor de vibração

Fonte: Adaptado de Patsko (2006)

Todos os sensores citados no quadro 5 utilizam de um tipo de medição indicada e transformam esses valores em corrente ou tensão para que sejam entendidos e utilizados pelos sistemas de controles, para isso em muito caso são utilizados conversores ou transdutores de sinal.

Um elemento sensor analógico muito utilizado são os transmissores e podem ser utilizados em uma quantidade muito grande de variáveis: nível, pressão, temperatura, vazão, dentre outras. De forma sucinta pode-se definir o transmissor como um equipamento que habilita o sinal de saída de um transdutor realizando algumas adaptações ao sinal chamadas de padrão de transmissão de sinal, assim o transmissor é constituído basicamente de um sensor, transdutor e transmissor no mesmo dispositivo (Thomazini & Albuquerque, 2005).

Em outras palavras os transmissores são instrumentos que transformam o sinal de um transdutor ou sensor em um sinal padrão para ser enviado a uma certa distância. A alimentação de um transmissor pode ser a dois fios, quatro fios e três fios sendo os dois primeiros tipos mais utilizados do que o último.

A escolha da fonte de alimentação depende diretamente de que tipo de alimentação transmissor utiliza, para a dois fio a energização é de 24 Volts em corrente contínua já na de 4 fios podem ser alimentadas com 110/115/127/220/240 Volts em corrente alternada e 24 Volts em corrente contínua (Bega *et al.*, 2011). Os transmissores além da capacidade de receber informações ele pode registrá-las e esse registro pode ser analógico através de uma linha contínua ou digital, conseguem também efetuar o registro dos valores de mais de uma

grandeza e em alguns casos indicar os valores registrados através de um visor (Eletrobrás *et al.*, 2008). Uma outra característica importante dos transmissores é que sua utilização acarreta em uma melhoria na regulação do sistema, no entanto, não é indispensável para uma boa regulação (Sighieri & Nishinari, 1973).

Além dos transmissores de temperatura que são sensores analógicos de temperatura, existem outros sensores muito utilizados, como os termopares, que é constituído de dois pedaços de fios feitos de materiais diferentes, unidos em uma de suas extremidades, além de serem os elementos sensores de temperatura mais utilizados no âmbito industrial devido a sua facilidade de instalação, confiabilidade e simplicidade em seu manuseio (Moreira, 2002).

Os termopares utilizam de um fenômeno físico chamado efeito *Seebeck*, que relaciona as temperaturas em cada uma das extremidades do termopar que não estão em contato gerando uma diferença de potencial proporcional a esse gradiente de temperatura (Borchardt & Gomes, 1979).

2.3.5.2 Controladores

Os controladores como o próprio nome diz são responsáveis pelo controle através de uma lógica de comando. São instrumentos que comparam a variável de processo com o valor de referência e produz um sinal de saída com a intenção de conservar a variável de processo em valores próximos do desejável (Eletrobrás *et al.*, 2008). No âmbito industrial o principal equipamento para efetuar o controle das variáveis é o Controlador Lógico Programável (C.L.P.). Para a *International Electrotechnical Commission* (IEC) um C.L.P. é definido como:

“Sistema eletrônico operado digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa memória programável para a armazenagem interna e de instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas tais como lógica, sequencial, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas”

Resumidamente pode-se dizer que o C.L.P. é um computador planejado para operações em ambientes industriais. Os primeiros C.L.P's utilizados na indústria eram grandes, robustos e caros e foram empregados na substituição dos painéis de relé que eram quem executavam o controle nas indústrias. Nos dias atuais com evoluções no seu projeto e a utilização cada vez maior de circuitos integrados, o seu custo diminuiu sendo empregado em

várias situações um exemplo é que, no início ele só era utilizado quando as aplicações tivessem no mínimo 150 relés (grandes operações), já com o avanço da tecnologia e o seu barateamento pode ser utilizado para circuitos de 15 relés, ou seja, pode ser utilizado para pequenas aplicações (Franchi & Camargo, 2009).

Segundo Moraes & Castrucci (2007), as principais características de um C.L.P. são a sua capacidade de utilização de linguagens de programação de alto nível sendo mais amigável ao operador na hora de efetuar a programação, além de simplificar toda a parte de comandos elétricos seja nos quadros ou nos painéis diminuindo a quantidade fios.

Outras características importantes são a confiabilidade operacional que ele traz ao sistema visto que as modificações podem ser efetuadas através do programa não sendo necessário mudanças nas ligações elétricas, a utilização de funções avançadas para executar as tarefas de controle e por último a habilidade de comunicação em rede que através de interfaces de operação os controladores e dispositivos em rede conseguem efetuar a troca de informações entre eles (Moraes & Castrucci, 2007).

Segundo Franchi & Camargo (2009) a principal vantagem da utilização dos C.L.P's em relação ao controle feito por relés é que os C.L.P's possuem a característica de programação que gera ao equipamento algumas facilidades em comparação aos demais tais como facilidade e flexibilidade para executar alteração nos programas, armazenamento do programa na memória para utilização do mesmo em outro dispositivo ou simplesmente como backup e no caso de defeito do sistema controlado é possível visualizar ao operador através de sinalizadores virtuais.

As desvantagens são que os C.L.P's possuem um custo mais elevado, podem ser de difícil compreensão por parte dos eletricitas já que podem utilizar de lógica booleana ou alguma outra técnica desconhecida, são sensíveis a interferências e ruídos, e para serem feitas manutenção é necessária mão de obra mais qualificada ou treinar a já existente o que gera custos adicionais (Franchi & Camargo, 2009).

2.3.5.3 Atuadores

Os atuadores são também chamados de elementos finais de controle e desempenha uma função primordial no controle do processo industrial são eles que são responsáveis pela modificação da variável controlada. Usualmente funcionam recebendo o sinal do controlador e atuam sobre o processo controlado (Franchi & Camargo, 2009). Dentre os atuadores mais

utilizados tem-se os Relés, Solenoides, Inversores de Frequência, Motores e as Válvulas de Controle, essa última a mais utilizada no controle de processos industriais.

As Válvulas de controle operam como uma resistência variável na tubulação do processo e é explicada por muitos como um orifício de tamanho variado. Mesmo que amplamente utilizada as válvulas de controle é o dispositivo que recebe menos atenção nas malhas de controle, no entanto, é o que mais está exposto a rígidas condições de pressão, temperatura, corrosão, erosão, no entanto, devem funcionar de modo aceitável, não comprometendo o controle da variável em questão. Os tipos de Válvula de controle mais usados são: válvula globo, válvula borboleta, válvula esfera (Bega *et al.*, 2011). Algumas características de cada tipo de válvula de controle podem ser vistas no quadro 6.

Quadro 6- Modelos e características das válvulas de controle

Modelo	Características
Válvula Globo	<ul style="list-style-type: none"> → As mais utilizadas → Usada em fluidos limpos → Dois tipos: Sede simples e Sede dupla → Algumas possuem corpo reversível, o que facilita a montagem e desmontagem
Válvula Esfera	<ul style="list-style-type: none"> → Usada em fluidos sujos → Usualmente utilizada em serviços de bloqueio → Apresentam boa vedação
Válvula Borboleta	<ul style="list-style-type: none"> → Mais antigas das válvulas de controle → Baixo custo inicial e de manutenção → Utilizadas em altas perdas de cargas, vedação estanque e fluidos corrosivos

Fonte: Adaptado de Bega *et al.* (2011)

Além das válvulas de controle existem outras saídas do processo que podem efetuar o seu controle e uma delas é o inversor de frequência, uma saída analógica muito utilizada em âmbito industrial.

Os inversores de frequência também podem ser chamado de conversores de frequência e são responsáveis por variar a velocidade de motores de indução gerando uma

economia de energia, melhoramento no desempenho e diminui as falhas e paradas para manutenção dos equipamentos acoplados a ele (Mascheroni, Lichtblau, & Gerardi, 2014)

O seu funcionamento se dá a partir da variação da frequência da tensão de alimentação dos dispositivos, desta forma a frequência proveniente da rede elétrica que normalmente tem seu valor em 60Hz, poderá assumir outros valores controlados pelo inversor e assim fazer com os motores conectados a ele girem de forma mais rápida ou mais devagar (Mascheroni *et al.*, 2014).

Segundo Del Monte (1980), os ventiladores e sopradores são cargas binário variável, desta forma possuem uma razão potência/velocidade cúbica, isto é, quanto menor a velocidade do equipamento menor ainda a potência gerada por ele. Devido a isso há uma economia de energia e assim o uso de inversores de frequência é justificado principalmente quando acoplados a cargas binárias variáveis mas também tem seu uso muito difundido em qualquer outro tipo de carga.

O diagrama da figura 18 nos mostra os componentes de um inversor de frequência e como são os passos desde a rede elétrica até a saída na carga para acontecer essa variação na frequência de entrada.

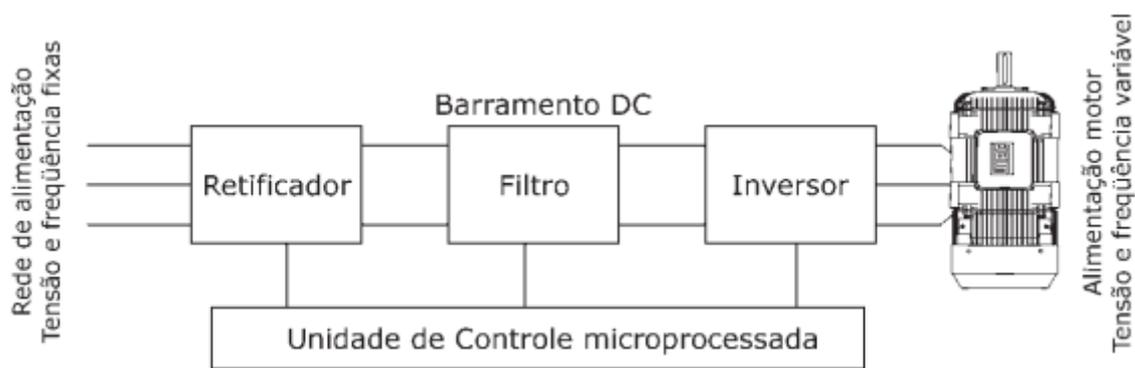


Figura 18- Diagrama de um Inversor de Frequência
Fonte: Mascheroni *et al.* (2014)

Segundo Lobosco e Dias (1988), as principais vantagens na utilização dos inversores de frequência são:

- Possibilidade de variação da frequência que chega na carga;
- Rampa de aceleração e desaceleração, evitando picos de energia e aplicação de torque elevado ao motor;
- Considerável conservação de energia devido a redução do consumo;

E as desvantagens são:

- Se os motores acoplados a ele rotacionarem com menos de 30Hz podem queimar devido a sobreaquecimento;
- Motor pode não ser utilizado em conjunto do inversor devido ao torque;
- Uso de muitos inversores podem gerar interferência eletromagnética na linha e alterar sinais de controle provenientes dos C.L.P's

2.3.6 Sistema SCADA

O *Supervisory Control and Data acquisition* (SCADA) é uma rede sensorial geral com um controle de sistema distribuído acoplado sobre eles formando assim o componente básico do controle e atuando como interface entre o sistema real e o usuário (Gao *et al.*, 2014). No passado o sistema SCADA era usado prioritariamente para comunicação de mecanismos, no entanto, nos dias atuais é cada vez mais utilizado com protocolos padrões de comunicação, aliado com o aumento da interconectividade com outras redes o que gerou um grande problema quanto a segurança das redes para que não haja invasores ou problemas de comunicação (Curtis, 2005; Donghyun Choi, Hakman Kim, Dongho Won, & Seungjoo Kim, 2009).

Outro fator relevante quanto a evolução do sistema SCADA é que no início do controle dos processos eram utilizadas redes simples, chamadas de ponto-a-ponto, conectando um dispositivo de medição, monitoramento ou comando a um sensor remoto ou atuador, tais sistemas de controle evoluíram para redes complexas que permitem a comunicação entre uma unidade de controle central e múltiplas unidades remotas em um único barramento de comunicação, há essas redes de comunicação industrial são chamadas de SCADA e os dispositivos dessas redes usualmente são sensores, atuadores e controladores lógicos programáveis (C.L.P.) Essa evolução em conjunto com o aumento da competitividade do mercado originou nas empresas a necessidade de modernizar os sistemas SCADA afim de reduzir custos e aumentar a eficiência (Igre, Laughter, & Williams, 2006).

A arquitetura tradicional do sistema SCADA é composta por uma unidade terminal mestre (MTU.), uma interface homem máquina (IHM.) e uma unidade terminal remota (RTU). O MTU consiste em uma unidade de nível hierárquico superior onde ele fornece controle e supervisão e comunicação com os RTU's e com MTU's de níveis hierárquicos inferiores através de computadores, periféricos e sistemas de entradas e saídas capazes de

monitorar e mostrar aos operadores o estado do processo e controlá-lo (Donghyun Choi *et al.*, 2009; Knight, 1991).

O RTU são dispositivos compostos por microprocessadores que controla sensores e atuadores que integram o ambiente físico sendo capaz de habilitar uma comunicação bidirecional com outras entidades de redes normalmente pedindo que configurações sejam alteradas e os comando sejam enviados para os sensores e atuadores (Dawson, Boyd, Dawson, & Nieto, 2006). Resumidamente podemos dizer que a RTU é responsável por adquirir todos os dados de diferentes dispositivos de campo, processá-los e transmiti-los para a estação mestre e ao mesmo tempo transfere os sinais de controle proveniente da estação mestre para os dispositivos de campos, daí a característica de comunicação bidirecional (Knight, 1991).

A IHM é o dispositivo que os operadores utilizam para interagir com o sistema SCADA, ou seja, é a interface necessária para a interação entre a unidade mestre e os usuários do sistema SCADA. Tal dispositivo começou a ser utilizado nos sistemas de controle mais modernos para facilitar os pessoas responsáveis pela operação do sistema na gestão geral da rede da fábrica ou empresa (Igre *et al.*, 2006; Knight, 1991). A figura 19 mostra um exemplo de arquitetura básica de um sistema SCADA.

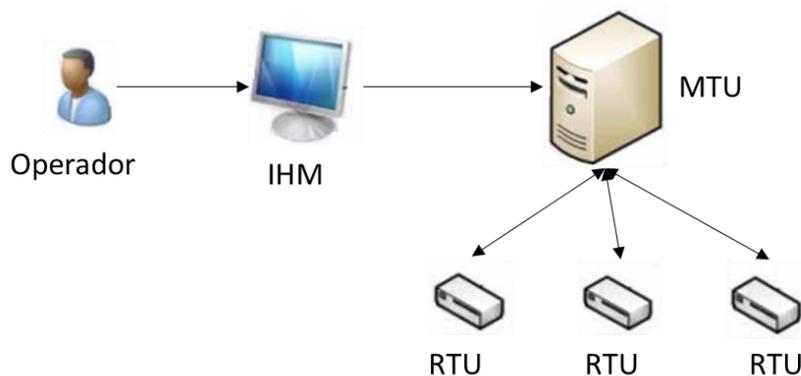


Figura 19- Arquitetura básica de um sistema SCADA
Fonte: Adaptado de Donghyun Choi *et al.* (2009)

2.4 Hardware-in-the-loop

No cenário mundial em que estamos inseridos onde o desafio tecnológico leva a uma maior dificuldade do entendimento dos sistemas de fabricação e restrições no tempo de projeto do sistema, é necessária a utilização de métodos de simulação aprimorados para possibilitar um *design* de garantia do projeto. Os principal objetivo da simulação envolve a

reprodução do processo para se ter a ciência de forma mais precisa do que se pode aplicar no mundo real (Menzel, Stoepler, & Douglas, 2005).

A utilização de um modelo de simulação se mostra atrativo por uma série de benefícios dentre as quais pode-se citar o baixo custo efetivo pois a máquina ou sistema real não é necessário. Outra importante vantagem em sua utilização é a segurança que o mesmo traz por não gerar riscos de avarias na máquina ou processo, bem como, a rapidez de configuração do estado da máquina ou processo sem ocorrer o consumo demasiado de tempo além de poder ser executada mais rapidamente do que em tempo real. Outro benefício é o reconhecimento de como novos conceitos podem ser testados antes da fabricação da máquina ou da execução do processo (Menzel *et al.*, 2005).

Um dos métodos de simulação mais utilizados é o *Hardware-in-the-loop* (HIL), pois tal método preenche a lacuna entre as simulações e as condições reais pois o HIL em tempo real representa o processo emulado através de um modelo de simulação com um *hardware* real interagindo com modelos elaborados em um *software* em um computador, desta forma no ciclo de desenvolvimento de um sistema o risco de se descobrir um erro nas últimas etapas e na montagem do campo é reduzido consideravelmente (Bin Lu, Monti, & Dougal, 2003).

Resumidamente pode-se caracterizar o HIL pela execução de componentes reais em conexão com componentes simulados em tempo real. Usualmente, o *Hardware* é do sistema de controle e o *software* é o sistema (processo) real, desta forma o processo controlado que consistem em atuadores, processo físico e sensores pode ser então simulado parcialmente ou totalmente, em geral alguns atuadores são reais e os sensores e processo são simulados, pois os atuadores e o *hardware* de controle em muitos casos forma um subsistema integrado e também pelo fato da dificuldade em se modelar com precisão e simular em tempo real os atuadores (Isermann, Schaffnit, & Sinsel, 1999).

Isermann *et al.* (1999) cita as vantagens da utilização do método de simulação HIL:

- Concepção e teste de *Hardware* e *Software* de controle sem a necessidade de operar um processo real;
- Teste do *Hardware* e *Software* de controle em condições ambientais extremas;
- Teste dos efeitos dos erros e falhas de sensores, atuadores e computadores no sistema;
- Operação e teste em condições extremas e perigosas;
- Repetição das experiências e testes;

- Fácil operação com diferentes interfaces homem-máquina;
- Economia de custo e tempo de desenvolvimento.

2.5 Automação na Indústria Cerâmica

A indústria cerâmica é, por certo, de uma forma geral, extremamente artesanal, pois dispõe de processos produtivos defasados, sistemas e métodos ultrapassados, baixa inovação tecnológica e produtos com baixo valor agregado (Bega *et al.*, 2011). No entanto, tal realidade vem sendo modificada nos últimos anos com o aumento do investimento por parte dos produtores em tecnologias para automatizar o processo ou parte dele, visando obter melhores produtos e custos desnecessários.

Mesmo com esse crescimento, são muitas as dificuldades encontradas para executar a automatização do processo, um dos principais problemas são os gastos iniciais com a compra e instalação de equipamentos e disposição do ambiente para a utilização de novos métodos industriais que são consideravelmente elevados, especialmente quando é necessário o treinamento da mão de obra (Bristot *et al.*, 2015).

Além dos fatores financeiros, um dos motivos que causam impedimentos ao desenvolvimento da automação nas cerâmicas é o fato de que a inclusão do controle automático no processo cerâmico ocorre por etapas, que em muitos casos evoluíram de forma paralela e assim não se encontram em um mesmo grau de desenvolvimento. Outro fator é que o material cerâmico é sólido sendo muito mais difícil de controlar do que os processos com fluidos, pois esse já possuem muito mais conhecimento adquirido além de sua natureza estrutural que requer múltiplas e complexas características no produto final como baixa porosidade, resistência ao desgaste (Gasch, 2007).

Com o propósito de avaliar a introdução do controle e automação na indústria cerâmica foram estabelecidos níveis de automação, que vai do nível 1 até o nível 4, sendo este o maior dos níveis. O nível 1 indica o controle manual do processo, neste caso são os próprios operários que registram as medidas e devido aos critérios do produto eles mesmo que atuam no processo executando as modificações necessárias.

O nível 2 é conhecido como controle automático das variáveis de máquina, desta forma o controle é executado diretamente no maquinário do processo produtivo não levando em consideração as variáveis de produto, já o nível 3 o controle das variáveis de processo é executado e são necessários conhecimentos do material do produto e em instrumentação, a

dificuldade de implantação desse nível de automação se dá pelo fato de em muitas casos não serem utilizados os sensores adequados ou não definir corretamente a variável a ser controlada.

O último nível, o quarto, envolve o controle global do sistema produtivo cerâmico, pois as etapas que a envolve são interdependentes sendo assim se ocorrer alguma pequena falha em alguma das etapas poderá gerar um problema maior em uma outra. Este último nível está em fase embrionária no setor cerâmico principalmente pelo fato de que para executar o controle do processo como um todo é muito caro além de que muitos equipamentos utilizam de protocolos de comunicação fechados impedindo assim a troca de informações entre dispositivos de diferentes marcas (Gasch, 2007)

Cada etapa do processo produtivo cerâmico contém algum tipo de automação e controle que pode ser empregada de acordo com a necessidade e o poder aquisitivo de cada produtor. Na primeira etapa, preparação da massa, a automação ocorre na moagem da matéria-prima, principalmente quando se utiliza moinhos contínuos. Neste caso dá-se o controle automático medindo continuamente a densidade e a viscosidade e, caso não esteja dentro das especificações, a atuação é feita pelo aumento ou diminuição das vazões de água e defloculante (Gasch, 2007).

Na secagem a automação envolve duas variáveis, umidade e granulometria, onde são necessários medidores infravermelhos que indicaram o valor dessas propriedades e assim executar a elevação ou declínio da temperatura de secagem. No entanto, esse tipo de sensor só consegue medir a umidade da superfície da peça não analisando valores de umidade residual interna que afeta diretamente a resistência mecânica, para que essa variável também possa ser controlada de forma automática são necessários sensores de micro-ondas e radiofrequência, este mais utilizado no setor cerâmico (Gasch, 2007).

A principal etapa, e que precisa ser melhor controlada e automatizada, é a queima pois é nela que são proporcionadas as propriedades técnicas e estéticas finais do produto cerâmico além de ser a que tem o maior gasto energético. Desta forma, as principais variáveis a serem controladas são a distribuição da temperatura pelo forno, pressão dos gases e quantidade de oxigênio no interior do forno, no entanto, as duas últimas não possuem até o momento uma forma de controle automático contínua apenas atuação sobre a curva de pressão e a porcentagem de gases no interior do forno. A temperatura interna é controlada de forma contínua, mas muitas vezes não é o suficiente e as diferenças de temperatura do topo para a bases do forno continuam muito acentuadas. Os equipamentos utilizados para efetuar o

controle desta variável são os termopares e sonda de temperaturas que atuam sobre válvulas ou servomotores (Gasch, 2007). No quadro 7 é possível visualizar com mais detalhes as medidas de controle sobre as principais etapas do processo produtivo cerâmico.

Quadro 7 – Controle e automação nas etapas do processo produtivo cerâmico

Etapa	Variável Medida	Ação	Tecnologia Medida	Variável Manipulada	Manipulação
Moagem	Densidade de suspensão	Automática	Sensor de efeito coriolis	Vazão de água	Automática
	Resíduo	Manual		Várias	Manual
	Viscosidade de Suspensão	Automática	Sensor vibrante	Vazão de defloculante	Manual
Prensagem	Umidade do suporte	Automática	Sensor de Infravermelho	Pressão Máxima	Automática
	Densidade Aparente do suporte	Manual		Pressão Máxima	
Secagem	Temperatura de Suporte	Automática	Pirômetro óptico	Temperatura – distribuição dos gases	Manual
	Umidade do suporte	Automático	Sensor de Radiofrequência	Temperatura dos gases – ciclo de secagem	Manual
Queima	Dimensões da peça	Automática	CCD linear	Temperatura	Manual
	Curvatura da Peça	Automática	Telômetros laser e ultrassons	Temperatura	Manual
	Aspecto visual da peça	Manual		Temperatura – ciclo – ar queimadores	Manual

Fonte: Adaptado de Gasch (2007)

Analisando o quadro 7 é possível notar que a parte de sensoriamento e aquisição de dados das variáveis em sua grande maioria, é feito de forma automática por vários equipamentos, no entanto, quando se trata da resposta através da ação nas variáveis manipuladas ainda, tal estágio ainda se encontra em desenvolvimento, com execução da resposta de forma manual na maioria das etapas.

O controle do processo de queima depende fortemente do tipo de combustível e do tipo de forno utilizado na indústria cerâmica. Atualmente, o controle automático da queima é implementado em cerâmicas que possuem combustível a gás e em fornos contínuos. Outro

ponto importante é que as soluções de automação existentes no mercado são de alto valor agregado e necessitam de mudanças radicais no processo produtivo, desta forma é necessário um aporte financeiro elevado para implementação do controle automático da queima.

Tal característica é evidenciada em Barbosa *et al.* (2008), o qual o controle do processo é automático em forno contínuo de rolo alimentado por válvulas que liberam o gás natural para que seja efetuada a queima. As medições são realizadas por termopares e centralizadas em um computador que envia um sinal de controle de acordo com a temperatura em cada zona do forno.

Outro exemplo de automação em fornos contínuos a gás pode ser visto em Bristot *et al.* (2015), em que foi executado o controle automático do processo através da implementação de servomotores nas válvulas de controle para controle do fluxo de gás, reduzindo o consumo de gás e gasto com perdas durante o processo.

Em cerâmicas que utilizam lenha ou pó de serra há uma grande dificuldade da implementação do controle automático devido ao inconveniente de serem combustíveis sólidos. Outro impeditivo para as indústrias são os fornos intermitentes que são mais antigos e possuem características construtivas que geram uma alta complexidade para a implementação do controle automático.

Em uma busca de trabalhos na mesma área de atuação, Lopes *et al* (2000) nos mostra que em fornos que possuem a lenha como combustível o controle da queima se dá principalmente pelo controle da entrada de ar na fornalha, sendo assim não um controle direto da quantidade de biomassa. No entanto em Azevedo *et al* (2017), é evidenciado que existem meios de aquisição da temperatura interna do forno de forma automática, sem fio e tempo real, não obstante a execução da ação de controle ainda se mostra manual em fornos intermitentes com combustível pó de serra. O presente trabalho irá atuar nessa lacuna, executando uma ação de controle automática em fornos intermitentes que possuem o pó-de-serra ou a lenha como combustível.



Figura 21- Localização da Arte Cerâmica Sardinha em São Sebastião

Fonte: Google Maps (2017)

A Arte Cerâmica Sardinha possui um total de 4 fornos todos eles intermitentes, no entanto com poucas diferenças em suas dimensões, onde produzem diversos tipos de estruturas cerâmicas com destaque para o tijolo maciço branco.

