

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

DISSERTAÇÃO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA FORNOS
INTERMITENTES DE CERÂMICA VERMELHA CONSIDERANDO A
EFICIÊNCIA TÉRMICA**

BRUNO LIMA SOUZA

2019

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

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA FORNOS
INTERMITENTES DE CERÂMICA VERMELHA CONSIDERANDO A
EFICIÊNCIA TÉRMICA**

BRUNO LIMA SOUZA

Alline Sardinha Cordeiro Morais

(Orientadora)

Cristine Nunes Ferreira

(Co-Orientadora)

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

Junho de 2019

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

S729p Souza, Bruno Lima
Projeto de um Sistema de Controle para Fornos Intermitentes de Cerâmica Vermelha Considerando a Eficiência Térmica / Bruno Lima Souza - 2019.
143 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, 2019.
Referências: f. 136 a 140.

1. Cerâmica Vermelha. 2. Controle PID. 3. Eficiência Térmica. 4. Modelagem Matemática. 5. Queima. 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

BRUNO LIMA SOUZA

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.

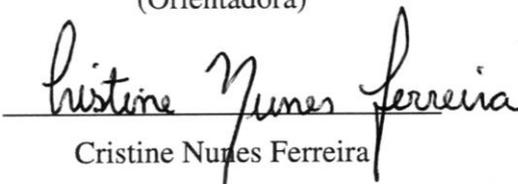
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/06/2019



Alline Sardinha Cordeiro Morais

Doutora em Engenharia e Ciências dos Materiais – IFF

(Orientadora)



Cristine Nunes Ferreira

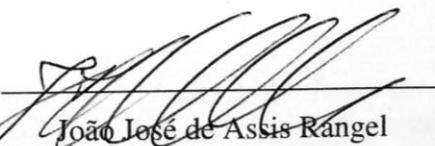
Doutora em Física – IFF

(Co-Orientadora)



Adelson Siqueira Carvalho

Doutor em Informática na Educação – IFF



João José de Assis Rangel

Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais – IFF

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por não me deixar submergir em meio as dificuldades. Por ter criado oportunidades, capacitado pessoas e arquitetado tudo ao meu favor de forma milagrosa. Ele é mesmo profissional em transformar toda dor em beleza.

À minha mãe, meu pai e meu irmão por serem meu alicerce sempre, por suas incansáveis orações que tanto me fortalecem e suas sábias palavras que me encorajam a ir além. Eu seria nada mesmo sem a existência de vocês - somos extensões uns dos outros.

À minha namorada Fernanda pela criatividade em criar estratégias com o fim de me impulsionar e incentivar quando estava beirando a desistência, me ensinando o verdadeiro significado de “companheirismo”. Você é realmente incrível!

Ao Adriano Barbosa, que como bolsista do projeto contribuiu de forma essencial com seus conhecimentos técnicos, boa vontade, comprometimento e disponibilidade de sempre. Seu “caráter engenheiro” vem muito antes do seu futuro diploma. Te agradeço muito!

Aos amigos e parentes por entenderem meus períodos de reclusão. Agradeço as ofertas de ajuda e ouvidos dispostos aos meus desabafos. Em especial à Amanda de Moura, Roberta Alvarenga, Mariana Gualhano, Leandro Maciel, Fábio Escocard, Vinícius Lopes, Lara Hernandez, Diana Harris e a turma do SAEG 2017 sempre tão contígua.

Aos professores DSc. Simone Vasconcelos, William Vianna, Henrique da Hora, Adelson Carvalho e João José Rangel pelos sábios direcionamentos e discussões de ideias. A bagagem que carregam é meta para mim.

À Arte Cerâmica Sardinha e seus gestores Rodolfo Gama e Josane Maricá pelo interesse constante no desenvolvimento tecnológico. Seu sucesso é fruto de boa vontade e visão empreendedora.

Ao Yves Lima e Nathálie Terra por contribuir para a literatura com informações primordiais por meio de suas pesquisas. Além de todo suporte pessoalmente.

Às orientadoras Alline Moraes e Cristine Ferreira por me confiarem essa colaboração junto aos seus nomes. Pela atenção, análises críticas, direcionamentos, correções, ensinamentos e toda didática ao sentar ao meu lado para compartilhar seus conhecimentos.

Por fim agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram para mais essa formação. Nenhum resultado de sucesso é alcançado individualmente. A todos meu mais sincero: Muito obrigado!

*“Feito isso, apanharam uma grande quantidade de peixes, de modo que as redes se rompiam, **acenaram então aos companheiros que estavam no outro barco, para virem ajudá-los. Eles, pois, vieram, e encheram ambos os barcos, de maneira tal que quase iam a pique**”.*

Lucas 5:6-7.

RESUMO

Considerando a atual competitividade de mercado, o investimento em tecnologia vem sendo um pré-requisito à sobrevivência na indústria cerâmica. Na região norte-fluminense do estado do Rio de Janeiro essa atividade ocorre ainda de maneira muito artesanal, desse modo, a inserção da tecnologia é forçada a sofrer adaptações. Afinal, para produtos de baixo valor agregado, fica inviável investir em soluções para melhoria que custam mais que o lucro oriundo de tais melhorias. Esta pesquisa visa projetar, desenvolver e simular um sistema de controle capaz de melhorar a etapa da queima em fornos intermitentes de cerâmica vermelha. A queima é vista como a etapa mais importante e cara de todo o processo de produção cerâmico, tendo em vista que demanda maior consumo de energia. Tão importante, na grande maioria dos casos os problemas estruturais e estéticos provenientes de ações realizadas em procedimentos anteriores, só aparecem após esta etapa. De acordo com as propriedades dos materiais que compõem a massa cerâmica, as curvas gráficas que descrevem as aferições dos termopares no interior do forno devem assumir valores específicos. Por meio de estudo de caso, dados foram levantados com a finalidade de compreender melhor o cenário e desenvolver o controle adequado ao processo. A lógica de controle proposta atua na abertura-fechamento do *dampner* (registro que regula a passagem dos gases provenientes da queima para a chaminé), visando o controle da temperatura interna do forno. Os resultados apontam para uma queima mais estável, uniforme e eficiente, onde nem sempre uniformizar a temperatura em todo o espaço físico é a solução ideal. Cumpre-se o objetivo proposto de um sistema de controle que otimiza a etapa da queima cerâmica, levando em conta as principais propriedades físicas, químicas e matemáticas envolvidas no processo. Chegamos a resultados que demonstram a influência do controle da saída de calor sobre o sistema, muitas vezes ignorada ou erroneamente administrada.

Palavras-chave: Cerâmica Vermelha; Controle PID; Eficiência Térmica; Modelagem Matemática; Queima.

ABSTRACT

Nowadays, ceramic industries have to invest in technology in order to survive. Due to a handcrafted culture of manufacturing, technology entrees are forced to undergo adaptations. Considering the manufacturing of cheap products, it is unfeasible to invest in optimization solutions that cost more than the income from such improvements. This research aims to design, develop and simulate a control system able to optimize the burning stage in kilns of clayey ceramic. The burning stage is considered the most important and expensive stage of the entire manufacturing process, for it handles energy. It is so important that the vast majority of structural and aesthetic problems arise from the burning. According to the materials that compose the ceramic mass and their properties, the graphical curves that describe the measurements from the thermocouples located inside the kilns must assume specific values. Through a case study, some data was collected in order to better understand the scenario and develop the appropriate control to the process. The logic control developed to this research acts on the opening-closing of the damper (a register that regulates the passage of gases to the chimney), aiming the control of the inner temperature of the kiln. The results point to a more stable, uniform and efficient burning, where the standardization of the temperature throughout the whole physical space is not necessarily the ideal solution. The initial goal of a control system able to optimize the ceramic burning stage, taking into account the main physical, chemical and mathematical peculiarities, was achieved. It comes to results that demonstrate the influence of the heat output control, commonly ignored or poorly managed.