3.1.2 Características Técnicas

O forno utilizado para desenvolvimento do projeto possui 6,83 metros de diâmetro, 2,2 metros de altura do solo até a carga e 3,3 metros do solo ao centro da abóboda, além de possuir 4 fornalhas e duas portas de 1,84 metros cada, a largura da parede do forno é de 1,20 metros. Na Figura 22 pode ser visualizada uma das vistas da porta do forno cerâmico vermelho além de duas das suas 4 fornalhas.



Figura 22- Forno Intermitente Cerâmica Vermelha
Fonte: Autor (2018)

O material construtivo do forno é o tijolo maciço comum, somente as 4 fornalhas possuem tijolos refratários, pois podem atingir temperaturas de até 1200°C, neste tipo de forno a tiragem de gases é feita no piso, através da depressão causada por uma chaminé.

O forno opera em 3 fases, sendo a primeira o aquecimento da atmosfera interna do forno até a temperatura desejada, após alcançar essa temperatura, a alimentação do forno é diminuída afim de manter o valor constante por um período de tempo determinado e por último o forno é resfriado para que a carga possa ser manuseada.

3.2 Modelagem Matemática

Para um melhor entendimento do processo de queima e do forno em si, foi desenvolvido um modelo matemático que relaciona a umidade presente nos tijolos e a Temperatura interna do forno. É notório que com o passar do tempo de queima a umidade dos materiais cerâmicos devem diminuir e a temperatura dos mesmo aumentar, essa conexão foi abordada e foram obtidos dois modelos de equações diferenciais que evidenciam o comportamento do forno, uma equação diferencial para a temperatura e outra para a umidade, mas que se inter-relacionam.

Para se desenvolver o modelo matemático foram levados em considerações algumas leis da física e a interação entre seus parâmetros que podem ser vistos abaixo, já o modelo desenvolvido é visto no capítulo de resultados

3.2.1 Equações Diferenciais para o aquecimento de um forno

Para se verificar o comportamento de um forno duas de suas principais variáveis são a Temperatura e Umidade. Devido a isso foram elaboradas equações diferenciais que descrevem o comportamento do forno com relação a esses dois elementos.

3.2.1.1 Para a Temperatura

Para a temperatura primeiramente deve-se verificar como ocorre o transporte de calor, e a lei que define esse comportamento é a lei de Fourier que é dada por:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{q}, \quad (9)$$

onde K representa a condutividade térmica, ρ a densidade ou massa específica, C_p o calor específico do sólido e \dot{q} a geração de energia interna. Vale ressaltar que essa Lei é aplicada para sólidos, mas também é válido para líquidos e gases. Como as propriedades ρ e C_p são constantes a equação 9 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T), \quad (10)$$

onde α é a difusidade térmica e nada mais é do que:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p}, \quad (11)$$

a unidade da difusidade térmica, densidade e do calor específico é dada por:

$$[\alpha] = \frac{m^2}{s} ; [\rho] = \frac{kg}{m^3} \text{ e } [C_p] = \frac{J}{kg \cdot K}$$

3.2.1.2 Para a Umidade

O Transporte de massa é devido ao gradiente de umidade no interior do sólido que se relaciona com a taxa de secagem por:

$$\frac{dM}{dt} = \nabla \cdot (D \nabla M) + M'', \quad (12)$$

Onde D é o coeficiente de difusão de Massa e M'' representa a geração de massa. Essa equação é denominada Lei de Fick.

3.3 Sistema de Controle

O sistema de controle de alimentação (SCA) proposto tem como foco o controle da temperatura da atmosfera interna do forno. Para que isso seja possível a temperatura é aferida através de termopares instalados no interior do forno.

São 6 os termopares instalados do tipo K, estes são dispostos de forma que dois termopares se encontram na parte do meio das portas do forno, são eles chamados de M1 (Porta 1) e M2 (Porta 2); M4 equivale ao termopar que está na parte inferior da porta 1 (chão), este termopar só está localizado em uma das portas, diferente dos outros termopares onde existe um em cada Porta; C1 (Porta 1) e C2 (Porta 2) são os termopares que estão na parte superior das portas e T9 é o termopar que fica no topo da abóboda, este será o responsável por “guiar” o sistema de controle na medição da temperatura. Na Figura 23 é possível visualizar os Termopares M4, M1 e C1, na Figura 24 os Termopares M2 e C2 e na figura 25 o termopar T9.

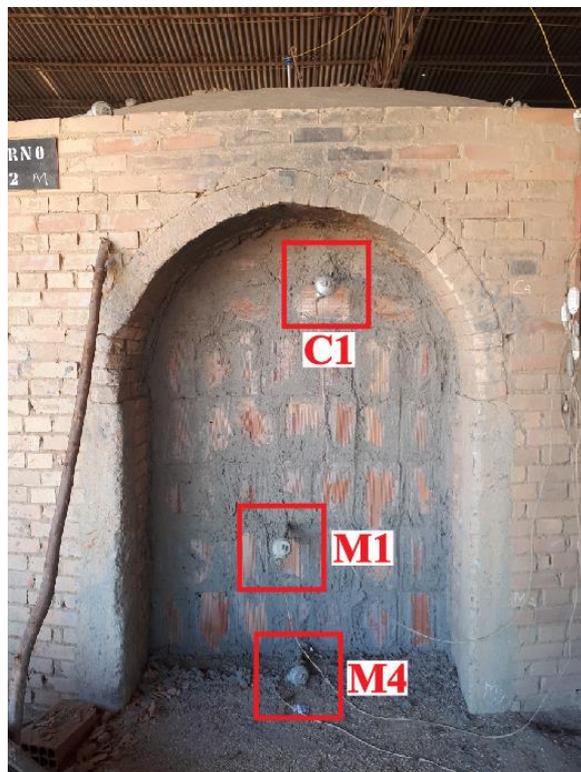


Figura 23- Termopares Instalados na Porta 1
Fonte: Autor (2018)



Figura 24- Termopares instalados na Porta 2
Fonte: Autor (2018)



Figura 25- Termopar instalado no Topo da Abóboda
Fonte: Autor (2018)

Os termopares em questão enviam a informação da temperatura para um Controlador Lógico Programável (C.L.P) onde vai estar a lógica de controle. Esses dados da temperatura para poderem ser manipulados pelo C.L.P. são adquiridos previamente por um Arduino MEGA R3, por possuir número de entradas e saídas suficientes para o processo em questão, satisfazendo não só a capacidade necessária para sincronização com os demais componentes presentes no sistema, como também um número extra de portas que podem ser utilizadas caso haja interesse em adicionar novas funcionalidades em posteriores atividades.

Para a leitura do sinal do termopar foi utilizado o módulo termopar Phoenix Contact Mini MCR-SL-TC-UI-NC que realiza a recepção, tratamento de ruídos, compensação da junta de referência e digitalização através de um conversor analógico-digital de 12 bits, enviando para o Arduino os valores de temperatura com uma resolução de 0,25°C.

Com os valores de temperatura o controle do processo pode acontecer de forma automática ou manual. Na automática todo aumento de temperatura e controle em um determinado valor é feito automaticamente através da lógica de controle implementada no C.L.P. No controle Manual a escolha da temperatura de *setpoint* e o valor que “sai” do inversor de frequência para a máquina de pó de serra e soprador de ar é feita pelo operador, permanecendo nela o tempo em que ele julgar necessário.

Em modo automático, o C.L.P. atua no processo através da adição ou não de combustível nas fornalhas, além do acréscimo de comburente (ar) para o interior da fornalha. O combustível utilizado no forno estudado é o pó de serra. O mesmo é enviado para o interior da fornalha através de uma máquina de pó de serra, que possui um motor que gira uma espécie de dente de uma engrenagem responsável por jogar o combustível para o interior da fornalha, onde se pode regular a velocidade de giro e conseqüentemente a quantidade de pó de serra que irá para dentro da fornalha, através da sua conexão a um inversor de frequência que regula a frequência que chegará à máquina.

De acordo com a informação de temperatura que vem dos termopares e com a interação desses dados na lógica de controle, o C.L.P irá mandar o motor girar mais rápido ou mais devagar e assim ter mais ou menos pó de serra nas fornalhas. O mesmo vale para a adição do ar para o interior da fornalha. A relação entre combustível e comburente é descrita na lógica de controle.

São 4 Sopradores de combustível um para cada fornalha e 2 de comburente e os mesmos estão conectados aos inversores de frequência que recebem a informação proveniente

do C.L.P de quanto deve soprado para a fornalha. Na figura 26 é possível ver uma das máquinas de pó de serra.



Figura 26- Máquina de pó de serra conectada a uma das fornalhas
Fonte: Autor (2018)

O SCA operando em modo automático não necessita de um operador para mudança de temperatura de *setpoint* pois a mesma muda de valor de acordo com a lógica de controle. A única intervenção humana no processo é a necessidade de manter cheio o reservatório de pó de serra que fica a cima da máquina de pó de serra, pois assim nunca ocorrerá erro ou falta do combustível quando for preciso adicionar o mesmo para o interior da fornalha. O modelo esquemático do sistema pode ser visto na figura 27.

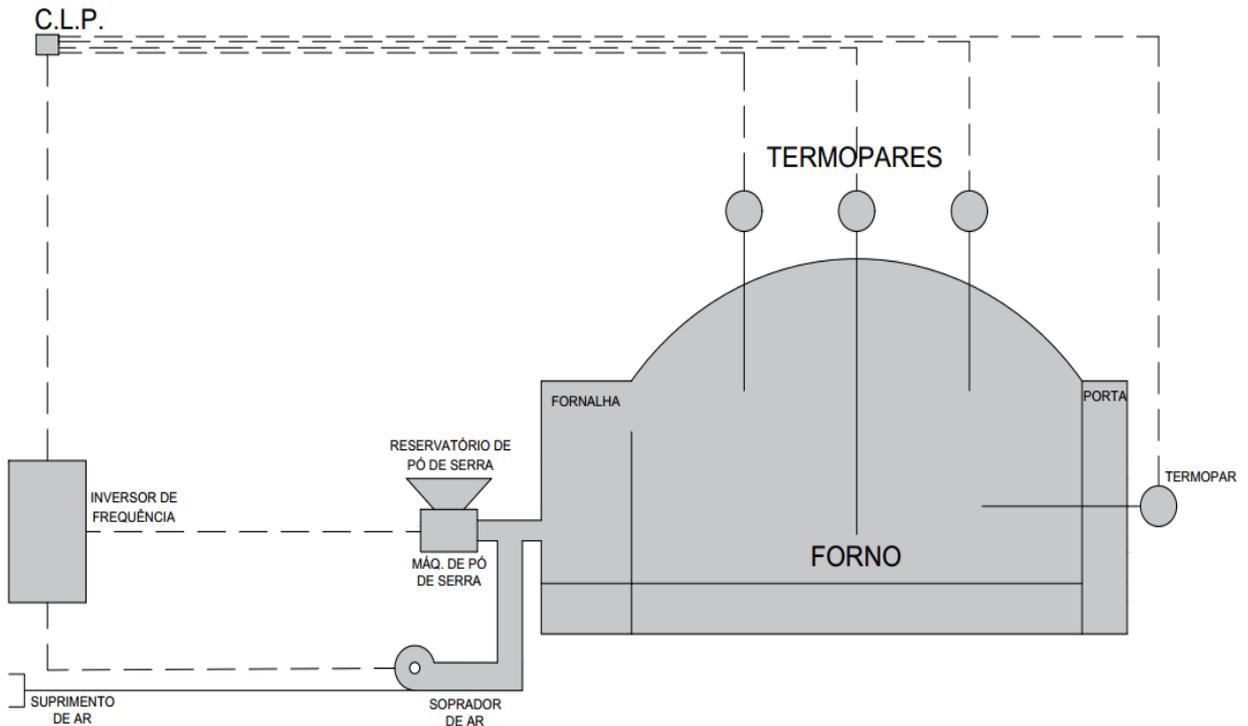


Figura 27- Modelo do SCA

Fonte: Autor (2018)

3.4 Simulação do processo utilizando a técnica *Hardware-in-the-loop*

Para que a simulação do processo ocorra é necessário ser realizada uma série de etapas para garantir a fidelidade com o processo real. A primeira etapa a ser desenvolvida é a integração entre os *softwares* e o *hardware* utilizados.

Os softwares escolhidos para a implementação da simulação foram o Matlab, com a utilização da ferramenta Simulink, o InTouch onde foi desenvolvida a tela de supervisão e interação com o operador e o PC Worx Express onde foi desenvolvido a programação de controle inserida no C.L.P.

O *hardware* utilizado foi o C.L.P Phoenix Contact – modelo ILC 150 ITH. Nas figuras 28 e 29 é possível visualizar o C.L.P. Phoenix e o seu ambiente de programação. Todos os *softwares* e *hardwares* foram escolhidos devido a disponibilidade dos mesmos nos laboratórios utilizados durante o desenvolvimento do trabalho, sendo possível a implementação do mesmo sistema de controle com a utilização de *softwares* e *hardwares* que possuam as mesmas características e funcionalidades.



Figura 28- C.L.P. Phoenix
Fonte: Autor (2018)

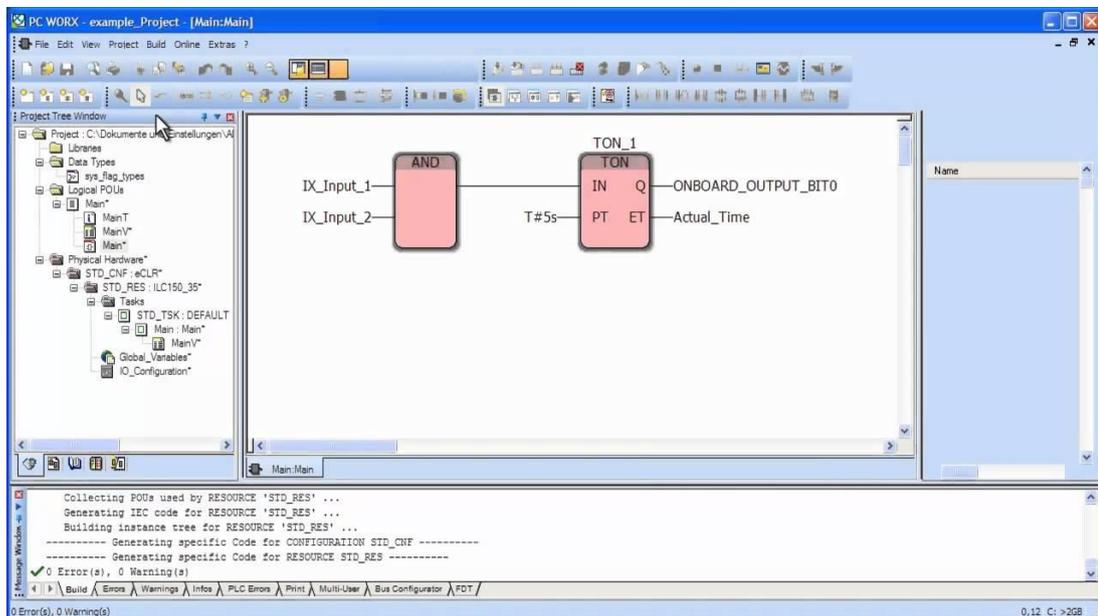


Figura 29- Ambiente de programação Pc Worx Express
Fonte: Autor (2018)

A segunda etapa é a de implementação do sistema de controle no hardware e por último a execução da comunicação entre os *softwares*. A terceira fase desenvolvimento de uma Interface Homem-Máquina (IHM) para interação do operador com o sistema e visualização do comportamento do processo em tempo real.

3.4.1 Integração e Comunicação entre *Software's e Hardware's*

Para que haja a integração entre os *softwares* e entre os *softwares* e *hardwares* é necessário estabelecer protocolos de comunicação entre eles.

3.4.1.1 Integração e Comunicação InTouch x Simulink

A comunicação entre o InTouch e o Simulink é feita através do protocolo chamado *Dynamic Data Exchange* (DDE) que executa troca de informações entre aplicações Windows. Neste sentido é preciso criar um canal de comunicação no Simulink através do comando `ddeinit` como pode ser visto na figura 30.

```
canal=ddeinit(view,'tagname')
global canal
close all
```

Figura 30- Criação do canal de comunicação entre Simulink e InTouch
Fonte: Autor (2018)

Para que a informação inserida pelo operador na tela de supervisão do sistema seja “lida” ou para que uma informação do Simulink seja “escrita” no *Software* de Supervisão (InTouch) é necessário a utilização do Bloco “*Matlab Function*” no Simulink.

Para blocos com funções de Leitura é utilizado o comando `ddereq`, onde devem entrar como parâmetros o canal de comunicação e o nome da variável a ser lida e para funções de escrita é utilizado `ddepoke` que utiliza das mesmas configurações anteriores com a adição de mais um parâmetro, que é o valor que deve ser escrito na variável escolhida. O bloco *Matlab function* e as configurações de leitura e escrita podem ser vistas nas figuras 31, 32 e 33.

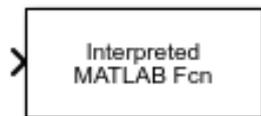


Figura 31- Bloco *Matlab Function*
Fonte: Autor (2018)

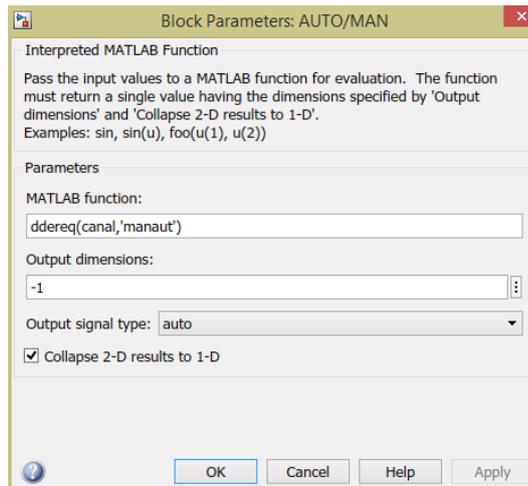


Figura 32- Função de leitura ddereq

Fonte: Autor (2018)

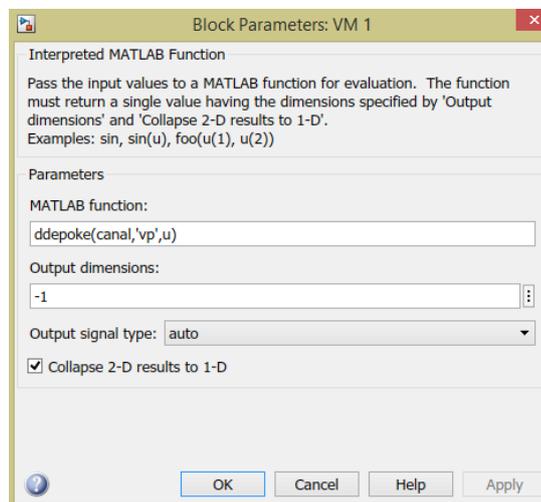


Figura 33- Função de Escrita ddepoke

Fonte: Autor (2018)

Os valores dos Parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador P.I.D. são ajustados no supervisor e são enviados para o Simulink, para que o mesmo os aloque na memória do C.L.P reservada para tais parâmetros. No entanto, se for utilizada a função de leitura do InTouch, ddereq, igual descrita anteriormente, somente os valores inteiros são enviados para o C.L.P. Para que seja encaminhado o valor com a parte decimal e necessário acrescentar novas propriedades à função ddereq. A configuração da *Matlab Function* com essas novas propriedades referentes ao K_p , K_i e K_d é mostrada na figura 34.

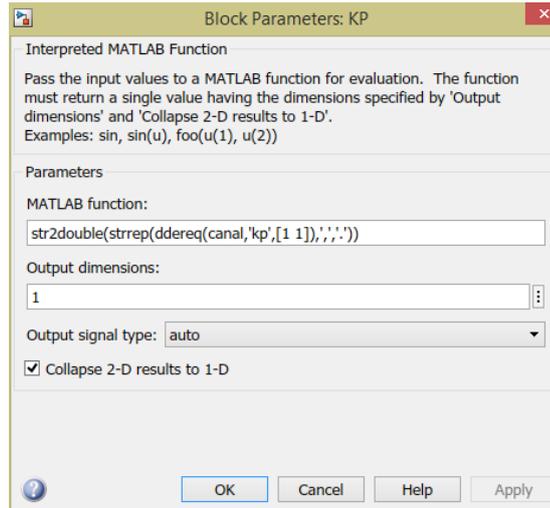


Figura 34- Configuração da *Matlab Function* do Parâmetro Kp
Fonte: Autor (2018)

3.4.1.2 Integração e Comunicação C.L.P. x Simulink

A comunicação entre o C.L.P. Phoenix e o Simulink é feito através do protocolo de comunicação O.P.C. (*OLE for Process Control*) desenvolvida pela Microsoft para conectar ou integrar documentos e outros objetos.

O servidor OPC escolhido para a comunicação foi o AX OPC Server 3.0. Nesta aplicação deve-se escolher o nome do seu servidor OPC, selecionar o C.L.P através da opção ILC 1xx(FW>=V1.00) e inserir o IP do que está configurado no C.L.P. Esta configuração pode ser vista na figura 35.



Figura 35- Configuração do driver de comunicação OPC
Fonte: Autor (2018)

Após a configuração do protocolo OPC, o mesmo deve ser configurado em cada um dos softwares. No software do C.L.P, o *PC Worx Express*, deve-se apenas configurar o IP que

foi cadastrado no driver OPC e a cada variável que for criada é preciso selecionar a opção OPC para que a mesma utilize este tipo de protocolo. A configuração do IP no *PC Worx Express* pode ser vista na figura 36 e as variáveis com a seleção do protocolo OPC na figura 37.

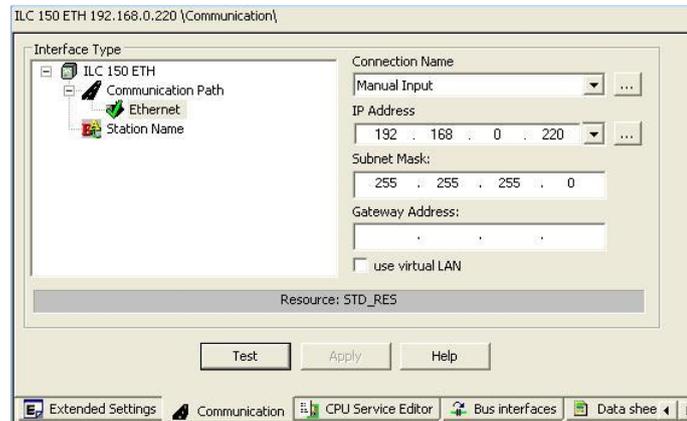


Figura 36- Configuração do IP no PC Worx Express
Fonte: Autor (2018)

Name	Type	Usage	Description	Address	Init	Retain	PDD	OPC	TB
Default									
FPID_1	FPID	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ENABLE	BOOL	VAR			1			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AUTO_MANUAL	BOOL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
DIRECT	BOOL	VAR			0			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FALSE_BOOL	BOOL	VAR			0			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SAMPLE_TIME	REAL	VAR			0.1			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SP	REAL	VAR			20.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TEMP	REAL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
KP	REAL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TI	REAL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TD	REAL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TEMP_MAX	REAL	VAR			100.0			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TEMP_MIN	REAL	VAR			0.0			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ZERO	REAL	VAR			0.0			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COMB	REAL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V000	REAL	VAR						<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TON_1	TON	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V001	TIME	VAR			t#120s			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V002	TIME	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T01	BOOL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
M01	BOOL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V003	TIME	VAR			t#115ms			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V004	REAL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TON_2	TON	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
m02	BOOL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V005	TIME	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V006	REAL	VAR			900.0			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V007	BOOL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TON_3	TON	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T03	BOOL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V008	TIME	VAR			t#2160s			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
V009	TIME	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
M03	BOOL	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TON_4	TON	VAR						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 37- Variáveis no PC Worx Express que utilizam o protocolo OPC
Fonte: Autor (2018)

No Simulink deve-se configurar o protocolo OPC através do bloco “*OPC Config Real Time*”. Neste bloco seleciona-se o C.L.P. Phoenix como cliente OPC. Este passo é de fundamental importância para a comunicação da simulação pois é a partir dele que os valores

armazenados nas variáveis do Simulink serão escritos ou lidos do mapa de memória do controlador e assim venha atuar sobre a planta do sistema. A figura 38 mostra o bloco “*OPC Config Real Time*” e a figura 39 evidencia como deve ser configurado o bloco OPC no Simulink.