Key words: *Clayey Ceramic, PID Control, Heat Efficiency, Mathematical Modelling, Burning.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forno tipo chama reversível (desenho esquemático).....	33
Figura 2 – Aspectos construtivos do piso do forno (crivos).....	34
Figura 3 – Mecanismo utilizado para aproveitamento do calor entre os fornos.....	34
Figura 4 – Amostragem do produto final	38
Figura 5 – Agitação térmica	40
Figura 6 – Fluxo de calor (intensidade).....	41
Figura 7 – Comportamento da Caulinita	42
Figura 8 – Sistema de Controle em Malha Fechada.....	47
Figura 9 – Comparação entre curvas de resposta aos controles P, PI e PID	48
Figura 10 – Arquitetura básica de um sistema SCADA.....	49
Figura 11 – Etapas da Metodologia.....	57
Figura 12 – Diagrama de Venn com resultados da pesquisa bibliográfica	61
Figura 13 – Vista frontal do forno intermitente tipo abóbada em estudo.....	66
Figura 14 – Instalação dos termopares	67
Figura 15 – Comporta da chaminé	68
Figura 16 – Damper.....	69
Figura 17 - Interior do forno cerâmico com carga disposta em filas.....	72
Figura 18 – Aumento linear da temperatura ideal para o controle da alimentação	73
Figura 19 – Comportamento da chama e do fluxo de calor (<i>damper</i> fechado).....	74
Figura 20 – Comportamento de chama e do fluxo de calor (<i>damper</i> aberto).....	75
Figura 21 – Condições para garantia do fluxo de calor e eficiência térmica.....	79
Figura 22 – Arrumação padrão da carga considerada na pesquisa.....	80
Figura 23 – Análise do comportamento da curva através da haste (termopar)	83
Figura 24 – Lógica de controle (PC <i>Worx</i>)	89
Figura 25 – Modelo esquemático do sistema de controle desenvolvido	91
Figura 26 – Resposta gráfica ao teste de alimentação	93
Figura 27 – Resposta a uma entrada em degrau	93
Figura 28 – Comandos MatLab® para plotagem gráfica	94
Figura 29 - Gráfico com dados para obtenção da função de transferência (T9)	94
Figura 30 – Obtenção da função de transferência (T9)	94
Figura 31 – Comparação entre a curva gerada pela função de transferência (T9) e a curva de teste inicial.....	95
Figura 32 – Gráfico gerado pela equação da temperatura	96

Figura 33 – Obtenção da função de transferência (M4) e o gráfico que descreve seu comportamento	97
Figura 34 – Diagrama de bloco principal para simulação do processo (<i>Simulink</i>)	99
Figura 35 - Subsistema do controlador PID (T9)	99
Figura 36 – Subsistema do controlador PID (M4)	100
Figura 37 - Configuração dos parâmetros de simulação	100
Figura 38 - Interface Homem-Máquina desenvolvida para o projeto	101
Figura 39 – Detalhes do controle na IHM (T9)	102
Figura 40 – Detalhes do controle na IHM (M4)	102
Figura 41 – Configuração para criação automática do canal de comunicação <i>Simulink X InTouch</i>	103
Figura 42 – Blocos Matlab <i>function</i> e suas configurações	104
Figura 43 – Tela do OPC <i>Configurator</i>	105
Figura 44 – Configuração para comunicação das variáveis entre os <i>softwares</i> PC <i>Worx</i> e <i>Simulink</i>	105
Figura 45 – Bloco OPC <i>Configurator Real Time</i>	106
Figura 46 – OPC <i>read</i> (configuração)	106
Figura 47 – OPC <i>write</i> (configuração)	107
Figura 48 – Dados de acompanhamento das queimas	110
Figura 49 – Gráfico da Queima I (real)	112
Figura 50 – Gráfico da Queima II (real)	114
Figura 51 – Gráfico da Queima III (real)	116
Figura 52 – Queima I (padronizada)	117
Figura 53 – Queima II (padronizada)	117
Figura 54 – Queima III (padronizada)	117
Figura 55 – Curvas do modelo matemático para T9	119
Figura 56 – Curvas do modelo matemático para M4	120
Figura 57 – Curvas do modelo matemático para T9 e M4	121
Figura 58 – Gráfico da Simulação I	122
Figura 59 – Detalhes do controle de T9 e M4 para Simulação I	123
Figura 60 – Gráfico da Simulação II	124
Figura 61 - Detalhes do controle de T9 e M4 para Simulação II	124
Figura 62 – Gráfico da Simulação III	125
Figura 63 – IHM mostrando a atuação durante patamar da simulação III	126
Figura 64 – Simulação III X Queima I	126
Figura 65 – Simulação III X Queima II	127

Figura 66 – Simulação III X Queima III	127
Figura 67 – Proposta de adição do sétimo termopar	130

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1).....	39
Equação (2).....	39
Equação (3).....	39
Equação (4).....	39
Equação (5).....	79
Equação (6).....	79
Equação (7).....	82
Equação (8).....	82
Equação (9).....	82
Equação (10).....	82
Equação (11).....	82
Equação (12).....	83
Equação (13).....	83
Equação (14).....	83
Equação (15).....	83
Equação (16).....	83
Equação (17).....	84
Equação (18).....	84
Equação (19).....	84
Equação (20).....	84
Equação (21).....	84
Equação (22).....	84
Equação (23).....	84
Equação (24).....	85
Equação (25).....	85
Equação (28).....	85
Equação (43).....	85
Equação (26).....	143
Equação (27).....	143
Equação (29).....	144
Equação (30).....	144
Equação (31).....	144
Equação (32).....	144

Equação (33).....	144
Equação (34).....	144
Equação (35).....	144
Equação (36).....	144
Equação (37).....	145
Equação (38).....	145
Equação (39).....	145
Equação (40).....	145
Equação (41).....	145
Equação (42).....	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Contribuições literárias relevantes.....	64
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de Acompanhamento da Queima I (valores em graus Celsius).....	110
Tabela 2 – Dados de acompanhamento da Queima I (valores em graus Celsius).....	111
Tabela 3 – Dados de acompanhamento da Queima II (valores em graus Celsius)	112
Tabela 4 – Dados de acompanhamento da Queima II (valores em Celsius)	113
Tabela 5 – Dados de acompanhamento da Queima III (valores em graus Celsius)	114
Tabela 6 – Dados de acompanhamento da queima III (valores em graus Celsius).....	115
Tabela 7 – Variação de parâmetros para modelagem (curva T9).....	119
Tabela 8 – Variação de parâmetros para modelagem (curva M4).....	120
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na Simulação I.....	122
Tabela 10 – Parâmetros utilizados na Simulação II	123
Tabela 11 – Parâmetros utilizados na Simulação III	125
Tabela 12 – Custo de implementação do projeto	132

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica;
CLP	Controlador Lógico Programável;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
COPAPA	Companhia Paduana de Papéis;
DDE	<i>Dynamic Data Exchange;</i>
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente;
fPID	Função Proporcional, Integral e Derivativa;
GM	General Motors;
HIL	<i>Hardware-in-the-loop;</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;
IHM	Interface Homem-Máquina;
LABCERV	Laboratório de Ensaios Tecnológicos em Cerâmica Vermelha;
MTU	<i>Main Terminal Unit;</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira;
Nm ³	Normal metro cúbico;
OPC	<i>OLE for Process Control;</i>
PIB	Produto interno bruto;
PID	Proporcional, Integral e Derivativo;
RCC	Rede Campos Cerâmica;
RTU	<i>Remote Terminal Unit;</i>
SCA	Sistema de Controle de Alimentação;
SCADA	Sistemas de Controle Supervisório e Aquisição de Dados;
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas;
SRC	Sistema de Recuperação de Calor;
S#	String #;
T#	Termo #;
UV	Ultra-Violeta.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Contextualização	20
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos Específicos	23
1.3 Justificativa	24
1.3 Estrutura da Pesquisa	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 Indústria Cerâmica	26
2.1.1 Cerâmica Vermelha.....	26
2.1.2 Polo Ceramista Brasileiro.....	27
2.1.3 Polo Ceramista Regional	28
2.2 Processo Produtivo Cerâmico	30
2.3 Etapa da Queima	32
2.3.1 Fornos Cerâmicos.....	32
2.3.2 Alimentação	35
2.3.3 Processo de Queima	36
2.4 Modelagem Matemática.....	38
2.5 Equilíbrio Termodinâmico e Temperatura	39
2.6 Propriedades dos Materiais em Estudo	41
2.7 Automação Industrial	43
2.7.1 Conceito de Automação	43
2.7.2 Instrumentos de Controle	43
2.7.2.1 Sensores.....	44
2.7.2.2 Controladores	45
2.7.2.3 Atuadores	45
2.7.3 Sistemas de Controle em Malha Fechada.....	46
2.7.4 Controle P+I+D	47
2.7.5 Comunicação SCADA	48
2.7.6 Simulação via <i>Simulink</i>	49
2.7.7 Simulação <i>Hardware-in-the-loop</i>	50
2.8 Trabalhos Correlatos	52

3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 Classificação da Pesquisa.....	55
3.2 Etapas da Pesquisa	56
3.2.1 Revisão de Literatura	57
3.2.1.1 Revisão Sistemática.....	57
3.2.1.1.1 Objetivos de Pesquisa.....	57
3.2.1.1.2 Questionamentos da Pesquisa	58
3.2.1.1.3 Definição dos Temas-chave.....	59
3.2.1.1.4 Definição das <i>Strings</i> de Busca	59
3.2.1.1.5 Seleção das Bases de Busca.....	60
3.2.1.1.6 Aplicação do Método de Pesquisa.....	60
3.2.1.1.7 Avaliação Segundo Critérios de Seleção	62
3.2.1.2 Outros Critérios de Busca	63
3.2.2 Pesquisa de Campo.....	64
3.2.2.1 Definição do Objeto de Estudo	65
3.2.2.1.1 Localização.....	65
3.2.2.1.2 Características Técnicas	65
3.2.2.2 Aspectos Tangíveis para Controle.....	67
3.2.2.2.1 <i>Damper</i>.....	67
3.2.2.2.2 Entrada de Combustível	69
3.2.2.2.3 Termopares	70
3.2.2.2.4 Níveis de Aferição.....	71
3.2.2.2.5 Disposição da Carga.....	71
3.2.2.3 Aspectos Intangíveis para Controle.....	71
3.2.2.3.1 Tempo de Queima	72
3.2.2.3.2 Variação de Temperatura.....	73
3.2.2.3.3 Deslocamento do Gradiente de Temperatura.....	73
3.2.2.3.4 Fluxo de Calor	74
3.2.2.4 Definição da Problemática	76
3.2.3 Avaliações Técnicas.....	77
3.2.3.1 Temperaturas de Referência.....	77
3.2.3.2 Eficiência Térmica	78
3.2.3.3 Distribuição de Carga.....	79
3.2.3.4 Consumo.....	81