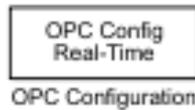


Figura 38- Bloco *OPC Config Real-Time*
Fonte: Autor (2018)

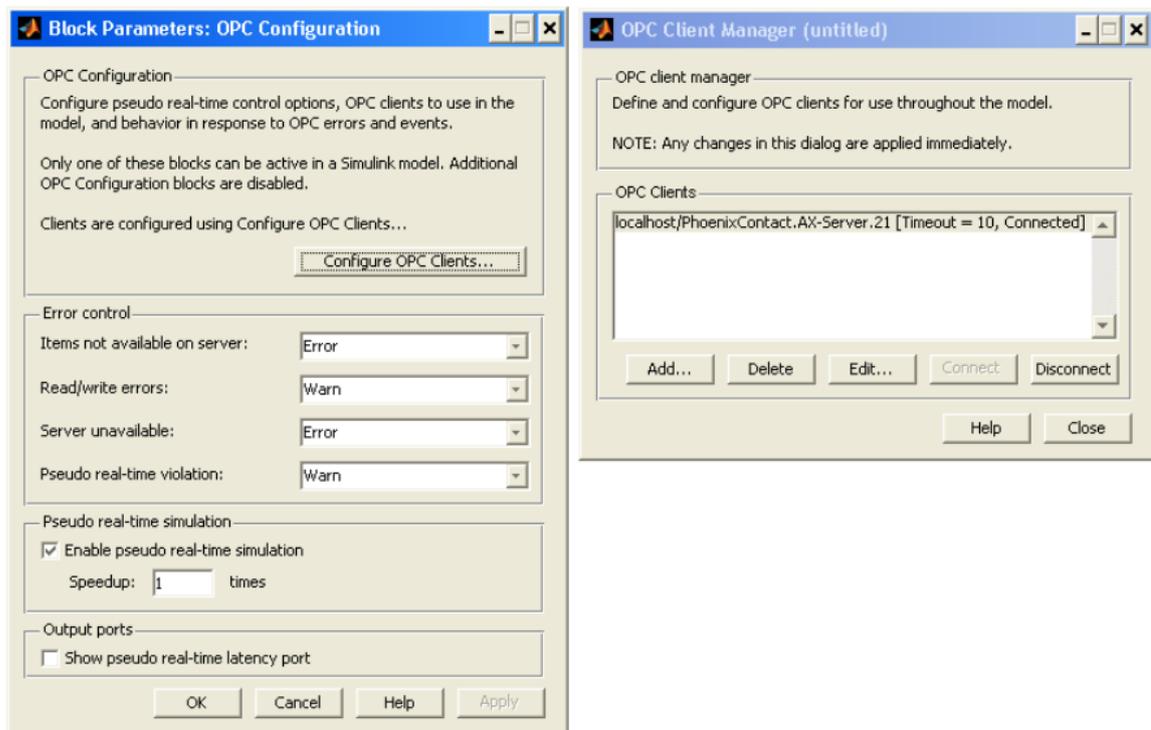


Figura 39- Configuração do Bloco *OPC Config Real-Time*
Fonte: Autor (2018)

Outro passo que deve ser executado antes de se iniciar a simulação é de configurar o servidor OPC no Matlab através do comando “opctool”. Ao executá-lo abre-se uma janela onde deve-se configurar o servidor OPC, escolhendo um “*Host Name*” e iniciar a conexão do servidor. Tal procedimento pode ser visto na figura 40.

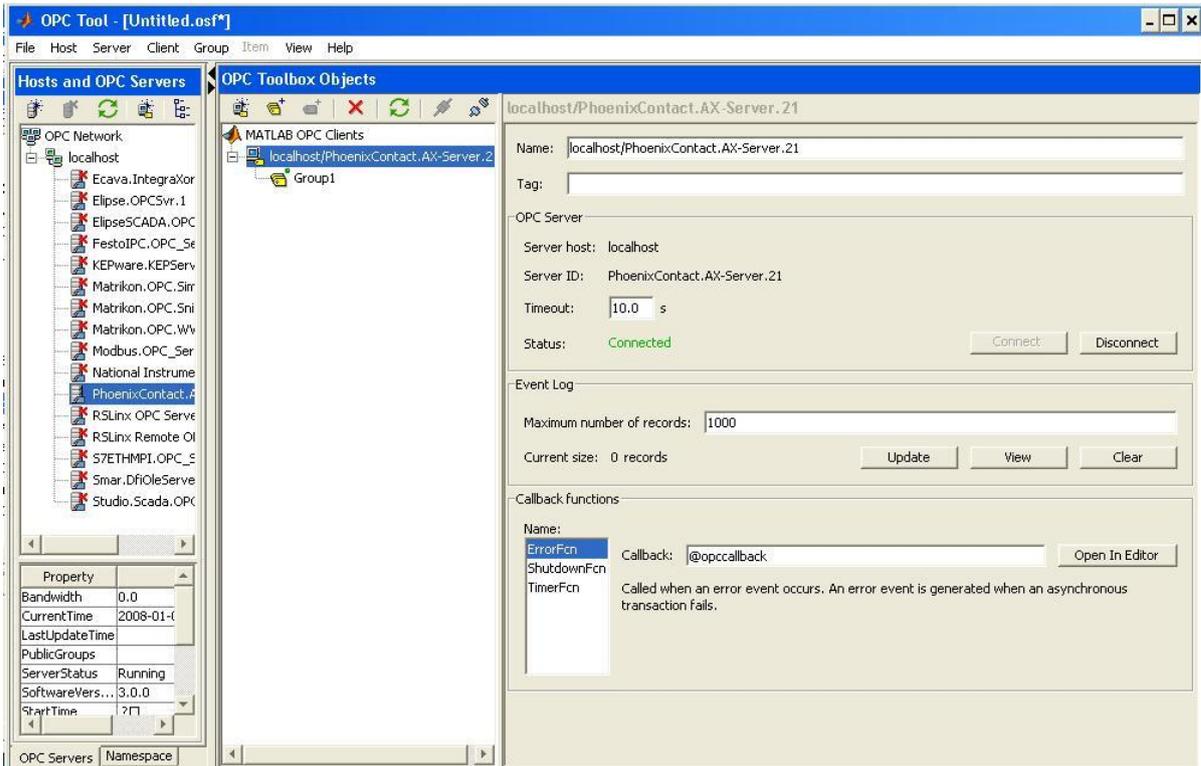


Figura 40- Configuração do OPC Toll
Fonte: Autor (2018)

Ainda no Simulink são necessários blocos de leitura e escrita para que os dados sejam enviados e recebidos do C.L.P. para o Simulink e vice-versa. O bloco de leitura de valores do C.L.P é chamado “*OPC Read*”, para cada variável que deve ser lida do C.L.P. deve-se criar um bloco específico com o nome referente a ela que foi criado no C.L.P. O bloco e a configuração do mesmo podem ser vistos na figura 41.

O bloco de escrita dos valores que estão no Simulink para o C.L.P é chamado de “*OPC write*”, onde como se faz no bloco “*OPC read*”, também deve-se criar um bloco para cada variável que deve ser escrita na memória do C.L.P. O bloco e a configuração do mesmo podem ser vistos na figura 42.

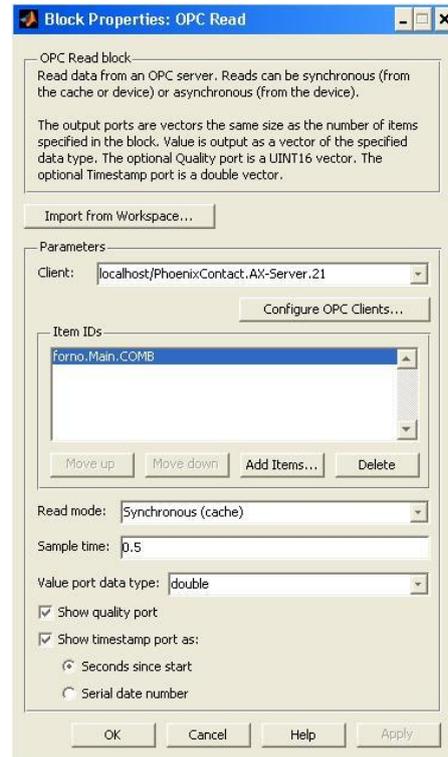
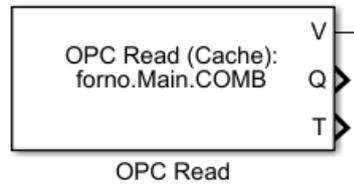


Figura 41- Bloco e configuração do *OPC read*
Fonte: Autor (2018)

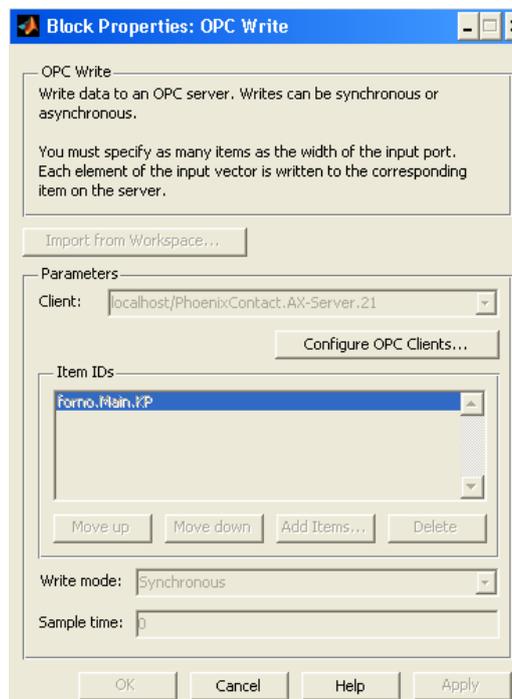
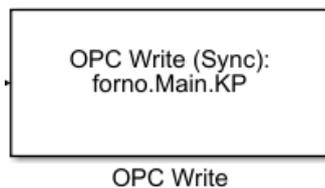


Figura 42- Bloco e configuração do *OPC Write*
Fonte: Autor (2018)

Vale ressaltar que não há uma comunicação direta entre InTouch e o C.L.P. Os dados que devem ser levados do InTouch para o C.L.P passam pelo Simulink e o mesmo reenvia esses dados do InTouch para o C.L.P e da mesma forma do C.L.P. para o InTouch.

3.4.2 Lógica de Controle

O sistema de controle da queima implementado no C.L.P foi desenvolvido na linguagem de programação *Ladder*. Essa Linguagem faz o uso de representações gráficas de contatos, bobinas e blocos operacionais para ser efetuado a lógica de controle e é umas das cinco linguagens definidas pela norma IEC 61131-3.

A lógica de controle foi elaborada de acordo com a instrução de profissionais com experiência no ramo cerâmico. Ficou estabelecido que quando em automático a temperatura de *setpoint* aumentaria 30°C de 2 em 2 horas até chegar na temperatura máxima selecionada pelo operador, sendo estabelecido o Termopar do Topo (T9) como parâmetro para efetuar o acréscimo na temperatura.

O tempo de queima varia de acordo com a temperatura máxima estabelecida pelo operador e isso afetará a quantidade de incrementos em que a temperatura irá sofrer. No entanto a partir de informações de especialistas o tempo de queima médio determinado na simulação foi de 100 horas, sendo 50 horas para aquecimento até a temperatura máxima de 900°C e 50h controlando neste valor. Após isso o processo entra em resfriamento natural sendo desligado o sistema de controle automático.

No modo Manual o C.L.P fica no aguardo de receber a mudança de *setpoint* e o valor em que o inversor de frequência deve estar para controlar a velocidade do soprador de ar e da máquina de pó de serra, para que ele possa agir no processo de queima e elevar a temperatura até o *setpoint* estabelecido. Ainda nesse modo de controle existe uma lâmpada a de sinalização que indica se a temperatura ultrapassou o valor máximo de 950°C. Vale ressaltar que o modo manual somente deve ser utilizado em caso de falha ou algum outro fator que atrapalhe o sistema a funcionar em modo automático.

O Controle Automático é executado pelo C.L.P Phoenix Contact ILC 150 ITH e o *Software* utilizado pelo mesmo para a implementação da lógica é o *PC Worx Express*. Para execução do controle foi utilizada a estratégia *Feedback* com a leitura da temperatura sendo feita por um Termopar localizado no Topo do forno, o controle feito por um P.I.D. implementado no *software* do C.L.P, onde através dos ajustes dos parâmetros proporcional,

integral e derivativo se obtém a melhor resposta de controle. E a ação no processo é feita por um soprador de ar e uma máquina de pó de serra, ambos associados a inversores de frequência que controlarão a velocidade de sopro e giro dos mesmos.

A relação entre a quantidade de combustível e ar foi definida através da revisão de literatura feita e ficou estabelecido uma razão de 20% a mais de comburente para que ocorra uma queima ideal. A lógica de controle desenvolvida pode ser vista na figura 43.

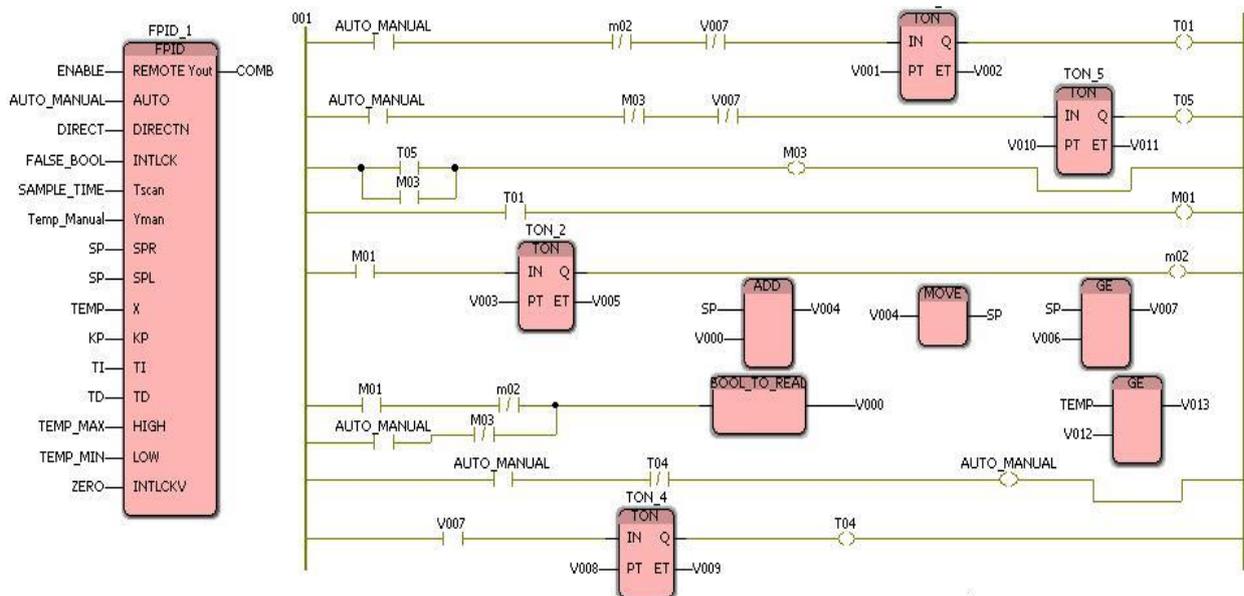


Figura 43- Lógica de Controle no C.L.P.
Fonte: Autor (2018)

Como pode ser visto na figura 43, foi implementado um bloco P.I.D. que recebe seus parâmetros K_p , T_i e T_d provenientes do Simulink, que anteriormente vem do InTouch, bem como o valor da variável de processo (Temperatura). O valor de *setpoint* é incrementado em 30°C automaticamente de tempos em tempos definidos pela lógica, esta interação é feita através do bloco “*BOLL_TO_REAL*” e “*ADD*”, onde após a saída do bloco “*BOLL_TO_REAL*” for 1, ocorre um acréscimo no *setpoint* no bloco “*ADD*” por 115 ms que é o tempo que leva para aumentar em 30°C após esse degrau na temperatura, é esperado mais 1 minutos para um novo acréscimo de 30°C .

Quando a temperatura de *setpoint* chegar em 900°C esse incremento da temperatura é interrompido e permanece durante 25 minutos até acabar o processo de queima e entrar no resfriamento, onde o sistema sai do controle automático desabilitando o bloco P.I.D.

Para que o sistema se comporte como o real é atribuído inicialmente ao *setpoint* e temperatura o valor de 150°C, que é o valor médio em que se inicia o processo de queima devido ao reaproveitamento do calor da queima proveniente de outro forno. A atribuição do *setpoint* é feita através de um bloco temporizador que fica acionado o tempo necessário para incrementar o mesmo até 150°C, após esse tempo essa linha do código não executa nenhuma outra função. Já para a temperatura foi preciso apenas a configuração da variável com valor inicial de 150°C.

Como se trata de uma simulação e pela inviabilidade de simular o processo com a sua duração de tempo real, aproximadamente 100 horas, foi necessário ajustar os parâmetros do P.I.D. para valores que realizem o controle mais rapidamente dentro de um tempo especificado, onde para cada minuto de simulação representa 2 horas do tempo real. Desta forma a temperatura que deve ser aumentada de 30°C de 2 em 2 horas, é elevada a esse valor de 1 em 1 minutos e o tempo de queima de 100 horas equivale a 50 minutos da simulação. Para se ajustar ao ambiente real, deve-se colocar outros valores no P.I.D. seguindo a ordem de grandeza adotada.

Ainda na lógica de controle existe uma comparação, através do bloco “GE” (maior ou igual) entre o valor atual da temperatura com o valor de 950°C, e que se caso for verdade, a saída do bloco retorna valor 1, e assim um alarme é acionado no *software* de supervisão.

3.4.3 Diagrama de Blocos

Para que a simulação ocorra é necessário a implementação de um diagrama de blocos no Simulink que relacione todas as variáveis do sistema com a função de transferência que relacione corretamente a entrada e saída do seu processo. Como a técnica de simulação escolhida foi a *Hardware-in-the-loop* utiliza-se de um controlador real e a planta virtual, no caso, a planta em questão é a função de transferência que relaciona a entrada do processo (Combustível) com a saída (Temperatura).

A estratégia de controle escolhida foi a de controle realimentado, chamada também de *feedback*, onde utiliza-se de apenas a informação do sensor (Termopar) para compara com o valor desejado (referência) da temperatura que gera um erro e assim ocasiona uma ação de controle que interage com a planta do sistema e retorna um valor que será lido novamente pelo sensor e enviado para comparação. Este ciclo ocorre até o erro ser zero ou ficar muito próximo de zero, dependendo sempre dos parâmetros de controle controlador utilizado. A

Estratégia Feedback de controle na qual foi baseado o sistema de controle pode ser vista na figura 44.

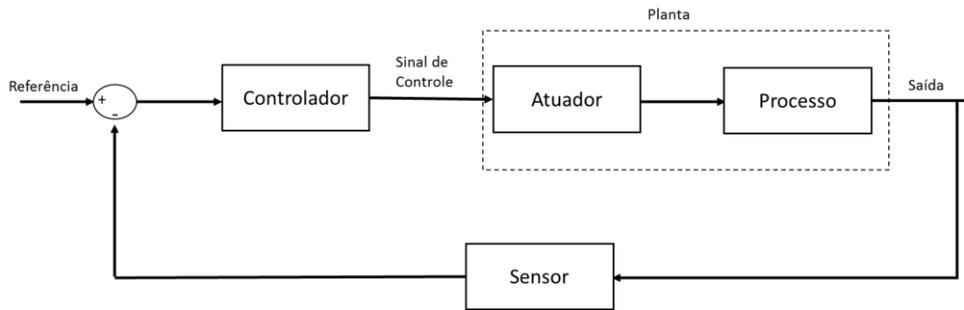


Figura 44- Controle Feedback
Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

3.4.3.1 Obtenção da Planta do Sistema

A partir da ideia de como se comporta um sistema de controle *feedback* foi necessária a obtenção da função de transferência que relacione a quantidade de combustível com a temperatura. Para isso foi realizada uma experiência onde foi aferida a temperatura inicial do sistema com 0% de combustível. Logo após foi colocado a máquina de combustível e o soprador de ar com carga máxima e verificada em qual temperatura o mesmo se estabilizaria. Vale ressaltar que o procedimento foi realizado com carga no interior do forno. Com tal método foi obtida a curva que pode ser vista na figura 45.

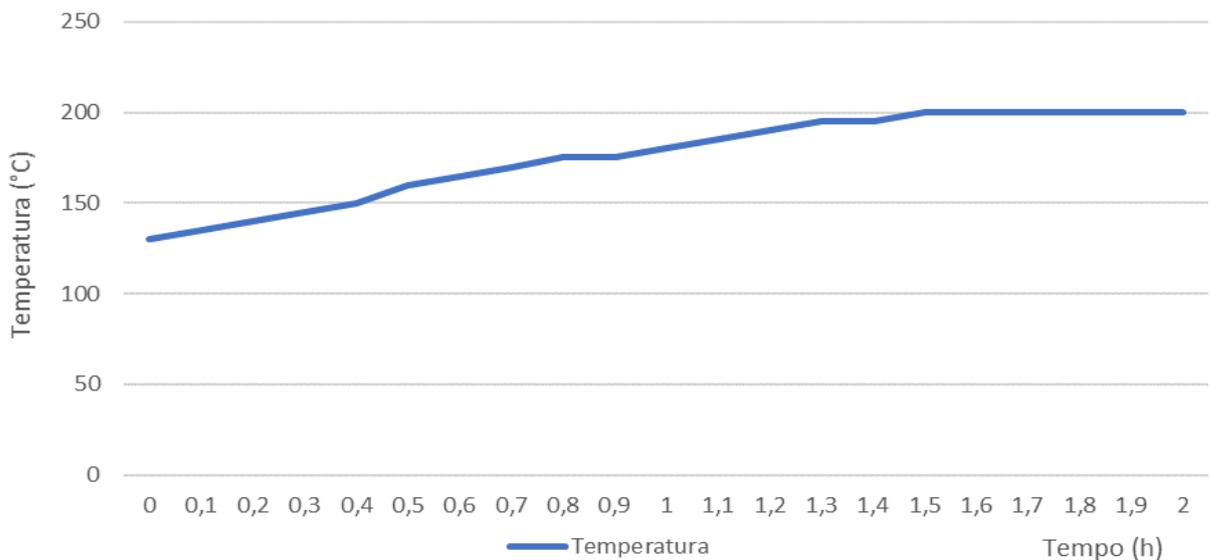


Figura 45- Comportamento do sistema
Fonte: Autor (2018)

Efetuada uma análise do comportamento do sistema é verificado que o mesmo se comporta como um sistema de ordem 1. Sabe-se que um sistema de primeira ordem se comporta conforme a equação descrita pela figura 8.

Desta forma para se encontrar a constante de tempo T , é necessário verificar no gráfico o momento em que o sistema atinge 63,2% do valor final. Para isso foi utilizado o Matlab. Os valores foram colocados em uma matriz e plotados em um gráfico e sabendo que o valor final da temperatura é de 200°C e o inicial é de 130°C , o valor correspondente a 63,2% nesse range da temperatura é de $174,2^{\circ}\text{C}$. O tempo em que o sistema atinge essa temperatura é de aproximadamente 2880s, como pode ser vista na figura 46.

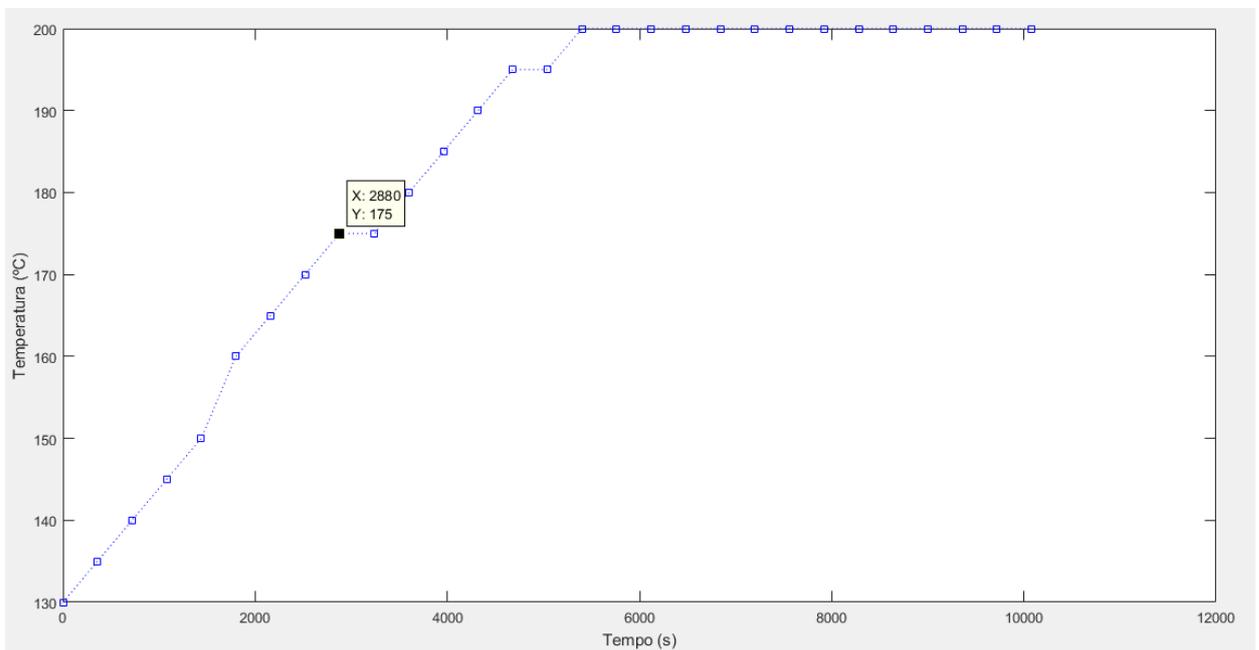


Figura 46- Valor de tempo correspondente a 63,2% da resposta final
Fonte: Autor (2018)

Com o valor da constante de tempo e sabendo que o ganho do processo é de 70, já que essa é a diferença entre a temperatura inicial e final do sistema, desenvolveu-se o código no Matlab para obtenção da função de transferência que pode ser visto na figura 47. A função de transferência de primeira ordem que descreve o sistema pode ser vista na equação 13.

```

Testeforno.m  x  +
1 - T = [130 135 140 145 150 160 165 170 175 175 180
2 - 185 190 195 195 200 200 200 200 200 200 200
3 - 200 200 200 200 200 200]
4 - x=[0:360:10080]
5 - plot(x,T,'b:s')
6 - t=2600
7 - num=[70]
8 - den=[t 1]
9 - f=tf(num,den)
10 - hold on;
11 - step(f+130,'rd')

```

Figura 47- Código para obtenção da função de transferência e plotagem dos gráficos
Fonte: Autor (2018)

$$\frac{T(s)}{C(s)} = \frac{70}{2880s+1} \quad (13)$$

Para comparação do sistema real com o a função de transferência foi plotado em um gráfico, o comportamento do sistema real e a resposta a uma entrada do tipo degrau da função de transferência. A figura 48 mostra o desempenho dos dois sistemas.