3.2.3.5 Emissão de Gases	81
3.2.4 Modelo Matemático do Objeto de Estudo.....	81
3.2.4.1 Confirmação do Modelo Matemático.....	82
3.2.5 Desenvolvimento da Lógica de Controle	85
3.2.5.1 Descrição da Lógica de Controle	86
3.2.5.2 Arquitetura de Controle.....	90
3.2.6 Simulação.....	92
3.2.6.1 Arquitetura de Simulação.....	92
3.2.6.2 Diagrama de Blocos no <i>Simulink</i>	97
3.2.7 Interface Homem-Máquina (IHM).....	101
3.2.8 Comunicação <i>Software / Hardware</i>	102
3.2.8.1 <i>Simulink X InTouch</i>	103
3.2.8.2 <i>Simulink X CLP</i>	104
3.2.9 Análises e Testes	107
3.2.9.1 Validação de Resultados	108
4. RESULTADOS	109
4.1 Comportamento Atual da Queima.....	109
4.1.1 Queima I.....	110
4.1.2 Queima II.....	112
4.1.3 Queima III	114
4.2 Parametrização das Queimas.....	116
4.3 Validação do Modelo Matemático Desenvolvido.....	118
4.4 Comportamento da Queima com Ação do Controle	121
4.4.1 Simulação I.....	122
4.4.2 Simulação II	123
4.4.3 Simulação III.....	125
4.5 Resultados com Base na Avaliação Gráfica e Ciclo de Queima	126
4.6 Resultados com Base na Eficiência Térmica	129
4.7 Custo de Implementação do Projeto.....	131
4.8 Benefícios à Sociedade.....	132
5. CONCLUSÃO.....	134
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	138
Apêndice A – Resolvendo a Equação da Umidade.....	143
Apêndice B – Resolvendo a Equação da Temperatura	144

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica [ABCERAM] (2018) o termo “cerâmico” compreende todo material inorgânico, não metálico, obtido geralmente após tratamento térmico em altas temperaturas. O termo tem origem no grego “KERAMOS”, que por sua vez, pode ser traduzido para “queimado”. As evidências da atividade cerâmica datam do período Neolítico (cerca de 20.000 a.C.), sendo assim seu desenvolvimento ocorreu naturalmente através da necessidade e curiosidade humana, impossibilitando a definição de um responsável pela sua criação. Os primeiros artefatos criados pelo homem foram modelados à mão, obtidos do barro cru e secos por meio de recursos naturais como o sol e o vento. Com a descoberta do fogo e a exploração da agricultura, as evidências empíricas levaram o homem a encontrar na argila as propriedades que satisfaziam suas novas necessidades.

A argila pode ser definida como um material natural, terroso, de granulação fina e que assume características plásticas quando em contato com a água (Grim, 1968). O homem percebeu que esse material quando submetido à altas temperaturas, passava por alterações estruturais que lhe atribuíam características muito importantes como impermeabilidade e resistência. Dessa maneira, por meio de experimentos e observações, nasceu a cerâmica em sua forma rudimentar.

As características especiais da argila permitiram que ela fosse utilizada para os mais diversos fins, desde confecção de pequenos vasilhames à construção de casas. Após longo histórico de desenvolvimento, a cerâmica ganhou força de forma geral, passando por uma série de modificações até chegar ao que se conhece atualmente. A cerâmica industrial sempre esteve em constante evolução, a variedade de produtos e equipamentos tecnológicos aumenta a cada dia. No Brasil, um setor que sempre teve destaque é o da cerâmica vermelha. Com o passar do tempo, a produção de cerâmica vermelha, louça de mesa e porcelana ganhou destaque dentre outros tipos de produção cerâmica que também se consolidaram como indústrias tradicionais (ANICER, 2018).

Ainda de acordo com informações da associação supracitada, no cenário evolutivo da cerâmica industrial do Brasil, o setor da cerâmica vermelha se apresenta segmentado em diversas especialidades. O sul do país se destaca pela produção de telhas, utensílios de uso doméstico e decoração. Esses produtos possuem maior valor de mercado e permitem maiores

investimentos no próprio processo de fabricação. A realidade do setor da cerâmica vermelha nessa região conta com alta lucratividade e equipamentos de ponta especializados em manter a qualidade no acabamento detalhado desse tipo de produção. Já a região sudeste do país se destaca pela produção em cerâmica vermelha de tijolos, elementos vazados e demais produtos de baixo valor agregado. Seus produtores vivem uma realidade à parte no quesito evolução, inovação e investimento tecnológico. Nessa região, a cultura de produção é caracterizada pela mão de obra não qualificada e produtos com baixo valor de mercado. O setor da cerâmica vermelha, no entanto, mesmo marcado pelas diferentes realidades de cada região possui destaque por deter o maior número de produtores cerâmicos em geral. Sendo a maioria dessas empresas de micro, pequeno e médio porte. Com tudo isso, fica fácil enxergar o panorama de desafios enfrentado por boa parte desse setor.

Na região norte-fluminense do estado do Rio de Janeiro, o meio de produção da cerâmica vermelha não costuma apresentar desenvolvimento tecnológico muito avançado. Normalmente as indústrias cerâmicas são fundamentadas sob estrutura familiar, marcadas por uma infra-estrutura antiga, artesanal, sem caráter metodológico ou científico. Por conta desses fatores, seu processo produtivo acaba não controlando suas principais variáveis, ocorrendo de maneira manual e baseado na experiência da mão de obra empregue. Fica evidente a falta de profissionalização dos envolvidos no processo e até mesmo de interesse por parte dos proprietários, que por muitas vezes se tratam de pessoas com menor grau de instrução e fechadas à novidades, tendo em vista que seus negócios funcionam da mesma forma há anos (RCC, 2018). Como resultado de tudo isso, o produto final é fortemente afetado pela não linearidade do processo de produção, diferenciando significativamente um lote de peça do outro, correndo o risco até de ocasionar discrepâncias técnicas não permitidas por normas (Braga, Santos & Sales, 2016).

O processo de produção de cerâmica vermelha exige o controle de uma série de fatores relacionados à instabilidade presente nas propriedades da matéria-prima, na fase de conformação das peças e no processo de queima. Esse controle dificilmente pode ser obtido manualmente ou sem capacitação. A necessidade por investimentos em tecnologia é constante, contrastando com os impasses financeiros e estruturais presentes na região. É necessário que ocorra a capacitação da mão de obra e a melhoria do processo produtivo por meio da automação e do controle dos processos. Porém, essas medidas são tão necessárias quanto dispendiosas, requerendo tempo, planejamento e principalmente o emprego de recursos financeiros. De maneira geral, o desenvolvimento e a execução dos projetos de

controle possuem custo elevado. As cerâmicas até veem esse investimento como uma forma de melhorar o controle de qualidade em seu processo de produção e atrair mais consumidores, porém a maioria não tem como investir. As soluções em automação devem ter foco no baixo custo e na aplicação gradativa, de maneira a priorizar as etapas de mais importância no processo. Seguindo essa lógica, o investimento que seria inviável para controle do processo como um todo, pode ser aplicado e gerar grandes impactos em pelo menos parte do processo (Rocha & Palma, 2012).

Dentre as etapas do processo produtivo de cerâmica vermelha, à que pode ser atribuída maior relevância é a etapa da queima. Nessa etapa são definidas as características técnicas e estéticas do produto final. Nela será determinado se o produto estará dentro do padrão de qualidade (Paiva Filho, Agostinho, Júnior, Bezerra, & Aquino, 2004). De acordo com Pinheiro e Holanda (2018), a maioria das cerâmicas do sudeste brasileiro não utiliza temperatura de queima adequada, não controla a uniformidade da queima e nenhum dos outros fatores essenciais ao processo. Além dessa problemática, existe a questão do gasto energético. É a etapa da queima que gera o maior custo com energia, tanto pelo gasto com combustíveis, quanto pelo gasto com eletricidade utilizada para funcionamento de trocadores de calor e outros instrumentos. Segundo Nasseti (2018), cerca de 30% do custo total de uma cerâmica é proveniente da queima, o que reforça a escolha dessa etapa como prioridade para investimentos.

Tratando-se da produção regional em cerâmica vermelha e produtos com baixo valor de venda, sua queima costuma ser praticada em fornos tipo abóbada, que possuem baixa eficiência energética, grande perda de calor e aquecimento irregular. Sabe-se que fornos com controle de alimentação à gás e são mais ideais para esse tipo de produção, mas essa não é uma realidade de investimento local. É comum que nos fornos tipo abóbada, não existam sistemas de monitoramento quanto à temperatura interna, acarretando grandes perdas, seja pelo alto consumo de combustíveis, seja pelos produtos de baixa qualidade que são gerados. Além de todos os fatores abordados até aqui, existe um elemento físico nesse tipo de forno que influencia diretamente os demais aspectos que podem ser considerados em sua queima. Esse elemento é o registro que normalmente regula a passagem dos gases provenientes da queima pela chaminé e seu controle é o foco da proposta da atual pesquisa. Vários autores como Lima (2018); Azevedo (2017) e Cava (2015) tratam da melhoria do processo de queima cerâmico, porém nenhum deles leva em conta a saída de calor do sistema. Na prática, o registro normalmente é considerado apenas quando se inicia a combustão nas fornalhas, logo

após esse passo ele costuma ser deixado aberto em demasia desperdiçando boa parte do poder calorífico do forno e resultando em consumo exacerbado de combustível, maior tempo de queima, etc. Seu controle influencia em toda a resposta ao comportamento da temperatura no interior do forno, expressando assim a necessidade da atenção quanto ao seu comportamento. Uma possível solução seria a substituição desse registro por uma válvula de controle de vazão (*damper*) - mecanismo servo-controlado, para que a mesma obedeça à uma lógica de controle capaz de administrar seu comportamento da melhor forma, em resposta ao sistema. Sendo assim, a análise da queima em fornos intermitentes de cerâmica vermelha, considerando as temperaturas de entrada e saída do sistema (com base nos conceitos de fluxo de calor e eficiência térmica) é a contribuição geral desta pesquisa.

1.2 Objetivos

Para melhor entendimento do propósito deste trabalho, seu objetivo é apresentado sob uma visão geral e depois desmembrado em pontos mais específicos que detalham sua finalidade.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é projetar, desenvolver e simular um sistema de controle capaz de otimizar o processo de queima em fornos intermitentes de cerâmica vermelha.

Esse controle tem por objetivo trazer melhorias quanto às características técnicas do produto final, reduzindo o desperdício do potencial energético do processo, bem como possíveis impactos ambientais, tempo e custo de produção.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coletar e padronizar dados referentes às queimas reais;
- Modelar matematicamente a dinâmica do sistema (forno);
- Validar graficamente o modelo matemático com dados das queimas reais;
- Desenvolver a lógica de controle do sistema;
- Validar o controlador em simulação;
- Validar os comportamentos da simulação e das queimas reais;

- Validar o modelo matemático por meio da alteração dos seus parâmetros em comparação com dados das queimas reais;
- Ajustar o controle desenvolvido mediante alteração dos seus parâmetros (controle PID);
- Avaliar resultados com base no ciclo de queima;
- Avaliar resultados com base na eficiência térmica;
- Levantar custos de implementação do projeto.

1.3 Justificativa

Frente ao cenário enfrentado pelos produtores do ramo da cerâmica vermelha, o presente projeto traz uma solução para o aumento da eficiência na etapa de queima, considerada como crítica, do ponto de vista da qualidade sobre as características técnicas do produto final. Essa solução também alcança melhorias relacionadas ao custo energético do processo e à emissão de poluentes por ele gerado. Todas as propostas são feitas com foco no baixo custo e impactam a lucratividade do produtor.

No Brasil existem grandes polos cerâmicos, em sua maioria estão situados na região de Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro, podendo-se destacar a região Norte Fluminense do estado. Segundo dados divulgados pela ANICER (2018), o setor gera faturamento anual na ordem de bilhão e cerca de 900 mil empregos indiretos. Para a economia do estado do Rio, a indústria da cerâmica vermelha é de muita importância, sendo que o maior número de empresas e o maior volume de produção se encontram na cidade de Campos dos Goytacazes. No município existem aproximadamente 120 empresas do ramo, sendo produzidas cerca de 60 milhões de peças cerâmicas por mês.

Segundo evidenciado por Coutinho (2006), naquele ano uma das preocupações regionais girava em torno da substituição dos blocos cerâmicos pelos famosos “*drywalls*”. Receio esse, que deixa claro como a evolução da tecnologia move a adoção de novas regras e leis. Desse modo, se o diferencial entre o bloco cerâmico e outros sistemas construtivos de vedação é apenas seu preço competitivo, quem espera sobreviver no mercado deve investir em quesitos como qualidade, atendimento às normas, redução de impactos ao meio ambiente e eficiência da mão de obra.

Todas essas constatações, por si só, justificam o estudo e investimento no tema em questão. Elas apontam para a falta de soluções que permitam ao setor acompanhar a evolução

competitiva do mercado. Alguns sub-tópicos do estudo são: economia de combustível, economia de tempo de queima, redução da utilização de matéria-prima, redução de emissão de gases poluentes, redução da mão de obra, redução do custo do produto final e aumento da produtividade. A economia em uma etapa do processo permite o investimento nas demais, até que a melhoria tenha ocorrido no processo como um todo e de forma gradual. Em adicional à justificativa, no capítulo 3 (Seção 3.2.1 – Revisão de Literatura) desta pesquisa fica demonstrada metodologicamente a carência literária de publicações que abordem especificamente os objetivos assumidos no presente estudo. O que tecnicamente confirma a relevância do trabalho de forma geral.

1.3 Estrutura da Pesquisa

A presente pesquisa foi baseada em uma revisão bibliográfica com o objetivo de aprofundar o nível do conhecimento no cenário cerâmico e do conhecimento técnico necessário para desenvolvimento do sistema proposto. Para tal, foi estruturada uma revisão sistemática para análise de artigos científicos relacionados às intercessões dos temas. Uma vez consolidado o conhecimento teórico e definida a problemática, deu-se início ao desenvolvimento lógico do sistema e sua simulação na prática. Com foco na análise gráfica e no cálculo da eficiência térmica, os resultados foram dispostos e discutidos, bem como o custo de implementação dos resultados e os benefícios à sociedade. A estrutura ficou definida como:

- Introdução;
- Revisão Bibliográfica;
- Materiais e Métodos;
- Resultados;
- Conclusão;
- Referência Bibliográfica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta Seção, foram abordados os conceitos teóricos de suporte ao entendimento da problemática assumida neste projeto. Foi realizada uma pesquisa sistemática, fundamentada em trabalhos, pesquisas científicas e livros, abordando tópicos relacionados à indústria cerâmica, processo produtivo cerâmico, etapa da queima e automação industrial. A metodologia utilizada para tal pesquisa é apresentada no capítulo seguinte.

2.1 Indústria Cerâmica

A indústria cerâmica ficou caracterizada pela produção de artefatos a partir da argila. Nessa produção, a peça moldada passa pelo processo de queima, onde é submetida à altas temperaturas. Por meio desse processo, o material ganha características especiais como rigidez e resistência, de acordo com a fusão de determinados componentes em sua massa. A preparação da massa para produção do material cerâmico geralmente é feita por meio da junção de duas ou mais matérias-primas, em sua maioria uma metálica e uma não metálica, atribuindo características inorgânicas e não metálicas ao composto (Callister, 2002). Mesmo no caso da cerâmica vermelha, onde se utiliza apenas a argila como matéria-prima, é muito comum que dois ou mais tipos de argila sejam misturados em sua composição. Essa massa deve ser preparada de acordo com o tipo de técnica utilizada para dar forma às peças.

O setor cerâmico é muito amplo, sendo assim, ele é dividido em diversos segmentos em função de fatores como matérias-primas, propriedades materiais e áreas de utilização. A seguinte classificação pode ser adotada: cerâmica vermelha ou estrutural, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, louças e porcelanas de mesa, isoladores elétricos de porcelana, cerâmica artística, filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica, isolantes térmicos, cal e cimento (ABCERAM, 2018). Dentre essas classificações, a cerâmica vermelha é o objeto de estudo devido ao destaque estatístico já mencionado e sua importância para o cenário regional.

2.1.1 Cerâmica Vermelha

A cerâmica vermelha compreende os materiais empregados na construção civil e alguns de uso doméstico e afins. Esses materiais possuem coloração predominantemente avermelhada devido à presença de compostos ferrosos que desenvolvem essa característica ao produto final (SEBRAE, 2015). Esses compostos estão presentes na massa utilizada para produção das suas peças. Nessa massa são agregados mais de um tipo de argila, variando basicamente dentre três tipos: argila residual, argila sedimentar e argila digenética. A argila

residual é aquela que permanece na zona de intemperismo, também conhecida como argila de inundação. A argila sedimentar é aquela que se desloca da zona de intemperismo para a zona de acúmulo. A argila digenética é aquela alterada química e mineralogicamente, após soterramento. Essa mistura de tipos de argila, busca produzir uma argila com duas características essenciais: plasticidade e fusibilidade (SEBRAE & ESPM, 2008). Características essas, que influenciam diretamente na qualidade do produto final, propiciando trabalhabilidade e resistência mecânica durante a etapa de queima (BNB, 2010).