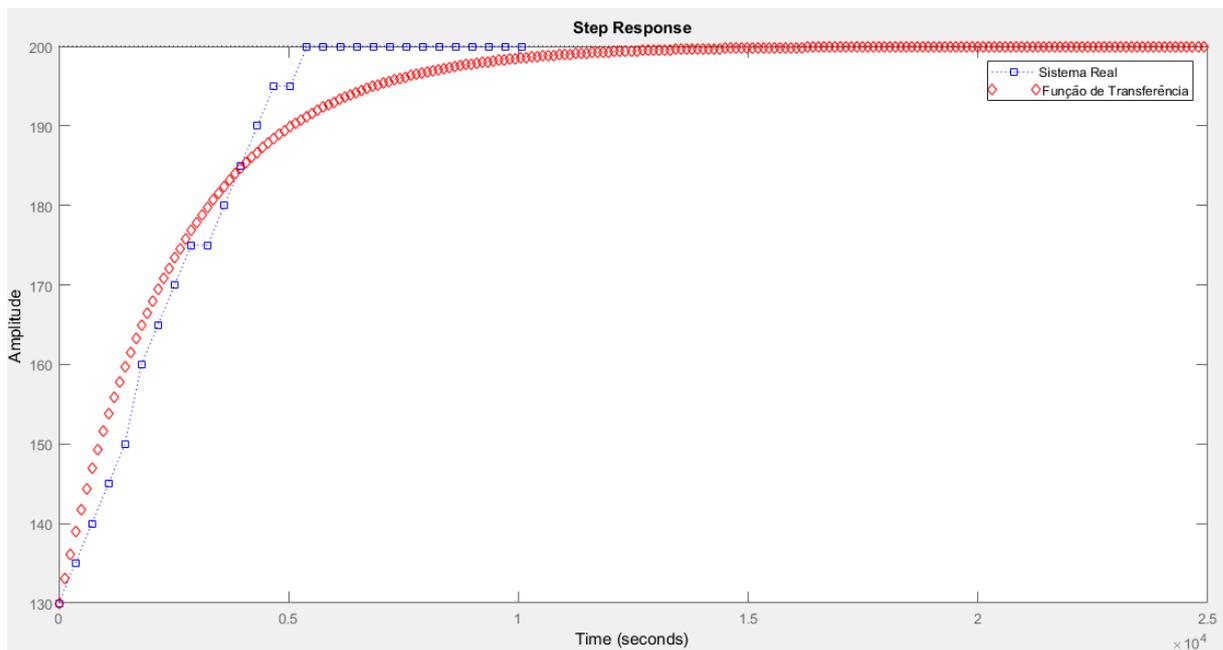


Figura 48- Comparação Sistema real x Função de transferência
Fonte: Autor (2018)

Analisando a figura 48 é possível notar o comportamento bem próximo do sistema real com a função de transferência de primeira ordem, ficando notório apenas uma defasagem quanto a acomodação do sistema em que a função de transferência demora um pouco mais para chegar ao valor final, no entanto, tal fator não tem tanta influência no comportamento do

sistema visto que ambos sistemas se comportam de forma muito semelhante no regime transitório de subida.

Para que o mesmo sistema possa ser melhor estudado foi realizado também a obtenção de uma função de transferência de segunda ordem. Para tal deve-se considerar que um sistema de segunda ordem se comporta conforme mostrado na equação (2).

Analisando a figura 46 e a figura 11 é possível notar que o sistema em questão se comporta como um sistema criticamente amortecido onde não se tem sobressinal, mas o tempo de acomodação é um pouco maior do que o sistema subamortecido. Com essa definição sabe-se que os valores de ζ variam entre 0,9 e 1.

Observando novamente a figura 46 é possível identificar o tempo de acomodação do sistema (T_s), como pode ser visualizado na figura 49.

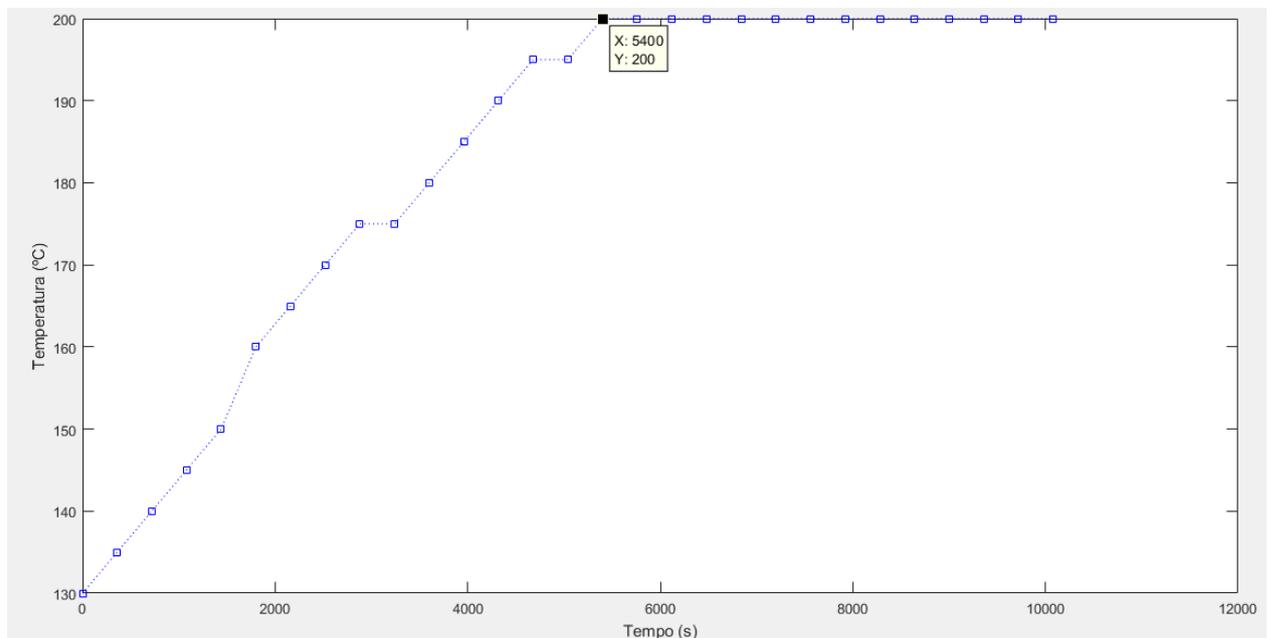


Figura 49- Identificação do tempo de acomodação
Fonte: Autor (2018)

Determinado o tempo de acomodação, sabendo que o W_n pode ser calculado a partir da equação 4 e considerando que $0,9 < \zeta < 1$, foi desenvolvido um código no Matlab para a obtenção da função de transferência de segunda ordem do sistema através da variação de ζ , dentro da faixa especificada. O código do Matlab pode ser visto na figura 50 e a função de transferência obtida para o $\zeta=0,99$ na equação 14.

```

Testeforno.m  x  +
1 - T = [130 135 140 145 150 160 165 170 175
2 - 175 180 185 190 195 195 200 200 200 200
3 - 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200]
4 - x=[0:360:10080]
5 - plot(x,T,'b:s')
6 - Ts=5400;%tempo de acomodação
7 - y=0.99;%zeta
8 - Wn=(4.6/(y*Ts))%Cálculo de Wn
9 - num=(Wn^2);
10 - den=[1 2*y*Wn Wn^2];
11 - g=70*tf(num,den)
12 - hold on
13 - step(g+130,'rd')

```

Figura 50- Código para obtenção da função de transferência de segunda ordem
 Fonte: Autor (2018)

$$\frac{T(s)}{C(s)} = \frac{0,00005183}{s^2 + 0,0017045s + 0,0000007404} \quad (14)$$

Para comparação do sistema real com o a função de transferência de segunda ordem foi plotado em um gráfico, o comportamento do sistema real e a resposta a uma entrada do tipo degrau da função de transferência. A figura 51 mostra o desempenho dos dois sistemas.

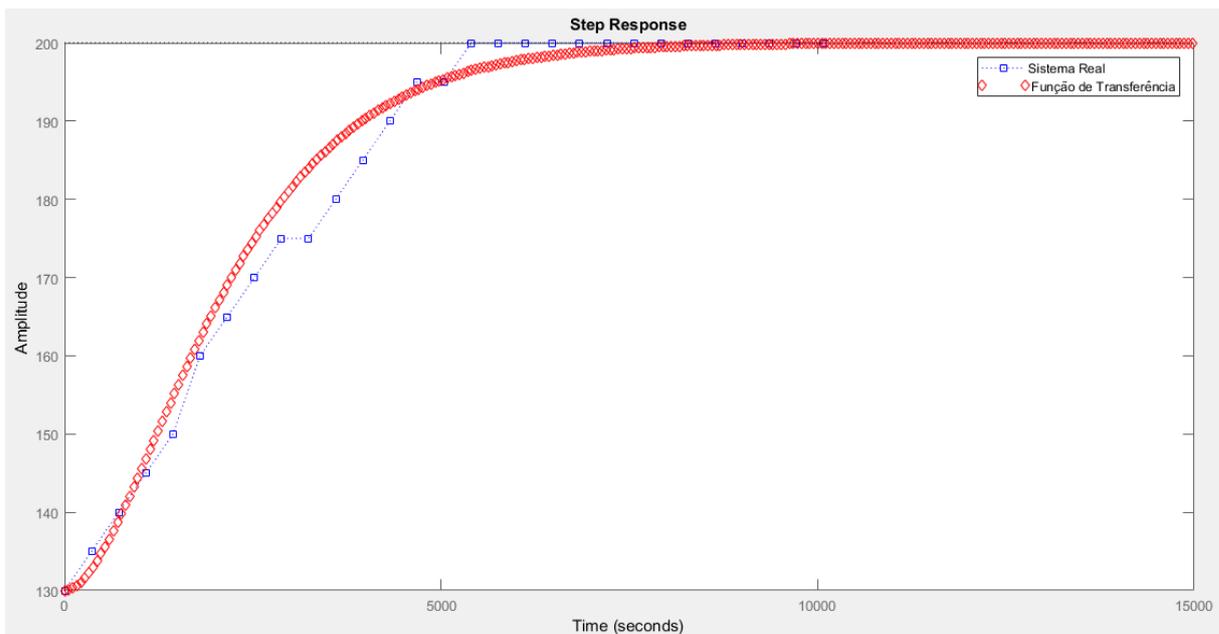


Figura 51- Comparação do sistema real com função de transferência de 2º ordem
 Fonte: Autor (2018)

Observando tanto a resposta ao degrau para uma função de transferência de primeira quanto para a de segunda ordem nota-se que o sistema real é descrito de uma forma fidedigna em ambos, podendo utilizar qualquer uma das funções como planta do sistema durante a simulação.

A comparação dos sistemas de primeira ordem e segunda ordem podem ser vistos na figura 52, que evidencia a diferença apenas na acomodação do sistema nada que diferencia drasticamente o comportamento em comparação de um com outro.

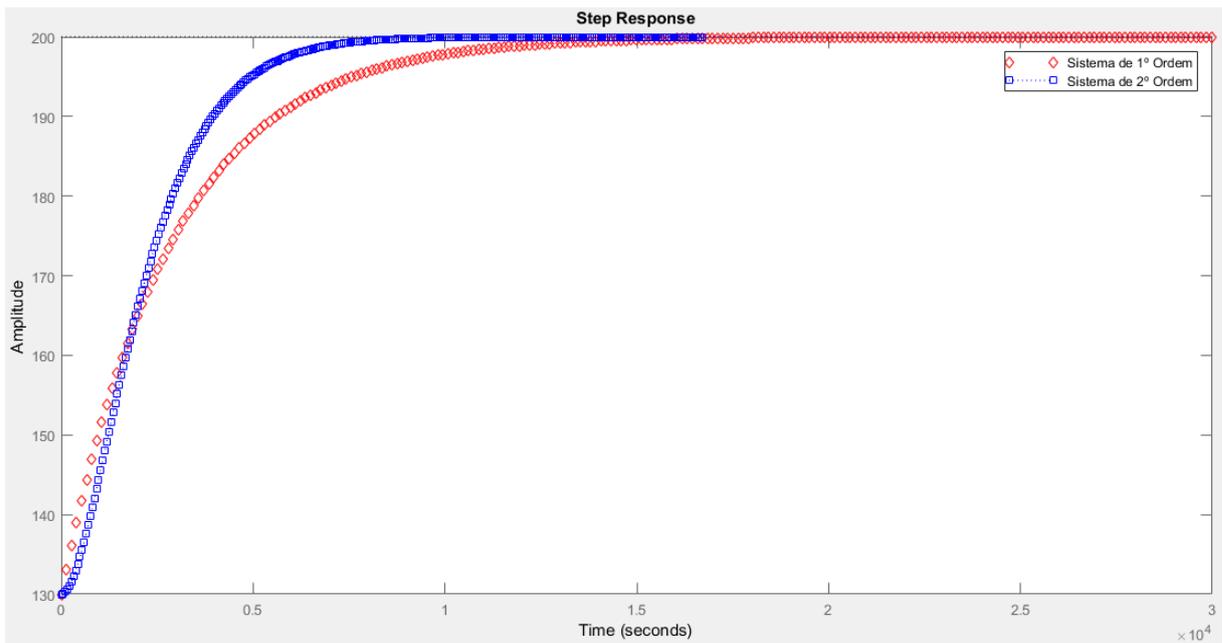


Figura 52- Comparação do sistema dos sistemas 1º ordem x 2º ordem
Fonte: Autor (2018)

3.4.3.2 Diagrama de Blocos no Simulink

Após aquisição da função de transferência foi realizada a montagem do diagrama de blocos no Simulink evidenciando como cada variável interage no sistema de controle proposto (*feedback*). Sabendo que um controle desse tipo atua conforme a figura 44, o diagrama de blocos principal do sistema pode ser visto na figura 53.

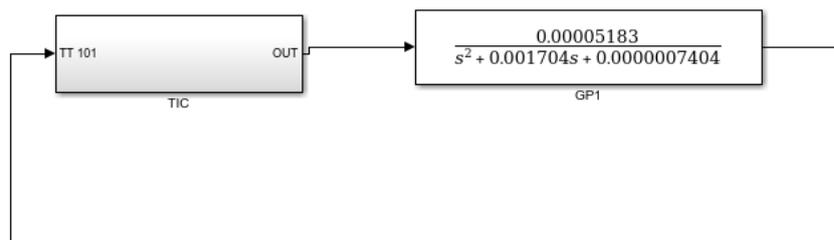


Figura 53- Diagrama de blocos principal
Fonte: Autor (2018)

Ao se clicar no subsistema do controlador pode-se verificar como o mesmo interage com o sistema. A figura 54 mostra o esquema do controlador.

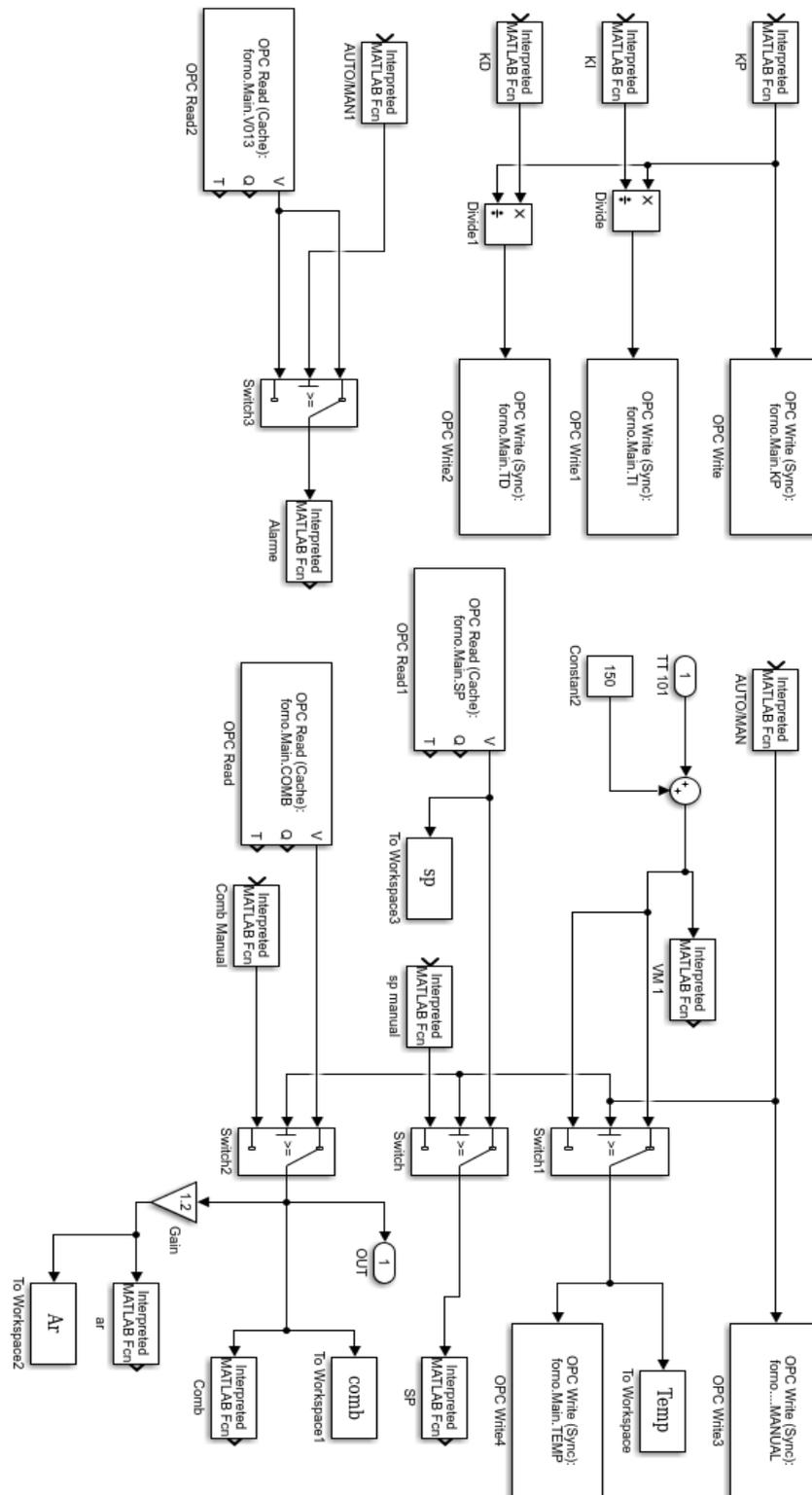


Figura 54- Diagrama de Blocos do Controlador

Fonte: Autor (2018)

Vale ressaltar que, como dito anteriormente, os blocos “*Matlab Function*” representam os valores de leitura ou escrita do InTouch com o Simulink já os Blocos OPC’s consistem nas variáveis de leitura ou escrita do C.L.P. com o simulink.

Neste bloco é possível verificar que os parâmetros do controlador chegam no simulink provenientes do InTouch e logo após são escritos nos respectivos locais de memória do C.L.P. Nota-se que existe um bloco de divisão dos valores de Ki e Kd que vem do InTouch, isso ocorre pelo fato de que no InTouch o operador entra com valores de Kp, Ki e Kd mas no C.L.P. Phoenix ILC 150 ITH o bloco P.I.D. utiliza-se dos valores do tempo integral e tempo derivativo, sendo assim com essa divisão são obtidos esses valores. Essa manipulação pode ser vista na Figura 55.

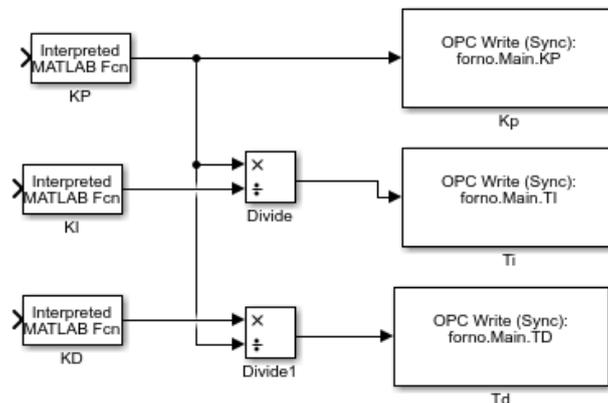


Figura 55- Obtenção de Valores de Ti e Td a partir do Kp, Ki e Kd
Fonte: Autor (2018)

O *setpoint* é obtido em modo automático através da lógica implementada no C.L.P e já descrita no presente trabalho, desta forma o valor que é modificado no C.L.P é lido por um bloco ‘*OPC read*’ e enviado para o InTouch para visualização do operado através de uma *Matlab Function* de escrita. A lógica com a mudança do valor de referência de tempos em tempos pode ser vista na figura 43, já descrita anteriormente. Já em modo Manual o operador insere um valor de referência através da tela de supervisão que é “lida” através de uma *Matlab function*. A parte do diagrama de blocos responsável por essa interação é visualizada na figura 56.

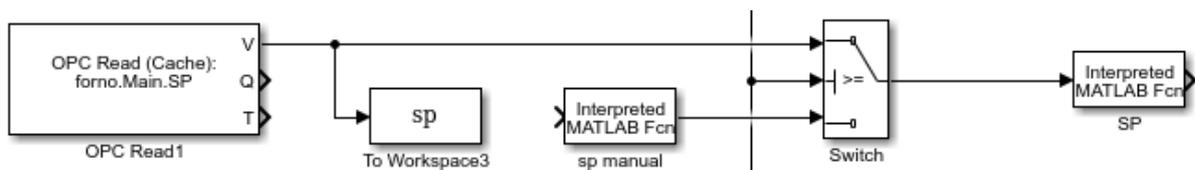


Figura 56- Obtenção do *Setpoint* proveniente do C.L.P para o InTouch
Fonte: Autor (2018)

O valor de temperatura que “sai” da planta do sistema é lido pelo sensor e entra no controlador deve ser escrito na memória do C.L.P. para que o bloco P.I.D., responsável pelo controle, compare o seu atual valor com o valor de referência (*setpoint*) e assim exerça uma ação de controle para correção do erro gerado. Esse valor é escrito no C.L.P através do bloco “*OPC Write*”. Para que o operador tenha conhecimento da temperatura em que o forno está é utilizado uma *Matlab Function* de escrita para que tal valor seja “levado” para o InTouch e possa ser visto pelo operador. O valor de temperatura é o mesmo tanto no controle manual, quanto para o controle automático. Para que a temperatura inicial seja de 150°C foi colocada uma constante com esse valor somando ao valor que sai da planta. Essa etapa do diagrama de bloco está destacada na figura 57.

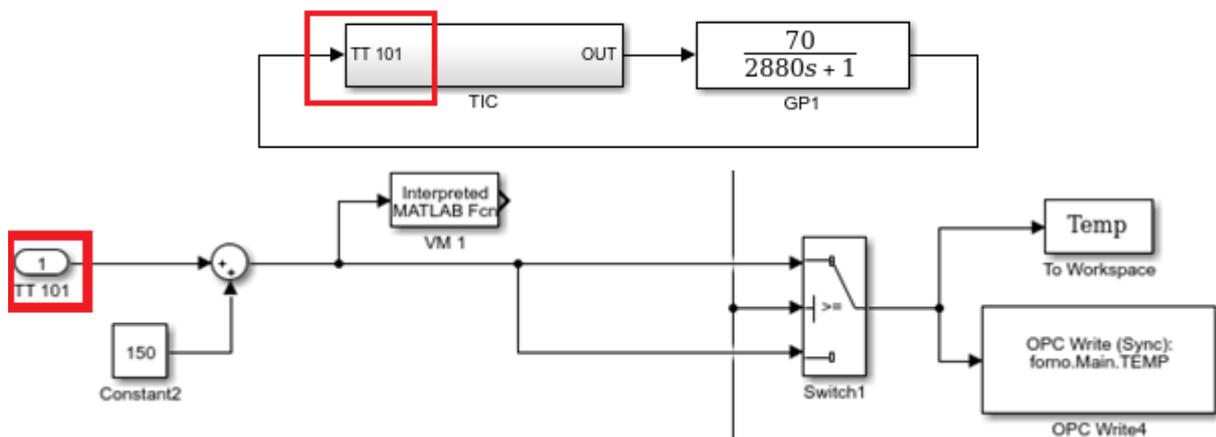


Figura 57- Leitura do Valor de Temperatura que sai da Planta e é levado para o C.L.P

Fonte: Autor (2018)

A ação de controle, quando em modo automático, é gerada pelo bloco P.I.D. e deve ser “levada” do C.L.P para o Simulink, para que a mesma interaja com a planta do sistema e retorne um novo valor de temperatura a ser comparado novamente.

Para que isso ocorra é utilizado um bloco “*OPC read*” que “lê” o valor gerado pelo bloco P.I.D. e escreve tal valor no simulink para que o mesmo entre em contato com a planta. Para que o operador saiba qual o valor do inversor de frequência que deve ir para cada soprador é colocada duas *Matlab Functions* de escrita para que os valores sejam “levados” para o InTouch.

Em modo Manual o operador escolhe o valor em que o inversor de frequência deve estar para se chegar a temperatura previamente escolhida. Para que possa ser feita essa leitura do valor inserido na IHM é utilizado um *Matlab Function* de leitura. Esta etapa do diagrama de blocos está realçada na figura 58.

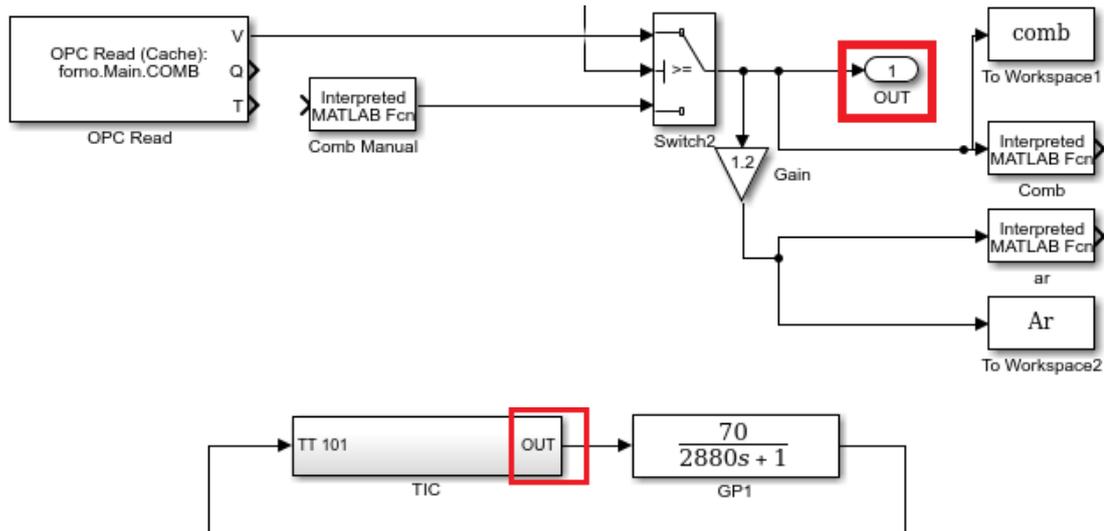


Figura 58- Ação de controle lida do C.L.P e enviado ao Simulink para intereção com a Planta
 Fonte: Autor (2018)

Existe uma botoeira virtual que seleciona o modo de atuação do sistema, que pode ser manual ou automático. Esta botoeira implementada no InTouch quando selecionada em modo automático deve enviar um sinal lógico alto (1) para o Simulink e o mesmo recebe essa informação através de uma *Matlab function* de leitura e chaveia todos os *switchs* do diagrama para o modo automático.