2.1.2 Polo Ceramista Brasileiro

A tradição ceramista brasileira não advém dos portugueses e nem dos africanos. Durante a colonização, o processo nativo foi apenas aprimorado com a tecnologia da época. As primeiras olarias estruturaram e concentraram a mão de obra, trazendo aspectos mais refinados às peças que já eram produzidas (SEBRAE & ESPM, 2008). Comparado à países como Espanha, Itália e China, o Brasil é apontado como um grande produtor mundial de produtos cerâmicos (BNB, 2010). Fatores como abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e tecnologias nos equipamentos industriais viabilizaram a evolução rápida da indústria em nível de qualidade mundial (ABCERAM, 2002). Atualmente, existe forte demanda por produtos de cerâmica vermelha destinados à projetos de estilos rústicos e mais naturais, permitindo à indústria cerâmica brasileira despontar como uma das mais criativas do mundo.

As empresas brasileiras que produzem cerâmica vermelha estão distribuídas por todo o país, operando em diferentes níveis de tecnologia, em regiões com maior disponibilidade de matérias-primas e maior contato com os consumidores. As duas principais associações do setor cerâmico, Associação Nacional da Indústria Cerâmica [ANICER] e ABCERAM, apresentam dados estatísticos que divergem quanto ao número de empresas, empregos gerados e faturamento do meio. Isso acontece devido à alta informalidade existente na cadeia de construção civil, impactando no levantamento de dados do setor (ABDI, 2016). Segundo dados da ANICER (2018), o setor possui cerca de 6.903 empresas, gera R\$18 bilhões de faturamento anual, representa 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil, 4.8% da indústria da construção civil, gera em média 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos. Vale ressaltar que a própria ABCERAM aponta a ANICER como a fonte adequada para tais informações referentes ao setor. Esse faturamento representa cerca de 1% do Produto Interno Bruto [PIB] brasileiro, sendo que aproximadamente 40% dessa participação representa o ramo

de cerâmica vermelha, evidenciando a importância do setor para a economia nacional (SEBRAE, 2012).

Tratando mais detalhadamente sobre a questão da distribuição das empresas cerâmicas pelo território brasileiro, as regiões que mais se destacaram e se desenvolveram no país foram Sul e Sudeste. Porém, no Nordeste, a construção civil tem mostrado desenvolvimento impulsionado pela indústria e pelo turismo (Vieira, 2009). O estado do Rio Grande do Norte, por exemplo, conta com mais de 200 cerâmicas vermelhas, predominantemente entre os polos do vale do Assu, da Grande Natal e do Seridó. A demanda por edificações e instalações industriais cresce e conseqüentemente, a demanda por materiais cerâmicos também cresce. A produção cerâmica dessa região tem apresentado crescimento constante (Silva, 2008).

Quanto ao consumo de matérias-primas, a produção de cerâmica no país consome cerca de 170 milhões de toneladas de argila por ano, dos quais aproximadamente 70 milhões de toneladas são destinadas à cerâmica vermelha (MME, 2017). Apesar da importância econômica e social dessa produção, ambos os processos de extração e processamento desses recursos não são devidamente estudados, não sendo possível encontrar dados técnico-científicos que otimizem sua aplicação e evite desperdícios (Menezes, Neves, & Ferreira, 2001). A competitividade do mundo globalizado afeta os setores da economia de maneira geral. Os requisitos de mercado vão se aprimorando e exigindo mais qualidade em relação ao produto final. Sendo assim por questões de sobrevivência no mercado, o segmento deve adequar seus produtos às normas e exigências técnicas, minimizando desperdícios e reduzindo o custo de produção (Coelho, 2009).

2.1.3 Polo Ceramista Regional

O município de Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro, região Sudeste do Brasil, sedia um dos principais polos de produção cerâmica do país. Com uma área de aproximadamente 4.037 km², Campos possui cerca de 406.989 habitantes e é o maior município do estado. Os destaques da economia na região atualmente são as indústrias açucareiras e as cerâmicas. A área de concentração das cerâmicas fica à margem direita do Rio Paraíba do Sul, ao longo da RJ-216 que liga Campos ao litoral de Farol de São Tomé. Fatores como a demanda ascendente dos produtos de cerâmica vermelha, a grande disponibilidade de materiais de qualidade e sua facilidade de extração e transporte, justificam o investimento realizado para que Campos pudesse ser o grande segmento cerâmico que é

hoje. Os resultados já alcançados e os parâmetros sócio-econômicos da atividade cerâmica da cidade a credenciam como estratégica para o desenvolvimento regional (RCC, 2018).

O polo ceramista de Campos é o maior produtor de blocos de vedação do Brasil e o segundo maior produtor de tijolos. Seus principais consumidores são das cidades do Grande Rio, Sul Fluminense, Zona da Mata Mineira e Espírito Santo (Ramos, Alves & Alexandre, 2006). Diariamente, cerca de 400 caminhões carregados de mercadoria deixam o município. Segundo informações do sindicato dos ceramistas de Campos, com a falência de três das cinco usinas de açúcar da baixada campista, as cerâmicas passaram a ser as grandes empregadoras da região (Ramos, Alves & Alexandre, 2006). Segundo a Rede Campos Cerâmica [RCC] (2018), existem cerca de 116 cerâmicas sindicalizadas em Campos, com capacidade de 96 milhões de tijolos por mês. No entanto, atualmente são produzidos 50 milhões de tijolos mensalmente, gerando uma renda de aproximadamente 11 milhões de reais mensais. O setor emprega cerca de 2.000 funcionários.

A RCC é uma rede de indústrias cerâmicas criada em Campos, com o intuito de estabelecer cooperação entre as empresas da região, visando a melhoria de seus processos por meio do compartilhamento de informações e as inter-relações de compras e vendas. Essa colaboração conjunta prevê um diferencial quanto ao controle de qualidade. A rede possui o Laboratório de Ensaios Tecnológicos em Cerâmica Vermelha [LABCERV] e dessa forma atua como agente propagador da conformidade e garante a aplicação de medidas de segurança aos seus funcionários. Apenas 16 fábricas estão ligadas à RCC. Ela possui parceria com a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente [FEEMA], um órgão expedidor de recomendações responsável pelo controle do meio ambiente no interior do estado. O polo ceramista de Campos é único parceiro da FEEMA com licença ambiental, ele também tem parceria com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis [IBAMA], com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas [SEBRAE], com a Prefeitura de Campos e o Governo do Estado (RCC, 2018).

A produção do polo é voltada para os blocos de vedação, onde se constata histórico de inovação, variando-se as tonalidades das cores das peças fabricadas e aumentando-se a resistência mecânica. Devido ao diferencial, seus blocos de vedação possuem tarifa diferenciada de 30% do preço de mercado e custo mais baixo devido à produção em grande escala. Esse cenário de vantagens ocorre devido às características geológicas da região que lhe fornecem matérias-primas de qualidade para a produção desses blocos. O que não é válido para a produção de pisos, por exemplo. Outra característica importante da região está na

cultura de subsistência. Para suportar a grande demanda de queima, a região planta em torno de 1.000 pés de eucalipto por mês, o que contribui para a reposição do recurso ambiental e para a redução de gastos com compra de lenha. Outra importante ação que contribui para minimizar o impacto ambiental é o reaproveitamento dos insumos nocivos ao meio ambiente, que são gerados durante o processo de produção cerâmico. Empresas como a Companhia Paduana de Papéis [COPAPA] utilizam insumos como a celulose, para suas necessidades (Ribeiro, 2008).

Contudo, o processo produtivo das cerâmicas na região ainda é muito artesanal onde poucos detêm tecnologia mais avançada. O principal combustível utilizado ainda é a lenha, o processo de secagem ocorre ao ar livre e existe pouco controle na queima do produto. Existe uma disparidade tecnológica acentuada na indústria cerâmica campista, onde a grande maioria faz uso de sistemas rudimentares, ao passo que as grandes cerâmicas possuem processos produtivos mais avançados (Ramos, Alves & Alexandre, 2006). Os últimos anos têm sido marcados pela competitividade e constante ameaça às pequenas empresas por parte dos grandes produtores. Dessa forma, prevê-se uma reestruturação gradativa dos processos produtivos cerâmicos, à medida que as empresas direcionam sua atenção ao controle das etapas de fabricação como: seleção e preparo de matérias-primas, processos de conformação, prensagem, queima, entre outros.

2.2 Processo Produtivo Cerâmico

O processo produtivo da cerâmica vermelha organiza-se basicamente nas seguintes etapas:

- Pesquisa da jazida (área a ser explorada);
- Extração da matéria-prima;
- Sazonamento;
- Preparação da massa;
- Conformação das peças;
- Secagem;
- Queima;
- Classificação dos produtos;
- Expedição.

Uma vez determinada a viabilidade da área a ser explorada, o processo de exploração da matéria-prima é iniciado. O processo de extração a céu aberto consiste na remoção de toda camada de solo arável, até que se encontre as camadas de argila. Alguns equipamentos mais utilizados nesse processo são: retro-escavadeiras, pás carregadeiras, tratores de esteiras e caçambas; no caso de materiais mais duros faz-se uso de dinamite para fragmentação dos mesmos (Coelho, 2009).

A etapa seguinte é chamada de sazonalidade, onde a matéria-prima é estocada por um período mínimo de 6 meses. Os principais objetivos dessa etapa são o aumento da plasticidade das argilas, a lavagem dos sais solúveis e a decomposição da matéria orgânica.

Consequente, parte-se para o processo de preparação da massa cerâmica. Como já mencionado, essa preparação é comumente feita através da composição de mais de um tipo de matéria-prima, além de aditivos e água ou outro meio. Essa etapa é de suma importância para o processo de fabricação dos produtos cerâmicos, nela é fundamental que a dosagem siga as formulações previamente estabelecidas. As massas podem ser do tipo: suspensão, massa seca ou semi-seca e massa plástica. A preparação da massa é feita com base na técnica de conformação que será empregue em seguida. Alguns equipamentos mais utilizados nessa etapa são: moinho, caixão alimentador, destorroador e/ou desintegrador, misturador e laminador. Após o preparo, o descanso da massa argilosa por pelo menos dois dias é importante para promover a uniformidade da umidade na massa (SEBRAE & ESPM, 2008).

Para a conformação, os métodos mais utilizados são extrusão e prensagem. A extrusora ou maromba compacta a massa plástica e a comprime através de um bocal com formato determinado. Desse bocal, sai uma coluna extrudada de formato desejado, a qual é cortada, resultando nas peças conhecidas como tijolos, elementos vazados, telhas, tubos, etc. Em alguns casos, após obtenção da coluna extrudada, a massa pode ser prensada para adquirir forma específica (Coelho, 2009).

A extrusão só é possível caso a massa se encontre em seu estado plástico, isso significa dizer que existe certo percentual de umidade. De maneira geral, assume-se a umidade de conformação como sendo em torno de 21%. Sendo assim, é necessário que a peça extrudada passe pelo processo de secagem para retirada da conhecida “água de conformação”. Essa secagem finda evaporar a umidade das peças para teores menores do que 3%. A diminuição da umidade do produto deve ocorrer de forma lenta e uniforme à toda massa cerâmica. Caso contrário, ocorrem defeitos como empenamento e trincas, que na maioria dos

casos só são verificados após a queima. Somente após a secagem que as peças podem seguir para a etapa da queima sem sofrer os danos que a umidade causaria (SEBRAE & ESPM, 2008).

Uma das últimas etapas do processo é a queima. Nela as peças conformadas e secas são expostas a uma dada temperatura a fim de obter as características técnicas desejadas (Tubino & Borba, 2006). Essa etapa coloca em risco tudo o que foi realizado anteriormente e envolve uma série de fatores que a influenciam diretamente. Sendo assim, é fundamental conhecer um pouco mais a fundo as transformações que acontecem com a matéria-prima durante a queima, controlar esse processo e os insumos consumidos por ele. Tudo isso só é possível mediante monitoramento das temperaturas internas do forno, do tempo e do volume e qualidade do combustível utilizado (RCC, 2018).

2.3 Etapa da Queima

A queima é vista como a etapa mais importante, cara e delicada de todo o processo de produção cerâmico, tendo em vista que trabalha com energia. Tão importante, na grande maioria dos casos, os problemas estruturais e estéticos provenientes de ações realizadas em procedimentos anteriores só aparecem após esta etapa. Nada melhor para justificar o cuidado extra e controle minucioso necessário à esta fase do processo (Tubino & Borba, 2006). Um dos fatores que mais chama atenção é sem dúvidas o custo energético, é na queima que se consome mais energia e onde conseqüentemente há maior despesa financeira. Na Itália, por exemplo, 20 % do custo energético do processo de produção é proveniente da queima. Já no Brasil esse custo chega aos 30%, dos quais um terço é proveniente do gasto com energia elétrica e dois terços com energia térmica. Essa diferença entre os custos de produção brasileiro e italiano se dá devido aos diferentes tipos de forno utilizados, porém a adoção de medidas para a melhoria dessa questão acaba sendo muito dispendiosa para a maioria das cerâmicas (Nasseti, 2018).

2.3.1 Fornos Cerâmicos

Dentre os tipos de fornos mais conhecidos na produção cerâmica, têm-se os fornos intermitentes: tipo caieira, tipo chama reversível, tipo plataforma ou vagão e os fornos contínuos: Hoffmann e túneis.

Nos fornos intermitentes a queima é feita de forma descontínua conforme o fluxo: carregamento, aquecimento, queima, resfriamento e descarregamento. Já nos fornos contínuos, como o próprio nome sugere, a queima é constante. Nesse tipo de forno não existe

interrupção da queima para carga e descarga de peças, operando de forma contínua e mantendo sua fonte de energia sempre acesa (SEBRAE & ESPM, 2008).

Os fornos tipo caieira são mais utilizados em pequenas olarias e são considerados como sendo de baixa eficiência energética. Atualmente esses fornos já entraram em desuso por provocar grandes perdas econômicas e impactos ambientais. Normalmente, esse tipo de forno possui seção horizontal quadrada ou retangular, com aberturas na parte inferior para entrada de combustível. Devido aos seus aspectos construtivos, os gases quentes se perdem com facilidade para o meio-ambiente, fazendo com que o consumo seja elevado, requerendo maior tempo de pré-aquecimento e resultando em queima desigual, com camadas de peças queimadas em demasia enquanto outras saem cruas (RCC, 2018).

Os fornos tipo chama reversível possuem uma câmara com abóbada fechada e crivos no piso. Esses crivos são tijolos furados que permitem a passagem dos gases em combustão da queima em direção aos dutos de tiragem que ligam o forno às chaminés. Dessa forma, os gases quentes são induzidos a um caminho reverso, realizando o processo de queima da carga de cima para baixo. Como este é o tipo de forno utilizado no presente estudo de caso, seu desenho esquemático pode ser visualizado na Figura 1 e os detalhes dos crivos em sua base na Figura 2 a seguir.

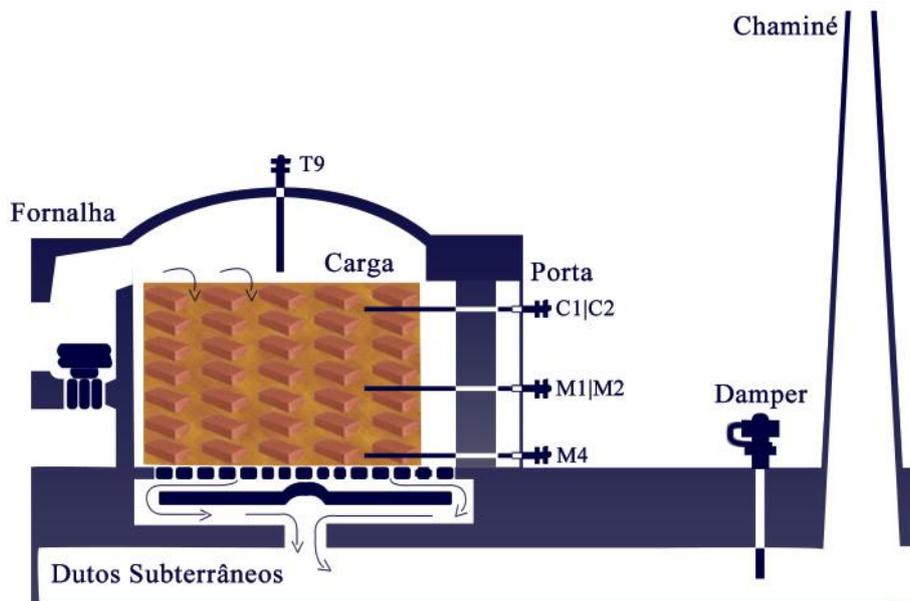


Figura 1 – Forno tipo chama reversível (desenho esquemático)

Fonte: Adaptado de Messias (1996)



Figura 2 – Aspectos construtivos do piso do forno (crivos)

Fonte: Autor (2018)

A critério de comparação o forno reversível apresenta um consumo de 1,5 m³ de lenha por milheiro de tijolo queimado, ao passo que o forno caeira consome 2 m³, explicitando a diferença entre a eficiência dos fornos. Uma técnica comumente utilizada para aumento da eficiência dos fornos reversíveis é a interligação de seus dutos de tiragem, de forma a reaproveitar os gases quentes entre eles. Assim, com ajuda de um exaustor, um forno pode ser “pré-aquecido” à medida que outro esfria liberando o calor (Tubino & Borba, 2006). Essa técnica pode ser visualizada na Figura 3.