A mesma informação deve ser levada para o bloco P.I.D. do C.L.P. para isso é utilizada um bloco “*OPC write*” que escreve tal valor na memória e indica o controle automático para o P.I.D. Caso o botão no InTouch esteja em Manual é gerado um nível lógico baixo (0). A parte do diagrama de bloco que realiza esta seleção está destacada na figura 59.

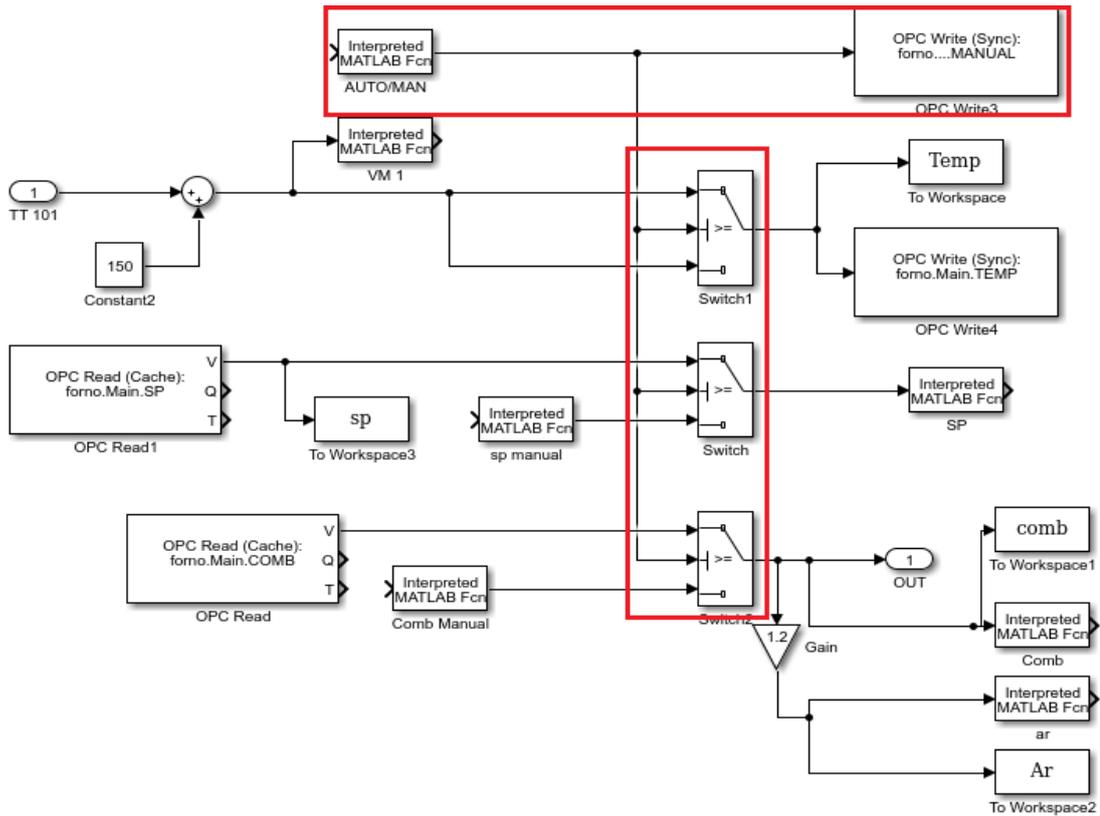


Figura 59- Seleção Manual/Automático através de botoeira Virtual
 Fonte: Autor (2018)

Para que o alarme acione no InTouch é necessário que o valor armazenado na variável referente ao mesmo seja enviado da lógica do C.L.P para o Simulink e sucessivamente para o InTouch, desta forma é necessário um bloco *OPC Read* no Simulink que lê o valor (0 ou 1) e o envia para o InTouch através de uma *Matlab Function* chamada alarme, caso o valor lido seja 0 o alarme não é acionado caso seja 1 o alarme é acionado. O valor é 1 quando a temperatura está acima de 950°C. Esta interação pode ser vista na figura 60.

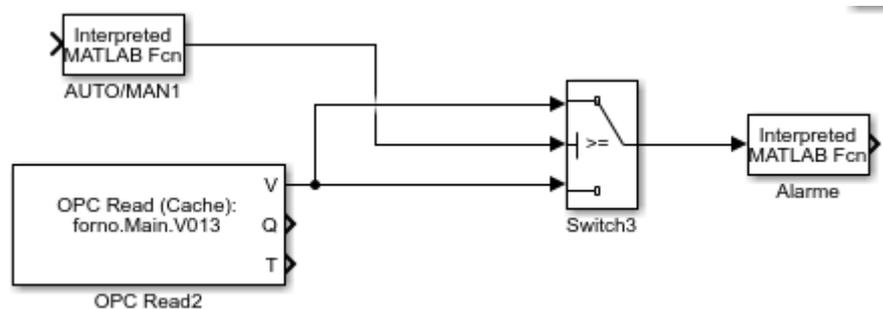


Figura 60- Alarme de temperatura acima de 950°C
 Fonte: Autor (2018)

3.4.4 Interface Homem-Máquina

Com a finalidade de permitir uma interação entre o operador e o sistema de controle foi desenvolvido uma Interface Homem-Máquina (IHM). A IHM implementada ilustra de uma forma simples o sistema de controle implementado e permite ao operador modificar determinados valores para ajustes necessários no processo. A figura 61 representa a IHM do sistema de controle.

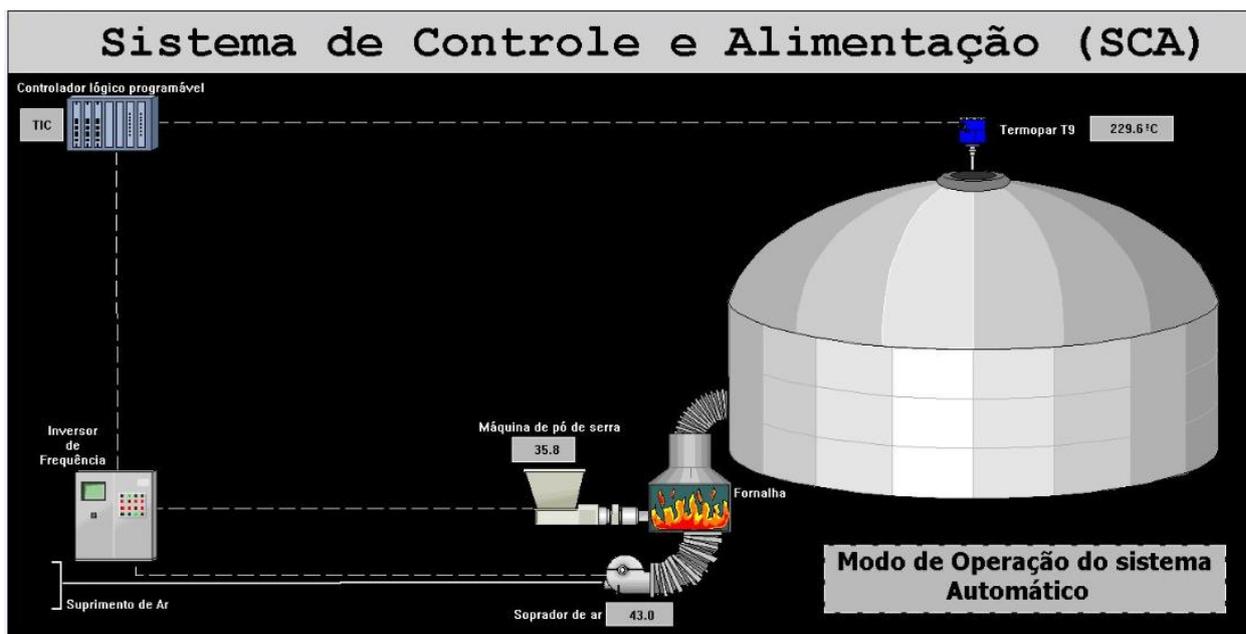


Figura 61- Tela principal da IHM

Fonte: Autor (2018)

A tela principal que pode ser vista na figura 61, apresenta uma representação do sistema, indicando o forno, o termopar por onde é feita a aferição da temperatura e o valor da temperatura atual, o inversor de frequência e sua conexão com cada um dos sopradores (ar e combustível) com a demonstração dos valores e o controlador. O Controlador pode ser visualizado de duas formas, uma mais simples (clicando em TIC). Como pode ser visto na figura 62, e outra com mais informações (clicando na imagem do C.L.P.) conforme a figura 63.

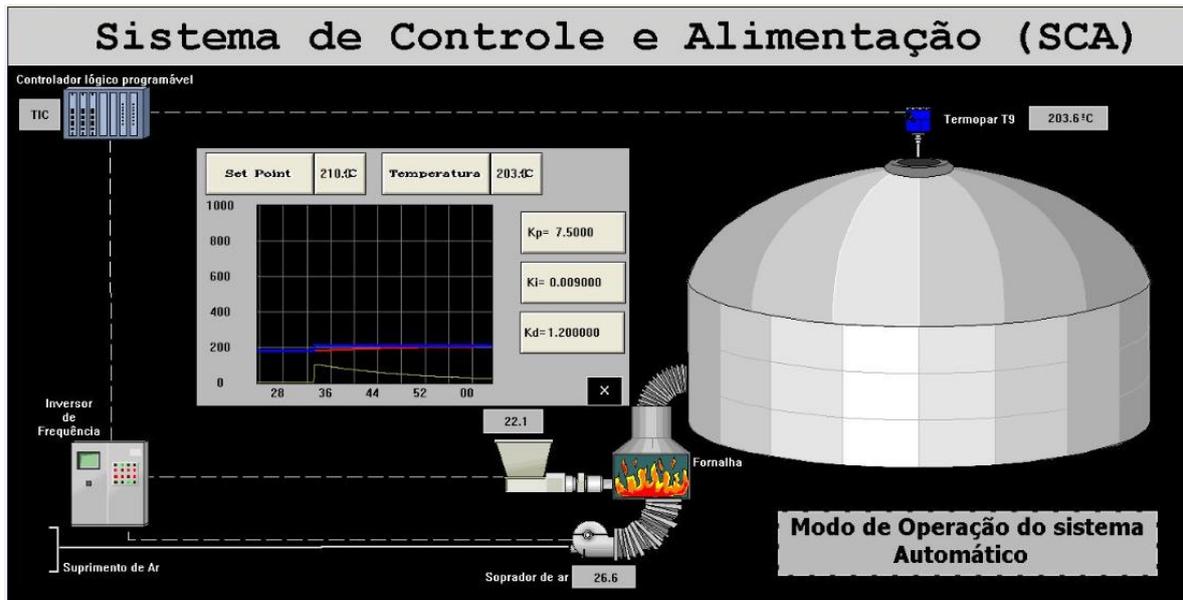


Figura 62- Tela principal com visualização dos parâmetros do TIC
 Fonte: Autor (2018)

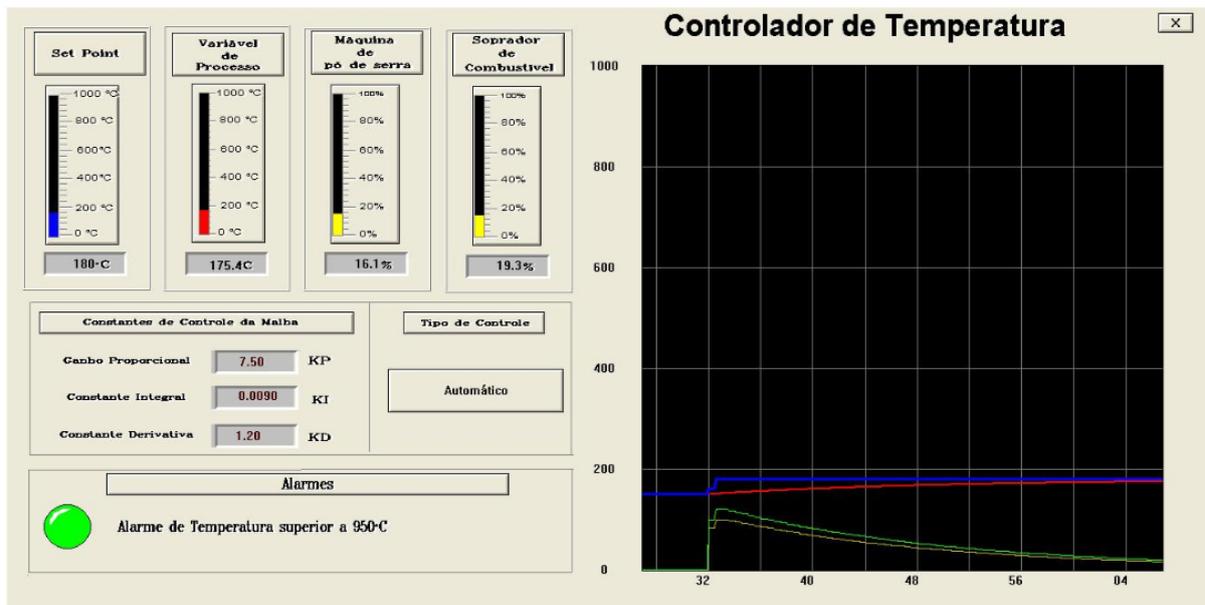


Figura 63- Parâmetros do Controlador de temperatura
 Fonte: Autor (2018)

Seja na imagem da figura 62 ou da figura 63 é possível modificar os parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador bem como visualizar o aumento do *setpoint* de tempos em tempos definidos em modo automático ou alterar o valor do *setpoint* e o valor do inversor de frequência em modo manual. Outro fator em comum é a visualização dos valores de *setpoint*, temperatura e sopradores de ar e combustível através de um gráfico de tendências real, onde é

possível acompanhar o aumento da temperatura de acordo com a variação do *setpoint* bem como a variação dos sopradores. A diferença entre eles é que na tela da IHM só com o controlador de temperatura é possível ver o aumento do *setpoint*, temperatura e inversor de frequência por meio de um gráfico de barras, que aumenta e diminui em tempo real.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos foram divididos em duas partes, uma com a modelagem matemática desenvolvida que relaciona a temperatura do forno com a umidade dos blocos cerâmicos e outra seção com o comportamento do Sistema de Controle de Alimentação (SCA) após uma queima completa.

4.1 O modelo do forno para a temperatura e umidade

No modelo do forno do estudo em questão essas duas equações, 10 e 12, estão acopladas, pois a variação da temperatura está intimamente ligada a variação da umidade. Utilizando um *software* de modelagem matemática e os conhecimentos descritos nas seções 3.2.1.1 e 3.2.1.2 foi verificado que o melhor sistema de equações diferenciais que descreve o forno é dado por:

$$\frac{dT}{dt} = \beta (T_s - T) - \gamma \cdot U, \quad (15)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\gamma \cdot U, \quad (16)$$

para a equação da Temperatura, T_s é a temperatura final do forno, T a temperatura inicial, U a umidade, β é a constante de condução térmica. Para a equação da Umidade, γ é a taxa de decréscimo da Umidade.

A verificação que tais equações diferenciais descrevem o forno de uma forma fidedigna pode ser vista através da figura 64, onde pode ser visualizado o comportamento de ambos modelos com o aumento da temperatura em determinado período de tempo e também será confirmado através de cálculos posteriormente no capítulo 4.1.1 e 4.1.2.

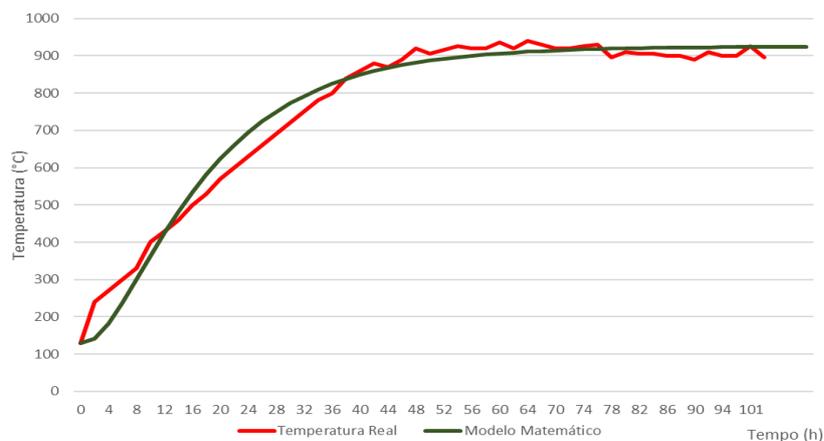


Figura 64- Comparação Temperatura real x modelo matemático
Fonte: Autor (2018)

Neste caso as condições iniciais foram, temperatura inicial de 130°C e a variação de umidade de 300kg/m³. Os valores dos parâmetros de cada equação são descritos no quadro 8.

Quadro 8 - Parâmetros Modelo Matemático

Parâmetros	Valor
β	0,07 Hz
T_s	925°C
γ	0,2 Hz

Fonte: Autor (2018)

4.1.1 Confirmação do modelo matemático através de cálculos

Uma das aplicações das equações diferenciais de primeira ordem são os problemas de aquecimento e arrefecimento. Entre dois corpos em contato existe transferência de calor por condução do corpo mais quente para o mais frio. Se a temperatura do objeto em qualquer instante é $T(t)$ e a temperatura do meio que se objetiva alcançar é T_s , ou seja, a curva vai estabilizar em T_s a equação passa a ser:

$$\frac{dT}{dt} = \beta (T_s - T), \quad (17)$$

onde β é a constante de condução térmica, que depende do material utilizado. Sabendo que a temperatura é uma função da posição e do Tempo, $T(t,x)$, para entendermos a constante de condutividade térmica (β), vamos considerar a condução de calor em uma haste (termopar).

Considerando a técnica de separação de variáveis $T(t,x) = X(x)T(t)$, como só existe propagação de calor pela distância x :

$$\frac{\partial T(t,x)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(t,x)}{\partial x^2}. \quad (17)$$

Prosseguindo com o desenvolvimento matemático a partir de 17 obtém-se:

$$X(x) \frac{\partial T(t)}{\partial t} = \alpha T(t) \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2}, \quad (18)$$

desta forma, pode-se separar as variáveis da seguinte forma:

$$\frac{dT(t)}{\alpha T d(t)} = \frac{d^2 X(x)}{X dx^2} = -\lambda, \quad (19)$$

o que se remete a:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\alpha \cdot \lambda \cdot T(t), \quad (20)$$

para se estabilizar a equação diferencial 19 considera-se o seguinte:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\alpha \cdot \lambda \cdot (T - T_s), \quad (21)$$

considerando $-\alpha \cdot \lambda = \beta$, chega-se ao resultado:

$$\frac{dT}{dt} = \beta (T_s - T), \quad (22)$$

semelhante a equação 17 descrita na comparação com o modelo real anteriormente. Vale ressaltar que a unidade de β é Hz já que $\alpha = \frac{m^2}{s} \cdot \lambda = \frac{1}{m^2}$

De modo análogo a temperatura temos a Umidade que pode ser representada pela equação:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}, \quad (23)$$

onde $M=U(t)P(x)$ e assim desta forma considera-se igual foi feito na temperatura:

$$\frac{1}{DU} \frac{dU}{dt} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = -\eta, \quad (24)$$

a partir da equação 22 obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{dU}{dt} = -\eta \cdot D \cdot U, \quad (25)$$

considerando $-\eta \cdot D = \gamma$, é obtido a equação:

$$\frac{dU}{dt} = -\gamma \cdot U, \quad (26)$$

igual a equação 16 descrita na comparação com o modelo real previamente

Com o forno pré-aquecido a umidade tem relação com a massa molhada colocada no interior do forno que pode nos dar uma medida da estrutura fina devido a variação da massa do tijolo, mas que interfere na temperatura do sistema principalmente a temperaturas baixas. Essa relação da massa molhada (M_a) com a massa após a queima (M_s) é dada por:

$$M = \frac{M_a}{M_s}. \quad (27)$$

Outro parâmetro que aparece quando consideramos a Umidade é o coeficiente de

difusão da massa, indicado pela letra D. Seu valor em função da temperatura é dado por:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}, \quad (28)$$

onde, D_0 é o coeficiente de difusão máximo, E_a é a Energia de ativação em dimensões, R a constante de gases perfeito e T a temperatura. Para o ar que é o meio que se leva em consideração no projeto $D = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Considerando a dinâmica do processo que indica que quanto maior a temperatura menor a Umidade, utiliza-se um *ansatz* que resulta em uma constante de acoplamento onde ocorre uma ligação entre Temperatura e Umidade, e pode ser vista nas equações 29 e 30, que são as mesmas equações propostas previamente e analisadas na modelagem feita em *software* de modelagem.

$$\frac{dT}{dt} = -\beta(T - T_s) - \gamma \cdot U, \quad (29)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\gamma \cdot U. \quad (30)$$

Paras essas equações diferenciais do modelo matemático existem resoluções matemáticas que podem ser utilizadas e mostram o comportamento das variáveis umidade e temperatura em função do tempo. O desenvolvimento da resolução da equação da umidade e da temperatura podem ser vistos no apêndice B e C respectivamente e a resposta final pode ser vista abaixo:

$$U = U_0 e^{-\gamma \cdot t}, \quad (31)$$

$$T = T_s - \left\{ \left(\frac{\gamma \cdot U_0}{\beta - \gamma} \right) (e^{-\gamma \cdot t} - e^{-\beta \cdot t}) + (T_s - T_0) e^{-\beta \cdot t} \right\}, \quad (32)$$

onde U_0 é a Umidade inicial do sistema, γ taxa de decréscimo da umidade, previamente citada, T_s a temperatura final, β é a constante de condução térmica, T_0 a temperatura inicial e t o tempo.

4.2 Comparação Modelo Matemático x Curva de queima real

Como demonstrado na seção anterior, foram desenvolvidas duas equações diferenciais (Equações 15 e 16) que estabelecem o comportamento da Temperatura do forno com relação com a Umidade presente nos produtos cerâmicos.

Com a modelagem obtida e confirmada através do *software* de modelagem demonstrada por meio da figura 64, foram desenvolvidas comparações com o sistema real.

Para isso foram realizadas 3 medições durante a queima do forno com carga em seu interior e registradas as temperaturas do termopar T9, cada medição em uma tabela separada. Para cada queima foram geradas curvas de queima que podem ser vistas nas figuras 65, 66 e 67.

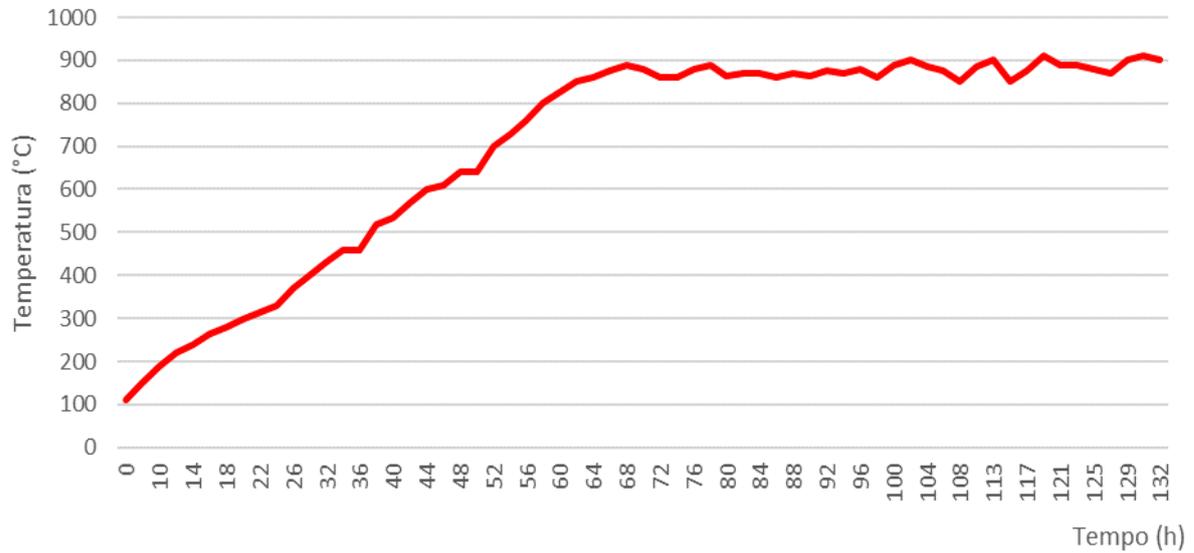


Figura 65- Queima 1

Fonte: Autor (2018)

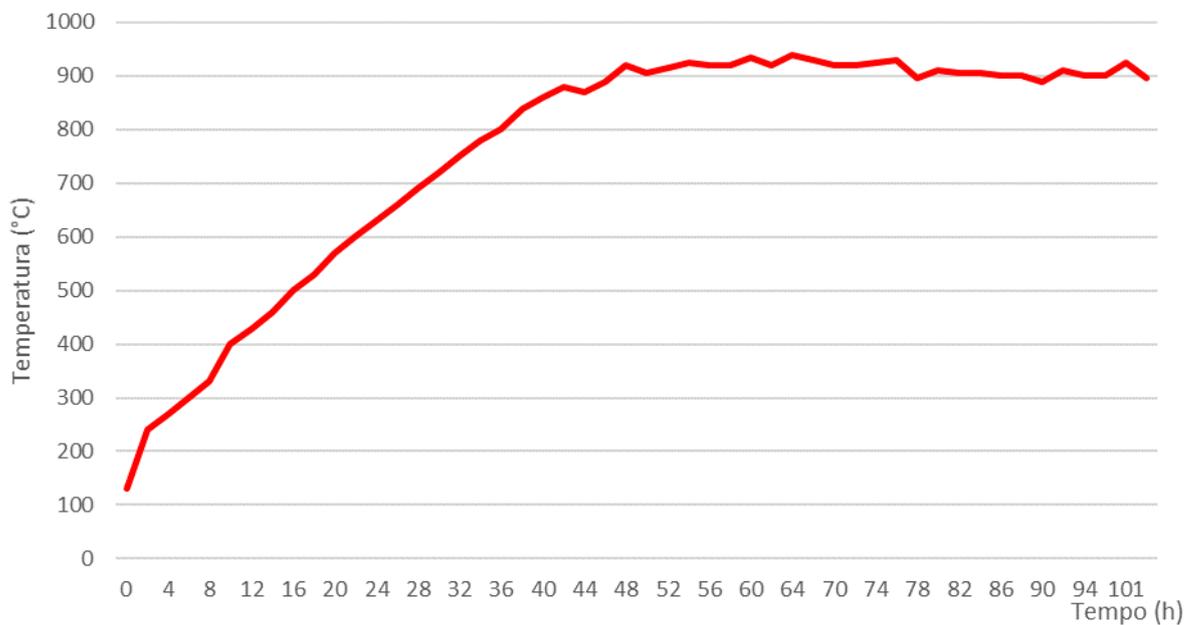


Figura 66- Queima 2

Fonte: Autor (2018)

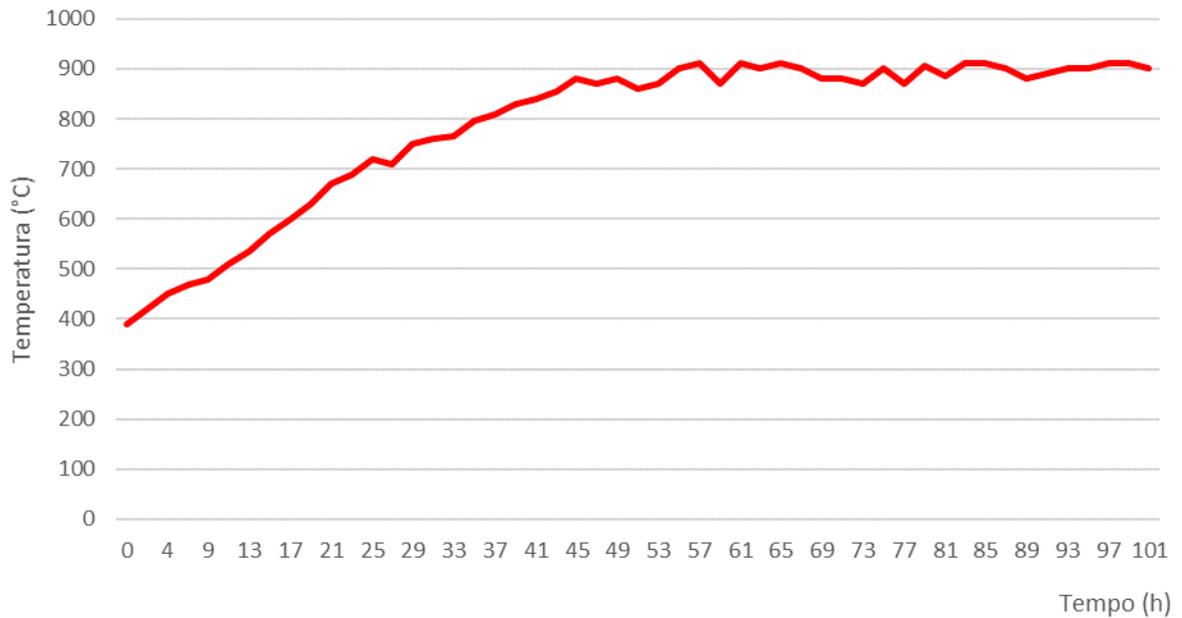


Figura 67-Queima 3
Fonte: Autor (2018)

A figura 67 apresenta uma temperatura inicial mais elevada devido a um maior reaproveitamento de calor e assim a queima se iniciou com tal temperatura.

Como pode ser visto nas figuras 65, 66 e 67 o comportamento da queima se dá inicialmente com um aquecimento de forma lenta até a temperatura de 900°C e assim se mantém durante um período até completar o tempo de queima. Cada queima possui sua particularidade e especificidade, mas no geral se comportam de maneira semelhante.

Com posse da modelagem e das curvas de queima foram feitas comparações entre as curvas de queima reais, ou seja, aquelas obtidas através do termopar T9, com as curvas obtidas através das equações diferenciais. Para cada queima foram realizados três casos com mudanças de parâmetros para saber o comportamento da equação diferencial.

4.2.1 Queima 1 x Modelo Matemático

Para a comparação da primeira queima com os modelos matemáticos foram realizados 3 mudanças de parâmetros. Desta forma foram concebidos 3 casos (Caso 1, Caso 2 e Caso 3). As condições iniciais estabelecidas para essa comparação foram, $T_0 = 110\text{ °C}$ e variação da umidade de 300 kg/m^3 . Para cada caso os parâmetros escolhidos podem ser vistos nos quadros 9, 10 e 11.

Quadro 9- Parâmetros Caso 1

Parâmetros	Valor
β	0,04 Hz
T_s	900°C
γ	0,11 Hz

Fonte: Autor (2018)

Quadro 10- Parâmetros Caso 2

Parâmetros	Valor
β	0,06 Hz
T_s	900°C
γ	0,2 Hz

Fonte: Autor (2018)

Quadro 11- Parâmetros Caso 3

Parâmetros	Valor
β	0,05 Hz
T_s	900°C
γ	0,11 Hz

Fonte: Autor (2018)

Com a escolha das condições iniciais e dos parâmetros para configuração das equações diferenciais que definem o modelo matemático foram obtidas 3 curvas e as mesmas comparadas através de um gráfico com o comportamento real do sistema, que pode ser vista na figura 68.

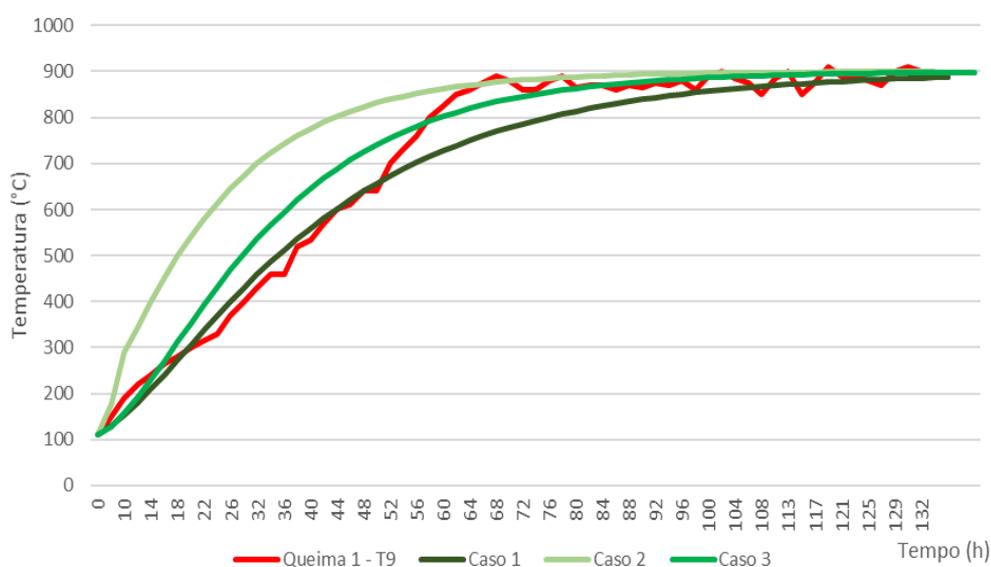


Figura 68- Comparação Queima 1x Modelo Matemático
Fonte: Autor (2018)

Como pode ser visto na figura 68 em todos os casos o modelo matemático responde tanto para o limite superior e inferior da curva de queima, ou seja, há um range em que o modelo pode variar de acordo com os parâmetros escolhidos. Desta forma o modelo matemático que relaciona Temperatura e Umidade corresponde de forma fidedigna ao Modelo Real para a primeira queima.

A resposta do modelo para a Umidade pode ser vista na figura 69, no entanto, a comparação com o modelo real não é possível devido a impossibilidade da obtenção de equipamentos para aferição da umidade nos tijolos durante a queima.

Analisando a figura 69 é possível observar que o comportamento da umidade é contrário ao da temperatura, ou seja, com o passar do tempo a umidade vai diminuindo. Isso se dá pelo fato de que com o aquecimento da atmosfera interna, isto é, com o aumento da temperatura do forno, a umidade irá diminuir devido ao processo de evaporação que a elevação da temperatura traz as moléculas de H₂O.

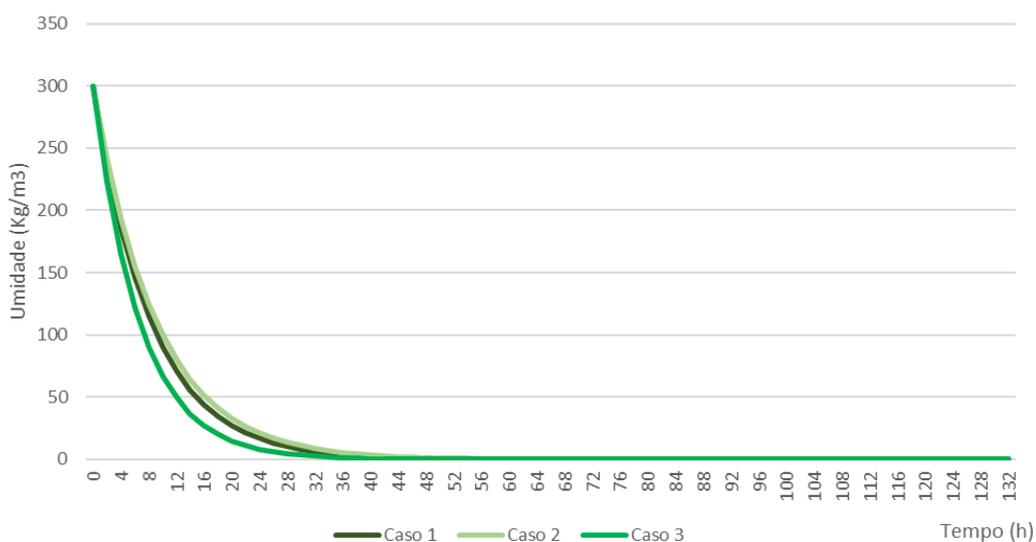


Figura 69- Comportamento da Umidade no Modelo Matemático
Fonte: Autor (2018)

4.2.2 Queima 2 x Modelo Matemático

Da mesma forma que foi executada no capítulo 4.2.1, se faz para a Segunda queima analisada. Foram definidos os parâmetros para 3 casos e as condições iniciais para todos os casos são $T_0 = 130^\circ\text{C}$ e $U_{mi} = 300 \text{ kg/m}^3$. Desta forma os parâmetros escolhidos para cada caso podem ser visualizados nos quadros 12, 13 e 14.

Quadro 12- Parâmetros Caso 1

Parâmetros	Valor
β	0,01 Hz
T_s	925°C
γ	0,3 Hz

Fonte: Autor (2018)

Quadro 13- Parâmetros Caso 2

Parâmetros	Valor
β	0,05 Hz
T_s	925°C
γ	0,1 Hz

Fonte: Autor (2018)

Quadro 14- Parâmetros Caso 3

Parâmetros	Valor
β	0,07 Hz
T_s	925°C
γ	0,2 Hz

Fonte: Autor (2018)

Com a escolha das condições iniciais e dos parâmetros para configuração das equações diferenciais que definem o modelo matemático foram obtidas 3 curvas e as mesmas comparadas através de um gráfico com o comportamento real do sistema, que pode ser vista na figura 70.

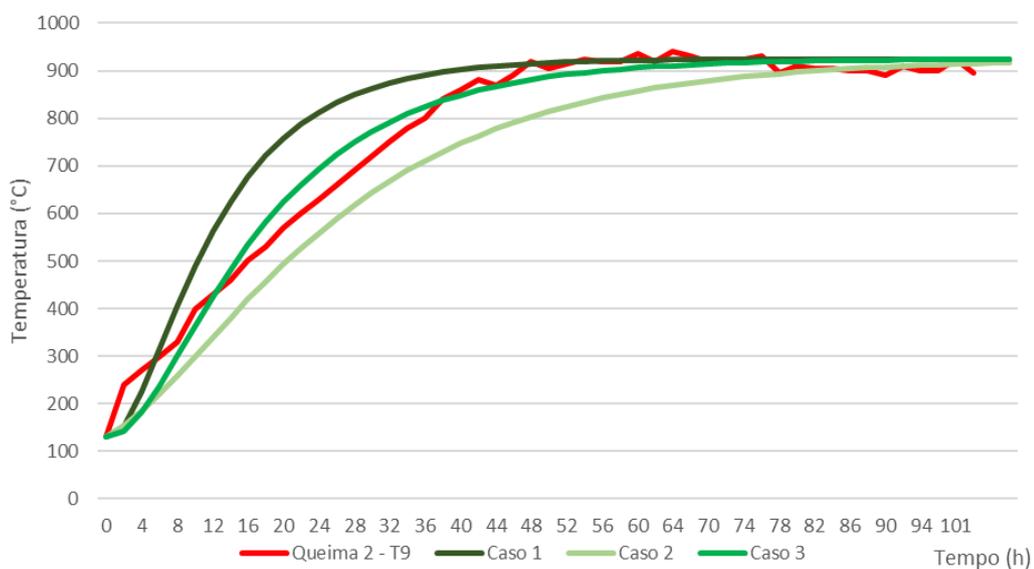


Figura 70- Comparação Queima 2 x Modelo Matemático
 Fonte: Autor (2018)

Examinando a figura 70 é possível observar que o terceiro caso é o que mais se assemelha com o comportamento da curva de queima real, sendo esses os parâmetros que devem ser utilizados para um melhor desempenho do modelo.

Para a umidade na Queima 2 foram feitos os mesmos procedimentos que para a Queima 1 e foram obtidas respostas de umidade semelhantes, ou seja, com o passar do tempo ocorreu um decréscimo da umidade. Este comportamento pode ser visto na Figura 71.

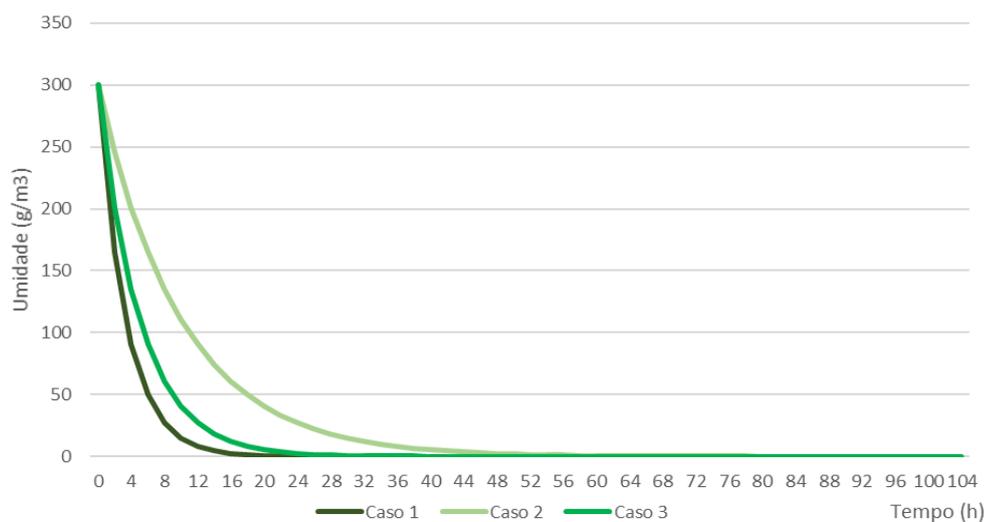


Figura 71- Comportamento da Umidade no Modelo Matemático
Fonte: Autor (2018)

4.2.3 Queima 3 x Modelo Matemático

Para a terceira queima foi realizado o mesmo procedimento feito anteriormente, desta forma as condições iniciais são, $T = 390^{\circ}\text{C}$ e $U_{mi} = 300 \text{ g/m}^3$ e os parâmetros escolhidos para os 3 casos podem ser vistos nos quadros 15, 16 e 17

Quadro 15- Parâmetros Caso 1

Parâmetros	Valor
β	0,03 Hz
T_s	910°C
γ	0,02 Hz

Fonte: Autor (2018)

Quadro 16 - Parâmetros Caso 2

Parâmetros	Valor
β	0,04 Hz
T_s	910°C
γ	0,02 Hz

Fonte: Autor (2018)

Quadro 17- Parâmetros Caso 3

Parâmetros	Valor
β	0,05 Hz
T_s	910°C
γ	0,03 Hz

Fonte: Autor (2018)

Com a escolha das condições iniciais e dos parâmetros para configuração das equações diferenciais que definem o modelo matemático foram obtidas 3 curvas e as mesmas comparadas através de um gráfico com o comportamento real do sistema, que pode ser vista na figura 72.

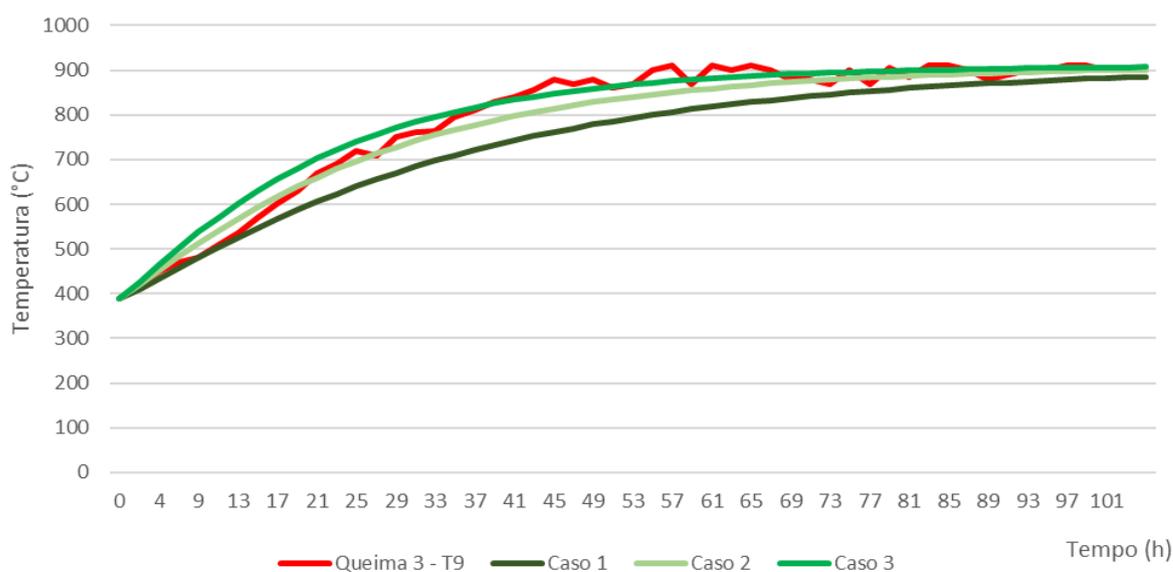


Figura 72- Comparação Queima 3 x Modelo Matemático

Fonte: Autor (2018)

Com relação a queima 3, que possui uma leve diferença se comparado a queima 1 e 2 devido a temperatura inicial ser mais elevada, o modelo matemático se comportou de uma forma bem fiel à curva de queima real, sendo os casos 2 e 3 os que possuem os parâmetros que trazem maior veracidade.

Para a Umidade o modelo se comporta como nas outras duas queimas, sempre diminuindo o seu valor com o passar do tempo. Na figura 73 é possível observar que para os casos 1 e 2 mesmo com a pequena mudança de parâmetros o modelo se comportou da mesma forma, já para o caso 3 o sistema teve uma leve mudança em seu declínio.

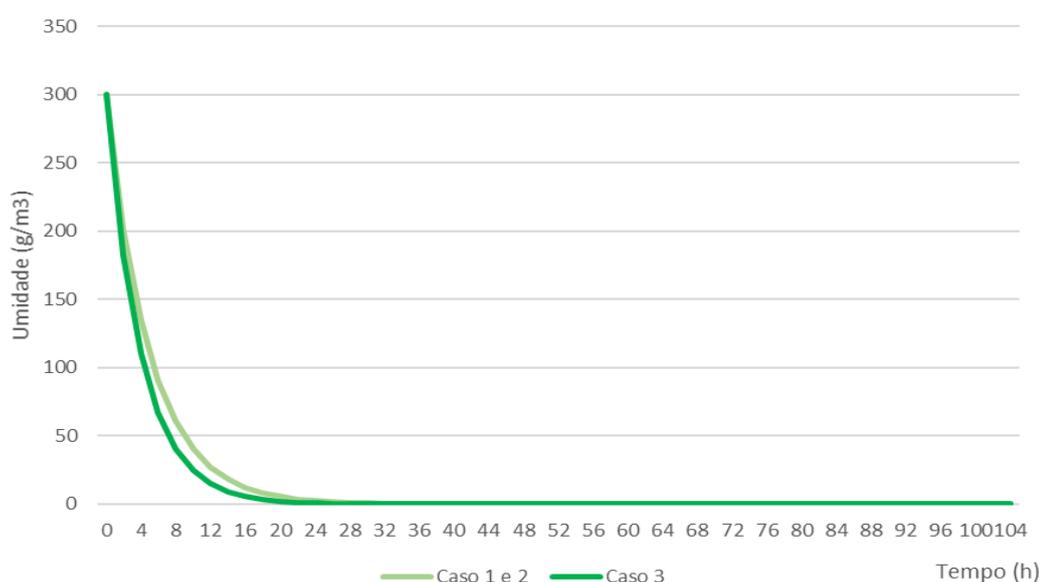


Figura 74- - Comportamento da Umidade no Modelo Matemático
Fonte: Autor (2018)

4.3 Comportamento do sistema de controle de alimentação

Para o sistema de controle de alimentação (SCA) foram executadas 2 simulações e os resultados do comportamento da temperatura (curva de queima) e valores de combustível e comburente comparados com o sistema utilizado atualmente na cerâmica estudada. Em cada simulação foram modificados os parâmetros do controlador para se ver o comportamento do sistema. Vale ressaltar novamente que o tempo de simulação ficou estabelecido em 1 hora, devido a limitações dos *softwares* utilizados, para isso para cada minuto decorrido na simulação equivale a 2 horas no tempo real.

4.3.1 Simulação 1

Na primeira simulação executada os parâmetros do controlador foram definidos através de um aplicativo do Matlab chamado P.I.D. turner, onde mostra possíveis valores de K_p , K_i e K_d que estabilizam a planta utilizada. Partindo desse norte os parâmetros utilizados podem ser vistos no quadro 18.

Quadro 18 - Parâmetros do P.I.D

Parâmetros	Valor
K_p	7,5
K_i	0,006
K_d	1,22

Fonte: Autor (2018)

A partir da escolha dos parâmetros a simulação foi iniciada em modo automático e após 1 hora de simulação a temperatura do forno se comportou conforme a figura 74, no qual os valores da temperatura foram armazenados em uma tabela de 30 em 30 segundos, ou seja, de 1 em 1 hora do tempo real.

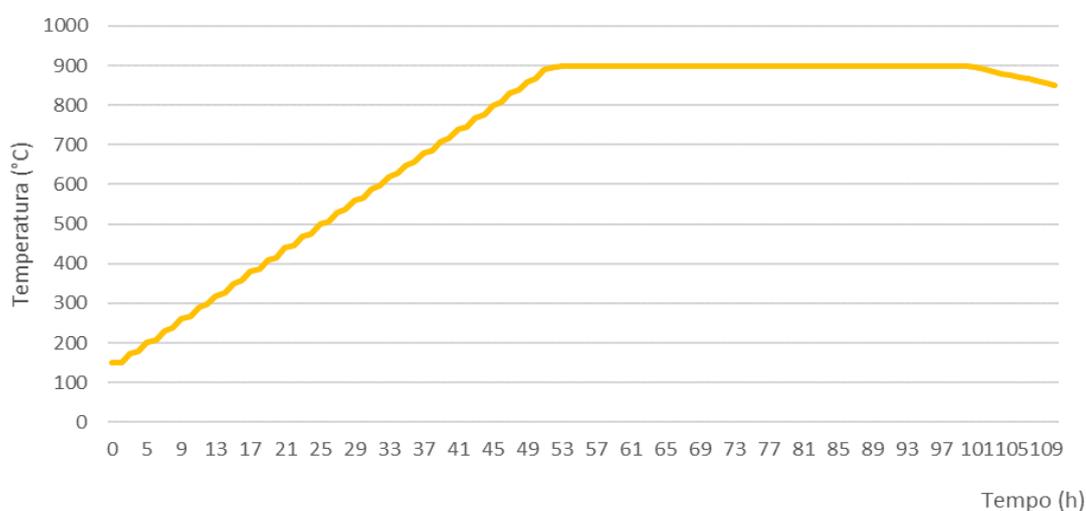


Figura 75- Comportamento da Temperatura na Simulação 1

Fonte: Autor (2018)

Analisando a Figura 74 é possível observar que a queima ocorre predominantemente em duas fases, uma de subida da temperatura, 30°C de 2 em 2 horas e outra de queima constante a 900°C, vale ressaltar que após às 100h se inicia uma queda da temperatura pois se inicia o resfriamento do interior do forno. Uma observação importante é que devido a limitação do tempo de simulação não é possível verificar o comportamento do resfriamento

do sistema, no entanto, o resfriamento ocorre de maneira natural, onde o sistema é colocado em modo manual, a queima é interrompida, as portas do forno são abertas e parte do calor é reaproveitado em outro forno para se iniciar uma nova queima.

Com base no comportamento da temperatura a partir da utilização do SCA foram feitas comparações com as queimas reais, ou seja, sem a utilização do sistema de controle, para se verificar a diferença de desempenho entre eles. Desta forma as figuras 75, 76 e 77 realiza a comparação entre a temperatura com o SCA com as queimas 1, 2 e 3 respectivamente.