Figura 3 – Mecanismo utilizado para aproveitamento do calor entre os fornos

Fonte: Autor (2018)

Já nos fornos plataforma ou vagão, as peças são dispostas numa plataforma com rodas sobre trilho, a qual é inserida e retirada do forno por tração mecânica. As fornalhas são instaladas nas laterais do forno, podendo ser alimentadas por lenha ou óleo.

Os fornos Hoffman são considerados como sendo de bom rendimento energético. Apesar do elevado custo para sua construção, esse tipo de forno é bastante econômico. Geralmente de formato retangular, seu interior possui galerias contínuas que se encontram em suas extremidades. O fogo é alimentado por boquetas que ficam na parte superior do forno. Nesse forno, a carga é disposta sobre o piso e o fogo é que avança em seu interior, a carga vai se pré-aquecendo pelo calor da região anterior à medida que as regiões já queimadas vão se resfriando. O aproveitamento do calor de queima é bom, garantindo o rendimento térmico. O combustível utilizado pode ser lenha, resíduos orgânicos, gás ou óleo (RCC, 2018).

Por fim, os fornos túneis apresentam melhor eficiência energética dentre todos os tipos de fornos descritos anteriormente. Esse tipo de forno opera continuamente, apresentando estabilidade quanto à queima e reaproveitamento do calor entre suas seções. O forno túnel possui três seções internas: a de aquecimento, a de queima e a de resfriamento. O ar quente da zona de resfriamento é reaproveitado na zona de queima como ar de combustão e os gases de combustão da zona de queima reaproveitados na zona de aquecimento (SEBRAE & ESPM, 2008).

A construção de um forno cerâmico exige conhecimentos técnicos especializados, caso contrário o mesmo apresentará várias inconformidades que impactaram diretamente nas características do produto final produzido. A escolha pelo tipo de forno ideal depende do tipo de produto a ser produzido, cenário econômico e tamanho da indústria. Para empresas com produção entre 20 e 30 milheiros de tijolos por dia, por exemplo, os fornos intermitentes são eficientes mediante investimento mais baixo para sua construção. Já para empresas com maiores demandas, o investimento em fornos de produção contínua é mais indicado (RCC, 2018).

2.3.2 Alimentação

O alto custo da etapa da queima se dá devido aos gastos para alimentação da fonte térmica. A queima cerâmica requer grande quantidade de energia, o que ocasiona o alto consumo de combustível. Dentre os combustíveis mais utilizados, destacam-se o óleo, o querosene, o gás natural, o pó de serra, o carvão e a lenha; sendo a lenha o combustível mais acessível no cenário brasileiro. Para utilização dos recursos, os produtores também têm que

enfrentar problemas como escassez e obrigatoriedades legais relacionadas ao equilíbrio ecológico e consequente diminuição do impacto gerado pela exploração vegetal. Na verdade, independente da fonte energética, a questão da alimentação é muito onerosa e representa o mais alto de todos os custos do processo de produção cerâmico (Silva, 2011).

2.3.3 Processo de Queima

O processo de queima causa variações físico-químicas e mecânicas nas peças cerâmicas, de acordo com a matéria-prima que foi utilizada. As variações físico-químicas compreendem mudanças estruturais como porosidade, cor, tamanho, aumento de resistência à umidade, etc. Já as variações mecânicas são expressas pelo aumento da resistência à compressão, à tração, à abrasão, etc. Por conta dessas variações, ocorrem algumas mudanças nas propriedades do material, como: desidratação, calcinação, oxidação, formação de silicatos e sintetização, dentre outras.

A calcinação é uma reação que provoca a perda de massa em forma de gases, alterando a estrutura e a composição da peça cerâmica. A oxidação nada mais é que a ligação de elementos químicos presentes na peça, com o oxigênio presente no ambiente do forno. Em resumo, a sintetização é o fenômeno responsável pela união das partículas da cerâmica pela difusão atômica para contornos de grãos, da coalescência e formação de vidro. A difusão ocorre quando os átomos se transportam para os contornos de grãos, colando os grãos uns nos outros e reduzindo a porosidade. A coalescência ocorre quando os grãos maiores absorvem os menores. A fase vítrea também atua na união dos grãos e redução da porosidade ao preencher vazios (Tubino & Borba, 2006).

Para garantir qualidade associada ao produto final, cada fase da etapa da queima deve ser monitorada segundo suas características de temperatura e tempo conhecidas. Basicamente, as fases da queima são: o pré-aquecimento, o aquecimento, o patamar e o resfriamento.

No pré-aquecimento, o material enfiado ainda contém certa quantidade de água. Por conta disso, esse aquecimento deve ser gradual, de forma a garantir que as peças não trinquem ou fissurem devido às contrações diferenciais e pressões internas provocadas pela expulsão abrupta da umidade. A fase do pré-aquecimento pode durar de 8 a 13 horas, dependendo de fatores como o tipo da matéria-prima utilizada, a eficiência da secagem e o modelo do forno utilizado (Silva, 2011).

A fase do aquecimento se inicia por volta de 100°C, atingindo temperaturas de até 1000°C em cerâmicas vermelhas. Após atingir 800°C, as peças adquirem maior resistência, podendo ser submetidas à aumentos de temperatura mais rápidos.

O patamar representa a fase onde a temperatura atingiu seu valor máximo, conhecida como o patamar da curva de queima, essa etapa apresenta temperatura ideal para a sintetização. Essa temperatura deve ser mantida por um tempo. No meio cerâmico foi convencionalizado o patamar a 950°C, dependendo da matéria-prima adotada. O patamar é de fundamental importância para reduzir os gradientes térmicos no interior do forno, garantindo que o calor penetre na cerâmica, aumentando a quantidade de material sintetizado, diminuindo o número de poros entre as partículas, tornando o material impermeável e resistente (SEBRAE & ESPM, 2008).

O resfriamento é feito de forma gradual (natural ou controlada) através das aberturas do forno, chaminé e reaproveitamento do calor para secagem e outras etapas. Entre 600°C e 350°C, o processo normalmente deve ser gradual de forma a garantir que as peças não trinquem ou fissurem. O processo de resfriamento pode durar de 38 a 50 horas (RCC, 2018).

Toda produção pode ser perdida, dependendo das condições sob as quais ocorreu o processo de queima. Os aspectos principais que podem conferir características indesejadas às peças cerâmicas são basicamente: falta de controle no processo de alimentação da queima e má administração dos recursos estruturais do forno, gerando variações abruptas de temperatura, não atingindo os valores desejados, resultando em um fluxo de calor instável e má distribuição dos gases provenientes da queima. Não só a qualidade estrutural do produto é importante, mas também seus aspectos estéticos, tendo em vista que muitos deles são utilizados para revestimento de paredes, pisos, churrasqueiras, etc. Levando em consideração o tijolo maciço por exemplo, o ideal é que ele apresente homogeneidade na sua estrutura e em seus aspectos visuais. No entanto, esses tijolos podem apresentar diferentes colorações em um mesmo lote, manchas escuras quando em contato direto com o fogo e manchas rosadas quanto mal sinterizado. A Figura 4(a) demonstra o aspecto do produto final quando devidamente queimado, já a Figura 4(b) demonstra um lote que passou por problemas quanto à sua sinterização.



Figura 4 – Amostragem do produto final

Fonte: Autor (2018)

2.4 Modelagem Matemática

A modelagem matemática tem o objetivo de fornecer a descrição matemática de um dado fenômeno real. Dessa análise, obtém-se como resultado o modelo matemático por meio de equações que descrevem o comportamento em estudo. Esse recurso é utilizado desde muito tempo, com a finalidade de procurar padrões e resolver problemas cotidianos conforme necessidade. Alguns exemplos clássicos da utilização da modelagem são: a invenção da roda pelos Sumérios (3000 A.C.), o modelo para cálculo da circunferência da Terra criado por Eratóstenes (196 A.C.) e os modelos que descrevem a queda dos corpos, os movimentos parabólicos de projéteis criados por Galileu Galilei (1642) e o cálculo diferencial de Newton. Fica evidente que o processo de modelagem é interdisciplinar, pois utiliza dados de outras áreas como pontos de partida (Costa, 2009).

Com o objetivo de compreender melhor o processo de queima no forno em questão, torna-se importante a descrição de um modelo matemático que relacione a temperatura com a umidade, fatores diretamente envolvidos à queima do material constituinte da carga exposta no interior do forno. Para descrever esse comportamento, alguns conceitos físicos são fundamentais. Para dedução da equação diferencial que demonstra o comportamento do forno quanto à **temperatura**, foi considerada a lei de Fourier, descrita pela Equação (1) a seguir (Incropera; DE WITT, 2017):

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \dot{q}, \quad (1)$$

onde k representa a condutividade térmica; ρ a densidade; C_p o calor específico do sólido e \dot{q} a geração de energia interna. Veja que isso é aplicado à sólidos, mas vale também para líquido e gases. Se as propriedades ρ e C_p são constantes, esta mesma equação pode ser descrita conforme a Equação (2) abaixo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla}(\alpha \vec{\nabla} T), \quad (2)$$

onde α representa a difusividade térmica e é descrita pela Equação (3):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}. \quad (3)$$

Já para a dedução da equação diferencial que demonstra o comportamento do forno quanto à **umidade**, foi considerada a lei de Fick (transporte de massa) que relaciona o gradiente de umidade no interior do sólido com a taxa de secagem. Essa relação é descrita pela Equação (4) a seguir (Treybal; McGraw, 2001):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \vec{\nabla}(D \vec{\nabla} U) + U'', \quad (4)$$

onde D é o coeficiente de difusão de massa e U'' a massa gerada.