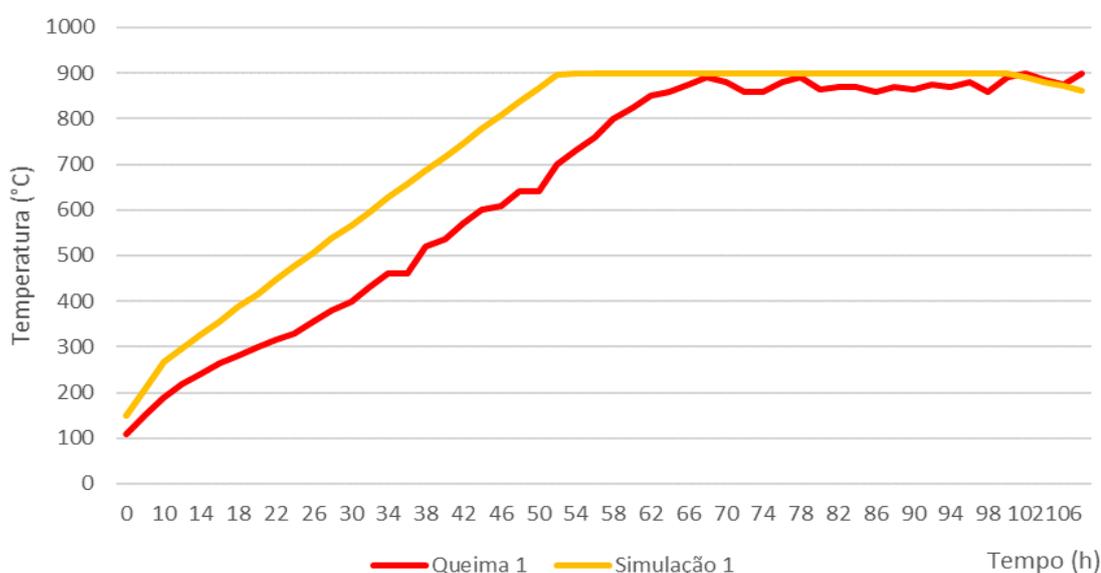


Figura 76- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 1
Fonte: Autor (2018)

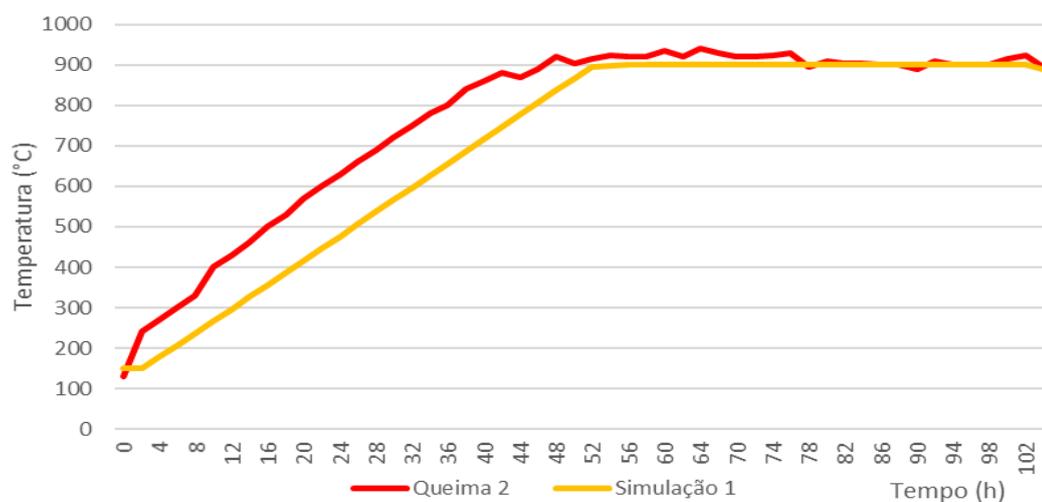


Figura 77- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 2
Fonte: Autor (2018)

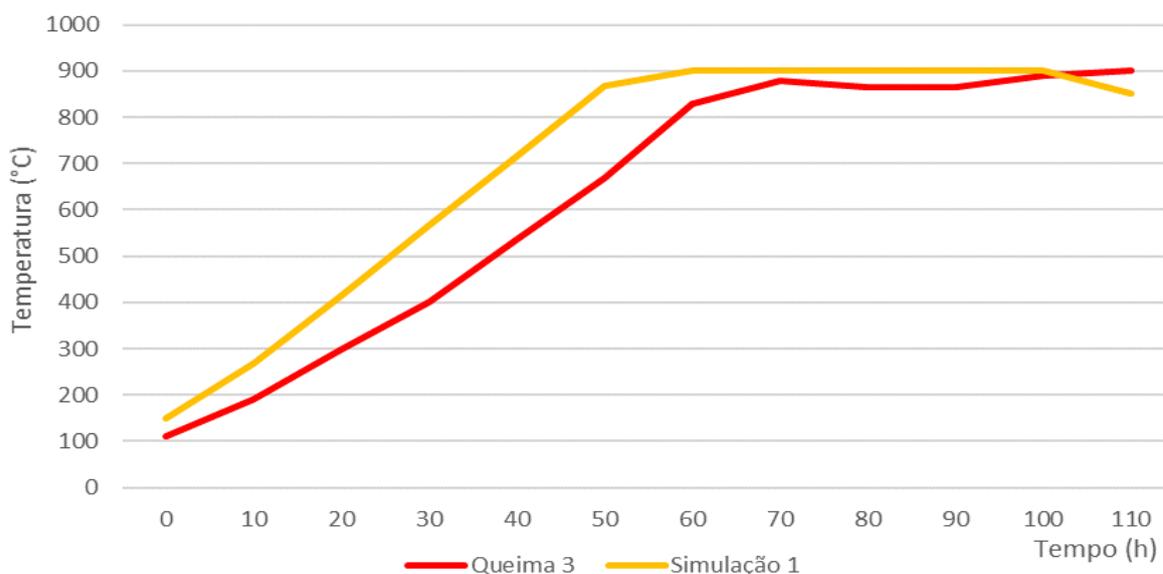


Figura 78- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 3
Fonte: Autor (2018)

Analisando o comportamento do SCA é possível notar que o mesmo controla a temperatura no valor especificado e que a lógica de controle implementada é bastante precisa com os parâmetros escolhidos. Durante a etapa de subida da temperatura a mesma é elevada de uma forma suave e dentro do tempo considerado ideal segundo a literatura e durante o controle na temperatura máxima o sistema não gera nenhum tipo de erro mantendo a temperatura constante.

Assim, quando se compara o comportamento do sistema de controle com as queimas reais 1, 2 e 3 é notório que, no sistema real, em cada queima a temperatura se comporta de um jeito com tempos de subidas diferentes para cada e controle na temperatura final com variações que podem causar problemas na estrutura do material cerâmico, isso acontece pois não há um controle automático da temperatura implementado na cerâmica estudada. Tal fato pode ser notado observando as figuras 75, 76 e 77, onde para cada queima a temperatura se comporta de uma forma e com o sistema de controle o comportamento é linear, suave e sem variações.

Outro fator importante é que o sistema de controle acaba com variações da temperatura mantendo a subida da mesma de forma linear e controle final sem mudanças que podem causar problemas no material.

Para análise do gasto com o combustível foi utilizado o valor médio enviado pelo inversor de frequência para a máquina de pó de serra e para o soprador de ar. Desta forma é possível saber quanto de energia média o sistema irá gastar e o mesmo vale para a quantidade

de pó de serra que será necessária para queima completa com a utilização do sistema de controle de alimentação.

Na simulação foi utilizado uma faixa de valor e 0 a 100% de saída do inversor de frequência que equivale a 3Hz e 60Hz, que são os valores mínimos e máximos de frequência que são enviados para motor e para o soprador para controle da velocidade. Foi utilizado o valor mínimo de 3Hz para que as saídas não parem de girar e soprar respectivamente e quando fossem sair inércia requereriam uma corrente elevada, “gastando” mais energia elétrica para tal.

Desta forma, com a análise dos dados foi visto que a saída média do inversor de frequência durante a etapa de elevação da temperatura permaneceu em média em 45%, ou seja, 28,6 Hz para o motor e 34,38 Hz para o soprador, valores quase que metade do que os 60Hz que é o padrão fornecido pelas concessionárias de energia elétrica e utilizado atualmente pelos equipamentos. Na etapa de fogo forte onde se mantém a temperatura constante em 900°C a saída do inversor permanece constante em 11% gerando uma frequência de saída do inversor de 9,3 Hz para o motor e 11Hz para o soprador de combustível.

Com relação ao combustível, nas queimas sem o sistema de controle é utilizado uma média de 12200 kg de pó de serra por queima, com uma vazão mássica média de 100 kg/h. Dados obtidos através de medições feitas no forno. Com a utilização do SCA a média de pó de serra gasto cai para aproximadamente 10000 kg de pó de serra, considerando a mesma vazão de combustível, no entanto sabe-se que essa vazão ainda é reduzida para aproximadamente 40 kg/h em média, pois o inversor de frequência diminui a velocidade de giro do motor e de sopro do soprador devido a diminuição da frequência de trabalho dos equipamentos para valores que irão controlar o sistema na temperatura requerida. Considerando esse novo valor de vazão o gasto com combustível diminui ainda mais podendo chegar a 4000 Kg de pó de serra

Como cada saco de pó de serra possui 12 kg e o preço médio do saco é de R\$1,80 há uma economia com combustível de aproximadamente R\$ 330,00 por queima, se considerar a mesma vazão de combustível. Tendo em vista que a vazão também é diminuída com a utilização do SCA o gasto com combustível pode reduzir até R\$ 600,00 por queima. Para um produto de baixo valor agregado tais reduções no custo já algo bastante considerável.

Com relação ao gasto energético também há uma diminuição considerável pois no sistema atual o soprador de ar fica ligado quase que o tempo todo da queima a uma frequência de 60Hz, já com o sistema ele manteria uma média de 28,6 Hz para o motor e 34,38 Hz para o

soprador para etapa de elevação da temperatura e 9,3 Hz para o motor e 11Hz para o soprador de ar para a fase da queima na temperatura máxima.

Assim o sistema irá requerer uma corrente elétrica menor e, por conseguinte irá gerar uma potência menor, gastando menos energia elétrica. O mesmo vale para a máquina de pó de serra que também quando acionada não ficará ligada com a frequência de 60Hz, apenas com a necessária para controlar a temperatura no valor requerido. Para verificação da redução do consumo de energia elétrica é necessário implementação do SCA, para comparação, o que não foi realizado no presente trabalho.

4.3.2 Simulação 2

Na segunda simulação os parâmetros Kp, Ki e Kd do controlador foram definidos, utilizando os conhecimentos adquiridos na parametrização anterior. A partir disso os parâmetros utilizados podem ser vistos no quadro 19.

Quadro 19- Parâmetros do P.I.D.

Parâmetros	Valor
Kp	7,1
Ki	0,009
Kd	1,25

Fonte: Autor (2018)

A partir da escolha dos parâmetros a segunda simulação foi iniciada em modo automático e após 1 hora de simulação a temperatura do forno se comportou conforme a figura 78, onde os valores da temperatura foram armazenados em uma tabela de 30 em 30 segundos, ou seja, de 1 em 1 hora do tempo real.

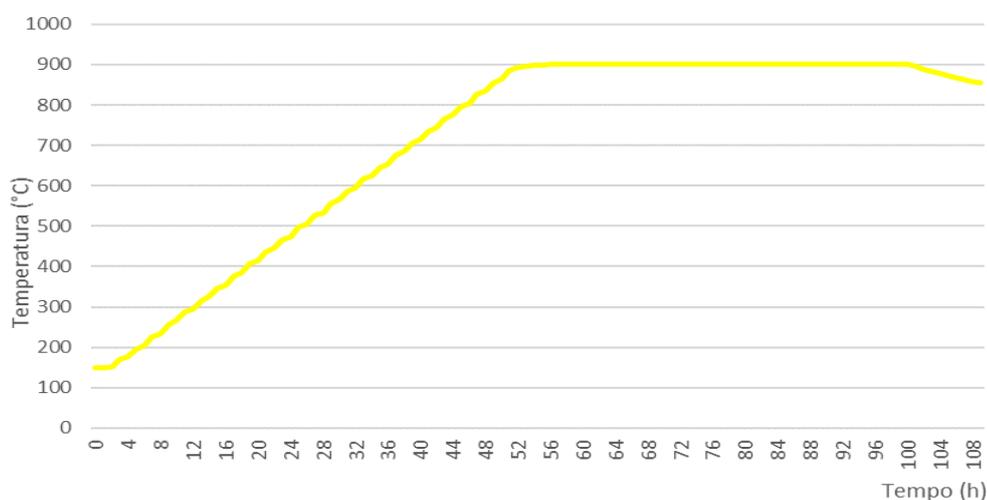


Figura 79- Comportamento da temperatura com o SCA

Fonte: Autor (2018)

Para a segunda simulação o comportamento do sistema se dá da mesma forma alterando-se o valor de referência de temperatura em 30°C de 2 em 2 horas e após chegar a 900°C o processo se mantém constante até se iniciar o resfriamento depois de decorrido o tempo total de queima de 100 horas.

Com base do comportamento da temperatura a partir da segunda simulação do SCA foram feitas comparações com as queimas reais, ou seja, sem a utilização do sistema de controle, para se verificar a diferença de desempenho entre eles. Desta forma as figuras 79, 80 e 81 realiza a comparação entre a temperatura com o SCA com as queimas 1, 2 e 3 respectivamente.

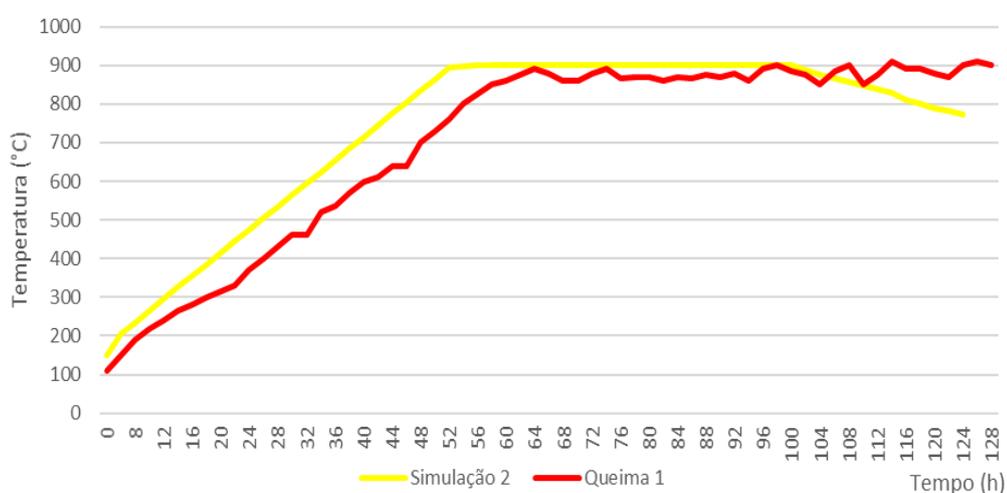


Figura 80- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 1
Fonte: Autor (2018)

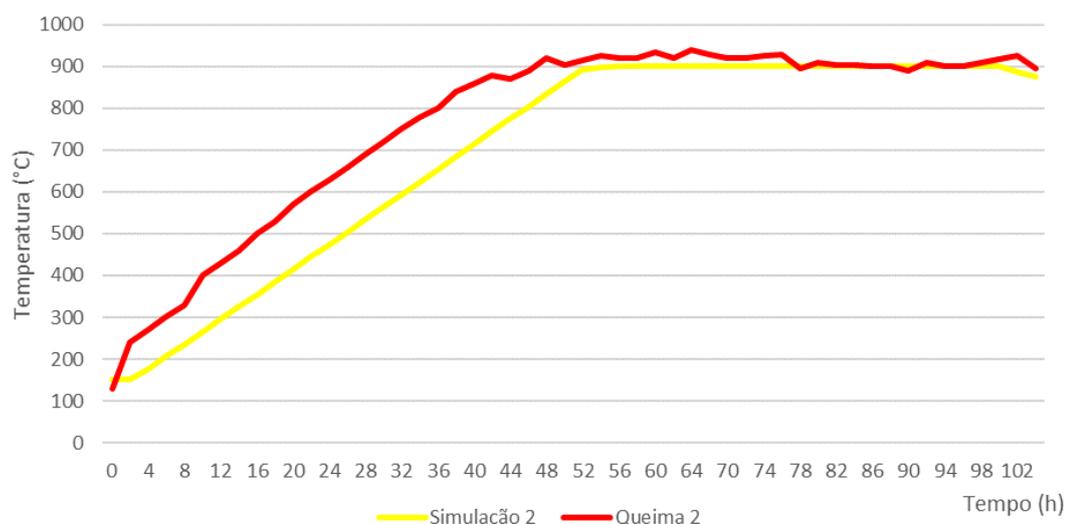


Figura 81- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 2
Fonte: Autor (2018)

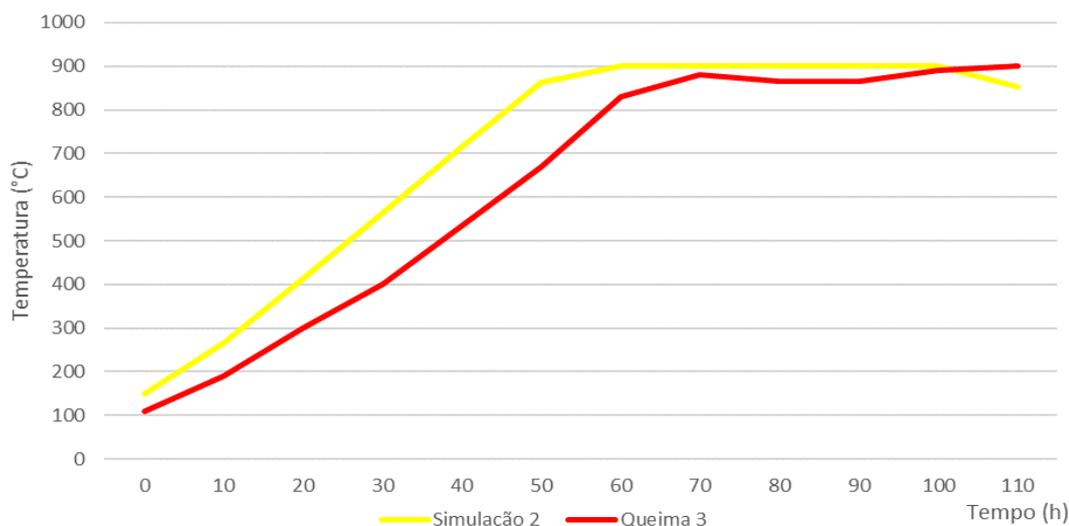


Figura 82- Comparação do comportamento da temperatura SCA x Queima 3
Fonte: Autor (2018)

Como acontece na primeira simulação, o sistema de controle SCA traz a queima uma linearidade na subida da temperatura de uma forma bem suave, dentro do tempo necessário para que não gere problemas ao produto cerâmico e durante o controle da temperatura final o mesmo se mantém sem alterações. Diferentemente do que acontece com o sistema atual onde há variações tanto na subida da temperatura quanto no controle final. Importante notar que na figura 79, enquanto o sistema com SCA já está no momento de resfriamento o sistema real ainda está em processo de queima, gerando um gasto maior com combustível e energia elétrica.

Com relação ao combustível o sistema na segunda simulação, com os novos parâmetros, se comportou de forma semelhante a primeira simulação, não tendo mudanças significativas quanto à valores de saída do inversor de frequência, permanecendo em média em 21,74%, muito próximo dos 22,15% da simulação anterior. Desta forma para a máquina de pó de serra manteve-se uma média de 15,4 Hz e para o soprador de ar 18,4 Hz, na etapa da elevação de temperatura.

Com tais valores, as reduções com pó de serra e gasto energético são os mesmos que os da simulação 1.

4.4 Comparação SCA x Modelagem Matemática

Para evidenciar que o SCA irá representar um controle onde a queima ocorrerá da melhor forma possível é importante comparar o mesmo com os resultados obtidos a partir da

modelagem matemática, pois como na modelagem existe uma relação entre a temperatura e umidade do material será viável perceber se o sistema se comporta conforme a modelagem e assim estabelece uma relação com umidade do material, que é de fundamental importância para que não ocorra falhas estruturais na cerâmica. A figura 82 e 83 compara o SCA com a modelagem matemática realizada sobre os parâmetros da tabela 13.

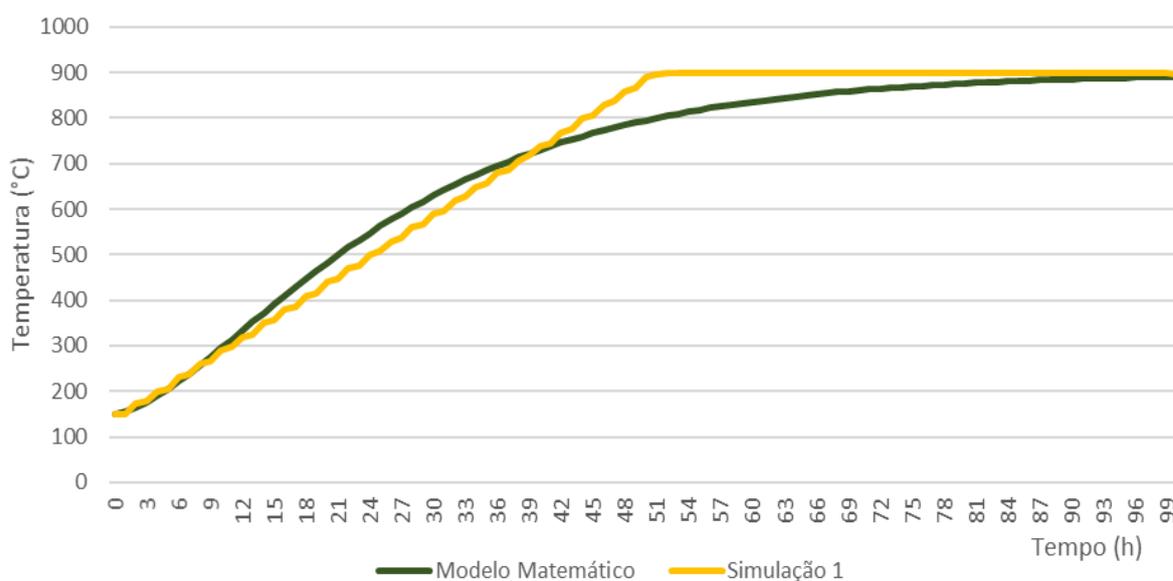


Figura 83- Comparação da temperatura no modelo matemático x SCA
Fonte: Autor (2018)

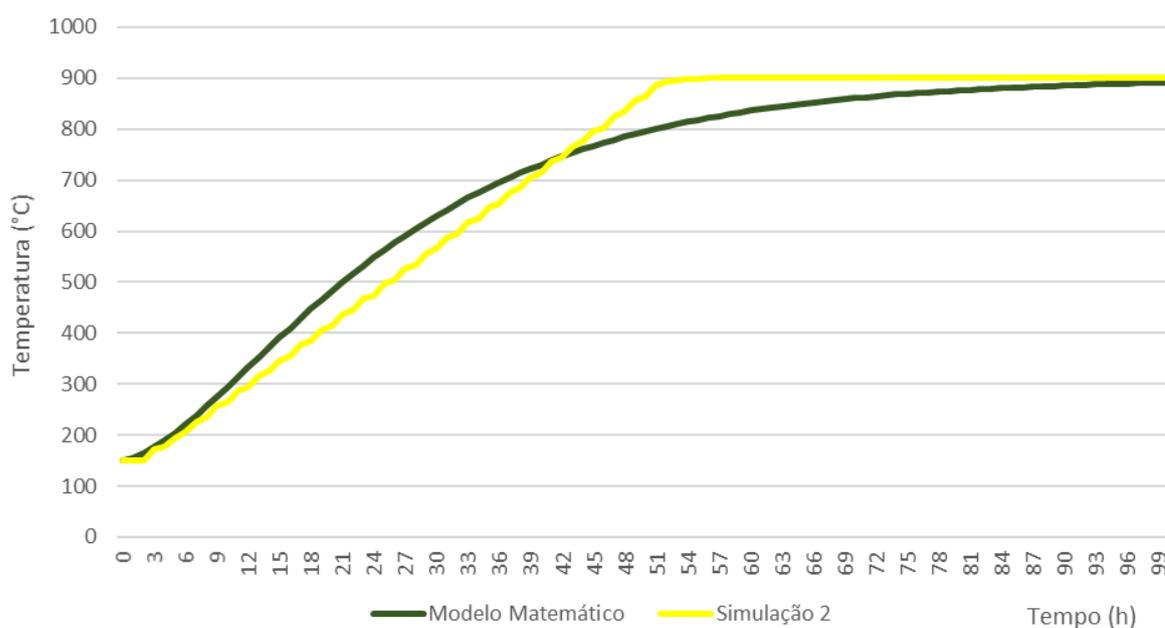


Figura 84- Comparação da temperatura no modelo matemático x SCA
Fonte: Autor (2018)

Observando as figuras 82 e 83 é possível notar que o sistema tem um comportamento semelhante ao modelo matemático desenvolvido evidenciando assim a capacidade do sistema efetuar o controle da temperatura com eficiência e seguindo a curva de relação temperatura/umidade relacionada no modelo matemático. Assim estreita-se a correlação entre a temperatura controlada no interior do forno pelo S.C.A. e a umidade do material cerâmico queimado.

4.5 Custos do projeto

Para que o projeto seja implementado são necessários alguns custos com equipamentos e instalação, no quadro abaixo segue uma faixa de valores para os principais dispositivos para execução do SCA pesquisados em sites especializados.

Quadro 20- Custo dos Equipamentos do SCA

Equipamento	Valor
C.L.P Phoenix ILC 150 ITH	R\$2000,00
Phoenix Contact Mini MCR-SL-TC-UI-NC	R\$690,00
Inversor de Frequência WEG CFW 10	R\$ 550,00

Fonte: Autor (2018)

Todos os equipamentos descritos no quadro 20 possuem características elétricas e construtivas compatíveis com o ambiente em que está inserido. É importante lembrar que alguns equipamentos não foram citados pois já se encontram instalados e em funcionamento na cerâmica caso do termopar, máquina de pó de serra e soprador de ar.

Vale ressaltar que o projeto pode ser ainda menos oneroso com a utilização do próprio inversor de frequência para executar o controle ao invés do C.L.P pois em alguns o Inversores de frequência há a possibilidade da implementação do bloco P.I.D. No presente trabalho não foi efetuado dessa forma devido a impossibilidade de equipamentos com essa característica durante a simulação do sistema.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi proposto o desenvolvimento e simulação de um sistema de controle de alimentação (SCA), no qual foi comparado o comportamento da queima atual com a utilização do SCA. Além do mais foi desenvolvida uma modelagem matemática do forno intermitente tipo abóboda que relaciona a temperatura com a umidade no seu interior. Os resultados obtidos verificam que com o SCA a queima é feita sem variações e mudanças abruptas de temperaturas, diferente da queima atual, e o modelo matemático proposto demonstra o melhor comportamento para da temperatura para se obter um melhor aquecimento.

Em relação ao modelo matemático desenvolvido no presente trabalho, que relaciona a temperatura de queima com a umidade presente no material cerâmico e se encontra descrito nas equações 15 e 16, o mesmo se comportou de maneira fiel a curva de queima real.

O modelo foi comparado com 3 amostras de queimas e, para todas elas, foram realizados 3 casos em que se modificavam os parâmetros das equações diferenciais que formam o modelo. Para cada queima decorreu um caso em que o modelo obteve um comportamento mais próximo ao real.

Para a primeira queima os melhores parâmetros foram $\beta = 0,04$ Hz, $T_s = 900^\circ\text{C}$ e $\gamma = 0,15$ Hz. Na Queima 2 os melhores parâmetros estabelecidos foram $\beta = 0,07$ Hz, $T_s = 925^\circ\text{C}$ e $\gamma = 0,2$ Hz. Já para a última queima os parâmetros escolhidos foram $\beta = 0,05$ Hz, $T_s = 910$ e $\gamma = 0,03$ Hz.

Observando os valores ótimos obtidos pode-se avaliar que eles são muito próximos um dos outros principalmente no parâmetro β , que é a constante de condução térmica. As diferenças entre eles se dão principalmente no parâmetro T_s , entretanto tal fato é justificado, pois cada queima possui um valor final de temperatura diferente um do outro.

Para o parâmetro γ há uma diferença encontrada na última queima em que o mesmo se apresenta bem abaixo quando comparado à queima 1 e 2. Isso ocorre pelo fato de que a temperatura inicial nesta queima é bem superior ao das outras duas, desta forma o gradiente de temperatura é menor.

Analisando as figuras 68, 70 e 72 pode-se afirmar que o modelo matemático desenvolvido se comporta de uma forma bem fiel à curva de queima real do forno estudado e evidencia o melhor comportamento da temperatura durante a queima. Da mesma forma, é possível estabelecer que a umidade influencia de diretamente na queima no interior do forno e

que seu valor é reduzido com o passar do tempo, ou seja, enquanto a temperatura aumenta, como pode ser visto nas figuras 69, 71 e 73.

Com relação a Simulação do SCA, foram executadas duas simulações com mudanças de parâmetros para o controlador P.I.D.. Tanto na primeira quanto na segunda simulação o sistema se comporta com um controle de temperatura muito satisfatório, pois conforme pode ser visto nas figuras 74 e 78, o aumento da temperatura é efetuado de uma maneira não abrupta, dentro do tempo necessário para adquirir propriedades estruturais e estéticas e desta forma diminuindo as chances de deformidades estruturais e retirar o máximo de água residual do produto cerâmico, já durante a etapa de fogo forte a temperatura se mantém constante em 900°C sem variações para mais ou para menos.

Quando se compara o SCA com as queimas atuais do forno é possível observar uma maior linearidade na subida da temperatura com a utilização do sistema de controle. Nas queimas sem o controle é notável uma variação de temperatura e também tempos de queimas diferentes o que pode gerar problemas estruturais e estéticos além de produtos com características diferentes de uma fornada para outra. Desta forma, o SCA é capaz de gerar uma queima mais homogênea, linear e controlada conforme comparação visualizada nas figuras 75, 76, 77, 79, 80 e 81.

O SCA é capaz de fornecer ao processo de queima uma redução de combustível e consequentemente uma redução de custo de produção que pode variar de R\$ 300,00 a R\$ 600,00, de acordo com a vazão de combustível. Ocorre também uma diminuição no custo da energia elétrica, no entanto, a mesma não pode ser definida com precisão pois o sistema não foi implementado para se obter tais informações. Mesmo assim, é possível afirmar que o sistema traz uma redução no gasto com energia elétrica considerável pois os equipamentos que antes eram acionados em seu valor máximo, com o sistema são acionados somente com a potência necessária para gerar o giro do motor e sopro do soprador, suficientes para efetuar o controle na temperatura de referência.

O SCA também foi comparado com o modelo matemático desenvolvido, como mostrado através das figuras 82 e 83, o comportamento da temperatura com o SCA segue as curvas geradas pelo modelo matemático proposto. Como o mesmo se relaciona com a umidade é possível estabelecer uma relação que o SCA controla a queima de forma a evitar possíveis falhas estruturais causadas pela umidade. Isso ocorre, pois, o seu aquecimento é feito seguindo também a relação temperatura/umidade proposta no modelo matemático.

Para implementação do sistema de controle o gasto mínimo é de aproximadamente de R\$ 3240,00 só com os equipamentos necessários citados no capítulo 4.4. Há ainda o gasto com instalação e mão de obra o que depende do contratante e do contratado, mas que não seria algo de valor muito elevado pois se trata de um sistema com fácil instalação.

Como recomendações de trabalhos futuros sugere-se a implementação física do SCA, desta forma pode ser feita a verificação da redução energética e também a análise das propriedades físicas e tecnológicas das peças queimadas antes e após a implementação do SCA. Também pode ser efetuado uma modelagem matemática que relacione o gasto de combustível com temperatura e também que considere a forma dos tijolos a serem queimados.

Desta forma, a modelagem matemática proposta representa de forma satisfatória o aquecimento do forno e a relação da temperatura com a umidade no seu interior, e o SCA apresenta um controle da temperatura interna do forno através de sua alimentação com resultados de queima melhores aos atuais no que se diz respeito a sua eficiência, linearidade, controle e tempo de queima durante o processo de queima.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM, - Associação Brasileira de Cerâmica. (2016). Informações Técnicas - Processo de Fabricação. ABCERAM. Recuperado de <http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>
- Alexandre, J., de Azevedo, A. R. G., de Castro Xavier, G., Pedroti, L. G., Vieira, C. M. F., & Monteiro, S. N. (2014). Study of a Clayey Soil Used in the Fabrication of Red Ceramics in Campos Dos Goytacazes, Brazil. *Materials Science Forum*, 798–799, 15–20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.798-799.15>
- Almeida, L., Petrucci, L., Pessanha, E., Paixão, L., & Maia, F. (2010). Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de blocos cerâmicos na região de campos dos goytacazes. Apresentado em 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Campos do Jordão, SP, Brasil.
- ANICER, - Associação Nacional da Indústria Cerâmica. (2016). Recuperado de <http://portal.anicer.com.br/setor/>
- Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton: Princeton University Press. Recuperado de <http://site.ebrary.com/id/10394791>
- Babisk, M. P., Ribeiro, A. P., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2014). Development of Ceramics Based on Clays from Different Regions in the State of Rio de Janeiro, Brazil. *Materials Science Forum*, 805, 530–535. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.805.530>
- Barbosa, D., Silva, J., Machado, R., & Hotza, D. (2008). Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Estudo de Caso na Fabricação de Porcelanato no Brasil. *Cerâmica Industrial*, 13(4).
- Bega, E. A., Delméé, G. J., Cohn, P. E., Bulgarelli, R., Koch, R., & Finkel, V. S. (2011). *Instrumentação Industrial* (3º ed). Rio de Janeiro, RJ: Interciência.

- Bin Lu, Monti, A., & Dougal, R. A. (2003). Real-time hardware-in-the-loop testing during design of power electronics controls (Vol. 2, p. 1840–1845). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1280340>
- Borchardt, I. G., & Gomes, A. F. (1979). *Termopares* (2º ed). Porto Alegre: Sagra S.A.
- Bouth, J. (2008). *Manual De Operações Básicas Na Indústria Da Cerâmica Vermelha* (1º ed). Natal, RN: FastGraf.
- Braga, W. A., Santos, M. W. L. C., & Sales, J. C. (2016). Qualidade na Indústria de Cerâmica Vermelha: Medidas e Alternativas para o Controle Dimensional. *Cerâmica Industrial*, 21(5–6), 40–43. <https://doi.org/10.4322/cerind.2016.031>
- Bristot, V. M., Guimarães Filho, L. P., Pacheco, P. P., Natal, T. B., Rocha, D. A., & Bristot, V. M. (2015). Implementação de Servomotores no Controle de Válvulas de Gás para Queimadores de Fornos a Rolos em Indústrias Cerâmicas. *Cerâmica Industrial*, 20(4), 41–50. <https://doi.org/10.4322/cerind.2015.020>
- Callister, W. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução* (5º ed). Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora.
- Cruz, J. (2004). Entendendo e Ajustando Malhas De Controle. Escola Politécnica da USP - EPUSP.
- Curtis, K. (2005). A DNP3 Protocol Primer. DNP Users Group. Recuperado de <https://www.dnp.org/AboutUs/DNP3%20Primer%20Rev%20A.pdf>
- Dawson, R., Boyd, C., Dawson, E., & Nieto, J. (2006). SKMA – A Key Management Architecture for SCADA Systems (Vol. 54). Apresentado em 4º Australasian Information Security Workshop, Sidney, Australia: CRPIT.
- Del Monte, F. (1980). Motores Assíncronos com Frequência Variável. *Mundo Elétrico*, 56.

- Donghyun Choi, Hakman Kim, Dongho Won, & Seungjoo Kim. (2009). Advanced Key-Management Architecture for Secure SCADA Communications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), 1154–1163. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2005683>
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (1998). *Modern control systems* (8th ed). Menlo Park, Calif: Addison-Wesley.
- Eletrobrás, Instituto Euvaldo Lodi, Programa Nacional de Conservação em Energia Elétrica, & Confederação Nacional da Indústria. (2008). *Instrumentação e Controle: Guia Básico*. Brasília: IEL/NC.
- Franchi, C. M., & Camargo, V. L. A. de. (2009). *Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos*. São Paulo (SP): Érica.
- Gao, J., Liu, J., Rajan, B., Nori, R., Fu, B., Xiao, Y., ... Philip Chen, C. L. (2014). SCADA communication and security issues: SCADA communication and security issues. *Security and Communication Networks*, 7(1), 175–194. <https://doi.org/10.1002/sec.698>
- Gasch, J. (2007). Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Evolução e Perspectivas. *Cerâmica Industrial*, 12(3).
- Harper, C. A. (Org.). (2001). *Handbook of ceramics, glasses, and diamonds*. New York: McGraw-Hill.
- Henriques Jr, M. (1993). Manual de Conservação de Energia na Indústria Cerâmica Vermelha. Rio de Janeiro, INT.
- Henriques Jr, M., & Rodrigues, J. (Orgs.). (2017). CERÂMICA VERMELHA Projeto EELA no Brasil. Instituto Nacional de Tecnologia.
- Igure, V. M., Laughter, S. A., & Williams, R. D. (2006). Security issues in SCADA networks. *Computers & Security*, 25(7), 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2006.03.001>

- Isermann, R., Schaffnit, J., & Sinsel, S. (1999). Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. *Control Engineering Practice*, 7(5), 643–653. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(98\)00205-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(98)00205-6)
- Knight, R. (1991). *Ieee Tutorial Course: Fundamentals of Supervisory Systems*. John Wiley : IEEE Press.
- Kokot, C. (1998). *Jahrbuch für die Ziegel Baukeramik und Steinzeugröhren Industrie*. Berlin, Alemanha: Bauer Verlag GmbH.
- Lobosco, O., & Dias, J. (1988). *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos*. McGraw-Hill/Siemens.
- Lopes, R., Oliveira Filho, D., Donzeles, S., & Ferreira, M. (2000). Controle da Combustão em Fornalhas a Lenha. Apresentado em 3o Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, SP
- Martín, F. (2004). Processos Produtivos em Revestimentos Cerâmicos: Variáveis de Processo e Possíveis Causas de Defeitos. *Cerâmica Industrial*, 9(5/6).
- Mascheroni, J., Lichtblau, M., & Gerardi, D. (2014). *Guia de Aplicação de Inversores de Frequencia* (No. 2). Jaraguá do Sul, SC: WEG.
- Menzel, T., Stoeppler, G., & Douglas, S. (2005). Hardware-in-the-loop simulation of machine tools and manufacturing systems. *Computing and Control Engineering*, 16(1), 10–15. <https://doi.org/10.1049/cce:20050101>
- Messias, L. (1996). Recuperação De Gases Quentes Em Fornos Intermitentes. Aplicação Na Indústria De Cerâmica Estrutural. *Cerâmica Industrial*, 1(2).
- Monfort, E., Mezquita, A., Vaquer, E., Alves, H., Melchiades, F., & Boschi, A. (2011). Brasil x Espanha: Consumo de Energia Térmica e Emissões de CO₂ Envolvidos na Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 16(4).

- Monteiro, S. (2004). Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science*, 27(3–4), 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.03.002>
- Moraes, C. C. de, & Castrucci, P. (2007). *Engenharia de automação industrial* (2º ed). Rio de Janeiro (RJ): LTC.
- Moreira, L. (2002). Medição de Temperatura Usando-se Termopar. *Cerâmica Industrial*, 7(5).
- Murrill, P. W. (2012). *Fundamentals of Process Control Theory* (3º ed). USA: International Society of Automation.
- Nassetti, G. (2010). Como melhorar a eficiência energética na indústria de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 15(1).
- Nicolau, V. (2012). A Importância da Curva de Queima em Fornos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 17.
- Ogata, K. (2007). *Engenharia de controle moderno* (4º ed). São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Paiva Filho, E., Agostinho, R., Júnior, J., Bezerra, F., & Aquino, P. (2004). Cooperação Internacional E Desenvolvimento Tecnológico: Controle Do Processo De Queima Em Fornos Hoffmann Para Cerâmica Vermelha. Apresentado em Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Brasília.
- Patsko, L. F. (2006). Aplicações, Funcionamento e Utilização de sensores. Maxwell Bohr.
- Petrucci, E. (1997). *Materiais de Construção* (10º ed). São Paulo, SP: Globo.
- Pinheiro, B. C. A., & Holanda, J. N. F. (2010). Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 56(339), 237–243. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000300005>
- Pinheiro, P. C., & Valle, R. (1995). Controle da combustão: Otimização do excesso de ar. In *Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM* (p. 157–162). Rio de Janeiro, RJ.

- Prado, U. S. do, & Bressiani, J. C. (2013). Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década. *Cerâmica Industrial*, 18(1), 7–11. <https://doi.org/10.4322/cerind.2014.030>
- Ramos, I., Alves, M., & Alexandre, J. (2006). Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes - RJ. *Cerâmica Industrial*, 11(1).
- RCC, R. C. C. (2016). Dados do Setor ceramita de campos. RCC.
- Ribeiro, L. (2008). Os Empreendimentos E Estratégias Para O Desenvolvimento Da Ceramica Vermelha No Brasil: Estudo De Caso De Campos Dos Goytacazes. Apresentado em IV Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Niterói, RJ, Brasil.
- Rocha, A. F., & Palma, M. A. M. (2012). Gestão da inovação e capacidade competitiva: uma análise não paramétrica no setor cerâmico de Campos dos Goytacazes, RJ. *Cerâmica*, 58(346), 244–252. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000200016>
- Santos, G. (2001). *Estudo Do Comportamento Térmico De Um Forno Túnel Aplicado a Industria De Ceramica Vermelha* (Dissertação de Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SEBRAE. (2015). Boletim de Inteligência: Construção cívil. Recuperado de [http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf)
- Sighieri, L., & Nishinari, A. (1973). *Controle Automático de Processos Industriais: Instrumentação* (2^o ed). São Paulo, SP: Edgard Blücher Ltda.
- Silva, R. M. (2011, março). *Análise Comparativa Entre Propriedades Mecânicas, Termofísicas e Geométricas De Tijolos Produzidos Pelos Fornos Caieira e Abóbada* (Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

- Sposto, R. M., Medeiros, E., Ramos, D., Naya, L., & Morais, D. (2007). Análise da Conformidade de Blocos Cerâmicos Sinterizados em Fornos Intermitentes e Contínuos no Distrito Federal. *Cerâmica Industrial*, 12(5).
- Teixeira, R., Melchiades, F., & Boschi, A. (2002). A Variação das Características das Argilas e o Processo Cerâmico. *Cerâmica Industrial*, 7(3).
- Thomazini, D., & Albuquerque, P. (2005). *Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações* (1º ed). São Paulo, SP: Érica.
- Tubino, L. (2006). *Etapas do Processo Cerâmico e sua Influência no Produto Final – Massa, Extrusão, Secagem e Queima* (Dossiê Técnico) (p. 1–19). Rio Grande do Sul: SENAI.
- Vieira, C. M. F., Holanda, J. N. F. de, & Pinatti, D. G. (2000). Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes - RJ. *Cerâmica*, 46(297), 14–17. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132000000100003>
- Vlassov, D. (2001). *Combustíveis, combustão e câmaras de combustão*. Curitiba: UFPR.
- Wieck, R., & Fh, J. (2013). Extrusão em Cerâmica Vermelha: Princípios Básicos, Problemas e Soluções. *Cerâmica Industrial*, 18(3), 16–23.

APÊNDICE A – Lista das indústrias cerâmicas ativas em Campos dos Goytacazes

Nº	Empresa
1	A A XAVIER - CERÂMICA
2	A.C. CERÂMICA
3	A.S. RODRIGUES
4	AGRO INDUST. MUSSUREPE
5	AZEVEDO SANTOS
6	AZEVEDO PINTO
7	B R INDUST. CERAMICA
8	BARCELOS E FERREIRA
9	BARROS HENRIQUE
10	BATISTA CRESPO CIA
11	CER. ABUD WAGNER
12	AGRO IND. DUASANNAS
13	CER. BOM LAJOTA
14	CER. CACOMANGA
15	CER. CAMPISTA
16	CER. CINCO ESTRELAS
17	CER. COQUEIROS
18	CER. CORDEIRO E TEIXEIRA
19	CER. DOIS AMIGOS
20	CER. FREITAS E PESSANHA
21	CER. HENRIQUES ARÊAS
22	CER. INDEPENDÊNCIA
23	CER. INDIANA
24	CER. IRMÃOS CARDOSO
25	CER. IRMÃOS GORDINHOS
26	CER. IRM. S. E SOBRINHOS
27	CER. J. CORDEIRO
28	CER. J. F. GONÇALVES
29	CER. KI-JOINHA
30	CER. KITAN
31	CER. LUISXANDRE
32	CER. MARCELO
33	CER. MARLUNIL
34	CER. MEND. E CHAGAS
35	CER. MINEIROS
36	CER. NOGUEIRA JÚNIOR
37	CER. N. S. APARECIDA
38	CER. N. S. VITÓRIA
39	CER. N. S. CARMO
40	CER. OLHOS DÁGUA
41	CER. OLIVIER CRUZ
42	CER. PAUS AMARELOS

43	CER. PEDRO XAVIER
44	CER. PESSANHA GONÇALVES
45	CER. PIZZAIOLLO
46	CER. POÇO GORDO
47	CER. PRIMUS
48	CER. R. V. BARCELOS
49	CER. R. V. BARCELOS (FILIAL)
50	CER. ROCHA
51	CER. ROSÁRIO E VIANA
52	CER. SANTA CÉLIA
53	CER. STA CRUZ DO L. GARCIA
54	CER. SANTA EDWIGES
55	CER. SANTA MÔNICA
56	CER. STO. AMARO DE CPOS
57	CER. STO. AMARO LTDA
58	CER. SÃO BENTO
59	CER. SÃO GONÇALO
60	CER. SÃO PEDRO DE CAMPOS
61	CER. SIQUEIRA CARDOSO
62	CER. SOUZA HENRIQUE
63	CER. STILBE
64	CER. TABATINGA
65	CRESPO FILHO & AZEREDO
66	D. A. GAMA & CIA
67	E.A.A. FREITAS
68	ELIANE M.P.DE AZEVEDO
69	F.A.C. PAES VIANA
70	F. P. R. IND. CERÂMICA
71	FERREIRA E FREITAS
72	G. P. DE AZEVEDO
73	HENRIQUES E AZ. JÚNIOR
74	IND. CER. CARVÃO
75	CER. ALVES RIBEIRO
76	IND. CER. ALVES RANGEL
77	IND. CER. GAMA E SILVA
78	IND. CER. PRIMEIRA
79	IND. CER. SÃO SEBASTIÃO
80	IND. CER. CARDOSO FILHO
81	IRMÃOS VIANA BARCELOS
82	CERAMICA FENIX
83	JOCEILDO P. BARRETO
84	M. D. G.
85	CERANICA M. GOMES CHAGAS
86	M. SOUZA CHAGAS
87	MARTINS E CRESPO

88	MARTINS E NOGUEIRA
89	N. C. RESÍDUOS
90	OLARIA BARRO FORTE
91	CERAMICA SÃO JOSÉ TELHAS
92	PEIXOTO E RIBEIRO'S
93	R. P. PESSANHA- CERÂMICA
94	R. R. R. IND. CERÂMICA
95	RANGEL PESSANHA
96	RODOLFO AZEV. GAMA
97	SILVA RAMOS
98	UNIÃO CER. COQUEIROS
99	VAGNER P. LOBO
100	VIPI CERÂMICA
101	WAGNER LINHARES
102	X. S. C. CERÂMICA
103	Cerâmica N Sr da Penha
104	R W PRODUTOS CERÂMICOS
105	L. F. BARROS DE ALMEIDA
106	Ceramica N Sr de Fatima
107	CERAMICA TOLEDO

APÊNDICE B – RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA UMIDADE

Considerando o ponto inicial a equação 26 descrita acima separa-se ás variáveis da seguinte forma:

$$\frac{dU}{U} = -\gamma dt, \quad (33)$$

resolvendo as derivadas dU e dt chega-se ao resultado:

$$\ln \frac{U}{U_0} = -\gamma \cdot t. \quad (34)$$

Para sair dessa igualdade eleva-se ambos os lados a e , e desta forma obtém-se a seguinte expressão:

$$e^{\ln \frac{U}{U_0}} = e^{-\gamma \cdot t}. \quad (35)$$

Com igualdade mostrada em 29 é possível obter o valor da Umidade que varia de acordo com o tempo:

$$\frac{U}{U_0} = e^{-\gamma \cdot t} \rightarrow U = U_0 e^{-\gamma \cdot t}, \quad (36)$$

onde U_0 é a Umidade inicial do sistema, γ taxa de decréscimo da umidade, previamente citada e t o tempo.

APÊNDICE C – RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA TEMPERATURA

Observando a equação da temperatura indicada pela equação 26, a solução da equação da Umidade demonstrada em 30 e também considerando $(T_s - T) = u$, então $\frac{dT}{dt} = \frac{du}{dt}$ temos a seguinte equação:

$$\frac{du}{dt} = -\beta u - \gamma U_0 e^{-\gamma t}. \quad (37)$$

Multiplicando-se ambos os lados por $e^{-\gamma t}$, é obtida a seguinte expressão:

$$\frac{du \cdot e^{\gamma t}}{dt} = -\beta \cdot u \cdot e^{-\gamma t} - \gamma \cdot U_0. \quad (38)$$

sabe-se que:

$$\frac{d[u \cdot e^{\gamma t}]}{dt} = \frac{du \cdot e^{\gamma t}}{dt} + \gamma \cdot u \cdot e^{\gamma t}. \quad (39)$$

Desta forma:

$$\frac{d[u \cdot e^{\gamma t}]}{dt} - \gamma \cdot u \cdot e^{\gamma t} = -\beta \cdot u \cdot e^{\gamma t} - \gamma \cdot U_0, \quad (40)$$

$$\frac{d[u \cdot e^{\gamma t}]}{dt} = -(\beta - \gamma) u \cdot e^{\gamma t} - \gamma \cdot U_0, \quad (41)$$

atribuindo-se a $u \cdot e^{\gamma t} = x$ e $X_0 = \frac{\gamma \cdot U_0}{\beta - \gamma}$. Tem-se as seguintes igualdades:

$$\frac{dx}{dt} = -(\beta - \gamma)x - \gamma \cdot U_0 = -(\beta - \gamma) \cdot (x + X_0), \quad (42)$$

considerando $x' = x + X_0$, obtém-se:

$$dx' = -(\beta - \gamma) \cdot x'. \quad (43)$$

Separando as variáveis, resolvendo a derivada e considerando que $x(t=0) = u_0 = T_0 - T_s$, é obtida a seguinte expressão:

$$\frac{\ln x'}{x'(t=0)} = -(\beta - \gamma) \cdot t, \quad (44)$$

elevando ambos os lados da igualdade por e , separando a variável x' , resulta-se em:

$$x' = x'(t=0) \cdot e^{-(\beta-\gamma)t}. \quad (45)$$

Para voltar e obter o resultado em função da Temperatura e do tempo deve-se inicialmente reconsiderar que $x'(t=0) = x(t=0) + X_0 = T_0 + T_s + X_0$. Desta forma:

$$x + X_0 = (T_0 + T_s + X_0) \cdot e^{-(\beta-\gamma)t}, \quad (46)$$

como visto anteriormente $x = u \cdot e^{\gamma t}$, então:

$$u \cdot e^{\gamma t} + X_0 = (T_0 + T_s + X_0) \cdot e^{-(\beta-\gamma)t}. \quad (47)$$

Como $u = (T - T_s)$, então:

$$(T - T_s) \cdot e^{\gamma t} + X_0 = (T_0 + T_s + X_0) \cdot e^{-(\beta-\gamma)t}, \quad (48)$$

$$T = T_s - \left\{ X_0 (e^{-\gamma t} - e^{-\beta t}) + (T_s - T_0) e^{-\beta t} \right\}. \quad (49)$$

De maneira que $X_0 = \frac{\gamma \cdot U_0}{\beta - \gamma}$, então temos o valor da Temperatura que varia de acordo

com o tempo e também com a Umidade:

$$T = T_s - \left\{ \left(\frac{\gamma \cdot U_0}{\beta - \gamma} \right) (e^{-\gamma t} - e^{-\beta t}) + (T_s - T_0) e^{-\beta t} \right\} \quad (50)$$