2.5 Equilíbrio Termodinâmico e Temperatura

A definição de temperatura para a Física está intimamente relacionada ao conceito do equilíbrio térmico. Assim como pode ser constatado na natureza, qualquer sistema fechado tende ao equilíbrio. Para que esse equilíbrio termodinâmico seja estabelecido, algumas condições devem ser satisfeitas (Savi; Colucci, 2010):

- O sistema deve estar livre de ações de forças externas e em equilíbrio mecânico;
- O sistema deve estar livre de reações químicas e em equilíbrio químico;
- O sistema deve possuir propriedades mensuráveis espacialmente uniformes e sem variações no tempo.

Segundo as leis da termodinâmica, sabe-se que o calor flui espontaneamente de um corpo quente para um corpo frio, trabalho feito pelo sistema. Em alguns casos, essa troca ocorre de maneira inversa (de um corpo frio para um corpo quente), mas para isso é necessária a realização de trabalho feito sobre o sistema (Welty; Wicks; Rorrer; Wilson, 2014). A Figura 5 demonstra de maneira mais intuitiva o conceito de equilíbrio termodinâmico baseado na agitação térmica.

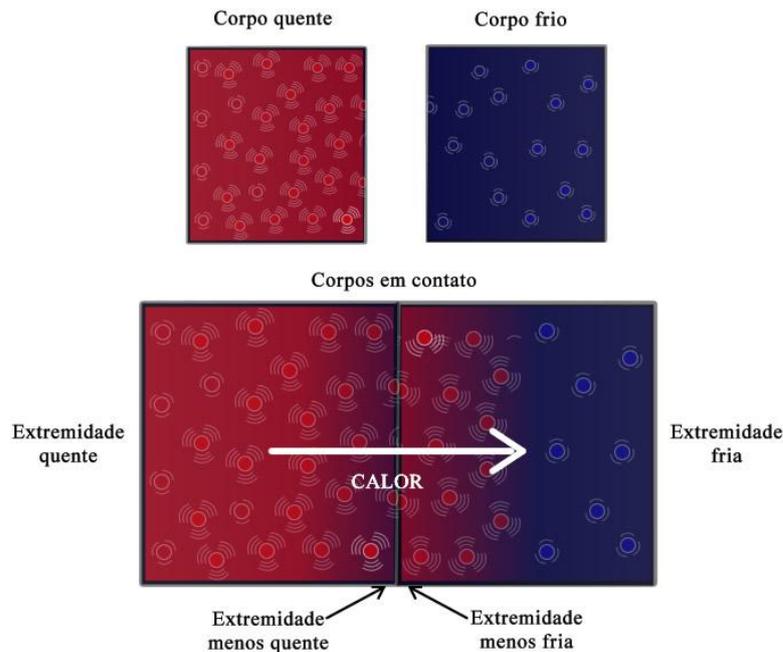


Figura 5 – Agitação térmica

Fonte: Autor (2018)

As moléculas do corpo com temperatura mais elevada se encontram em maior agitação. Dessa forma, ocorre a troca de calor entre os dois corpos por condução térmica. Levando em consideração o cenário em estudo, a troca de calor no interior do forno ocorre tanto por condução quanto por convecção. Sabe-se que no tocante à convecção, o fluido aquecido tende a subir, enquanto seu oposto tende a descer até que todo o meio esteja em equilíbrio térmico. No entanto, como no caso do presente forno a fonte de calor se encontra na parte superior e a única saída de ar fica na parte inferior, os gases provenientes da queima são forçados a desempenhar um fluxo invertido quanto ao sentido. A transmissão de calor por meio da convecção ocorre em função da movimentação desses gases. Levando todos esses conceitos em consideração, para que ocorra um fluxo de calor no interior da abóbada, a diferença de potencial térmico entre os níveis da carga deve ser garantida. Quanto maior essa

diferença de temperatura entre os níveis, maior a intensidade desse fluxo de calor (Welty *et al*, 2014).

O maior problema é que essa discrepância entre as temperaturas aferidas nas primeiras e nas últimas camadas de carga acarreta os maus resultados na etapa da queima. Sendo assim, definir a temperatura padrão em cada nível de aferição se torna extremamente necessário, bem como garantir que a temperatura não seja semelhante em todos os níveis de aferição (o que reduziria a intensidade do fluxo de calor de uma forma prejudicial ao processo). A Figura 6 ilustra o ambiente em estudo nas condições de fluxo de calor intenso e ameno de acordo com a diferença de temperatura entre os níveis de aferição e a agitação molecular.

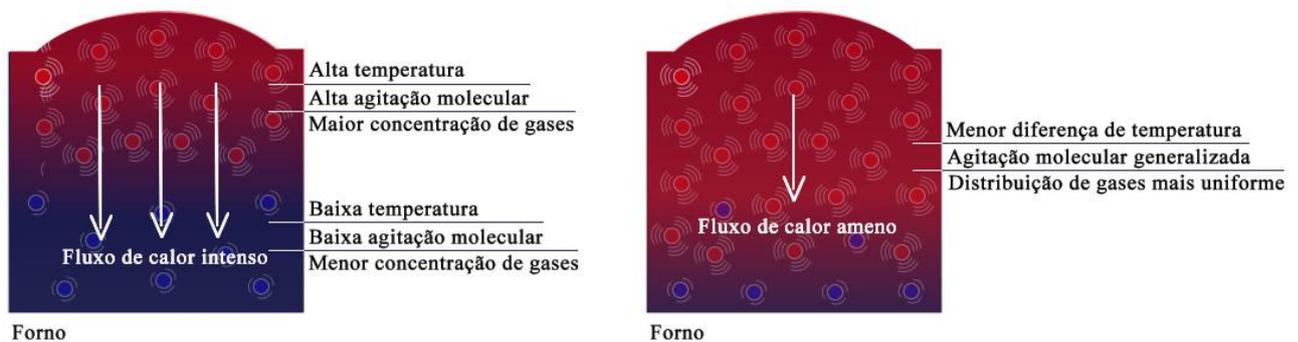


Figura 6 – Fluxo de calor (intensidade)

Fonte: Autor (2018)

2.6 Propriedades dos Materiais em Estudo

Na maioria dos casos, a mistura preparada para produção das peças cerâmicas conta com mais de um tipo de argila, com a finalidade de suprir as exigências técnicas definidas por lei. Uma caracterização química e mineralógica sobre 4 tipos de argila realizada por Reis, Della-Sagrillo e Valenzuela-Diaz (2016) demonstrou que, de forma geral, a mistura cerâmica é caulinítica, apresenta alta plasticidade, porém alta porosidade. Na região sudeste brasileira, o mineral predominante nos diferentes tipos de argila é a caulinita. A presença de caulinita pode ocasionar elevada porosidade nas peças após a queima, o que chama atenção para a importância de a etapa da queima ser controlada. O material analisado também apresentou alto teor de quartzo e de ferro. Sabe-se que o óxido de ferro (Fe_2O_3) é que confere às peças cerâmicas o aspecto avermelhado após a queima. A massa cerâmica é constituída essencialmente de sílica e alumina, o que a conferem caráter refratário.

O estudo supracitado mostra ainda que durante os testes efetuados, o primeiro pico endotérmico ocorreu próximo a 100 °C, mostrando a característica da perda de água livre existente entre as partículas. O segundo pico endotérmico ocorreu por volta de 260 °C,

evidenciando a fase de combustão da matéria orgânica e perda de água dos hidróxidos (gibbsite e goetite). Ficou registrado também que o pico endotérmico de maior intensidade ocorreu por volta de 500 °C, o que é característico da perda de hidroxilas dos argilominerais do grupo da caulinita (momento de maior perda de massa). Para temperaturas acima de 500 °C o material apresenta ausência de água e começa a formar a metacaulinita que é amorfa e metaestável. Ou seja, ao se elevar a temperatura acima desses patamares, o composto material começa a assumir características que impactam sobremaneira a qualidade técnica final do produto, tendendo à fase vítrea (altas probabilidades de deformações). Normalmente a fase vítrea é constatada em temperaturas em torno dos 900 °C, patamar onde a queima precisa ser muito bem controlada (Reis *et al*, 2016). A Figura 7 mostra os picos endotérmicos relacionados ao comportamento da Caulinita, presente no material cerâmico, à medida que a temperatura do forno vai aumentando.

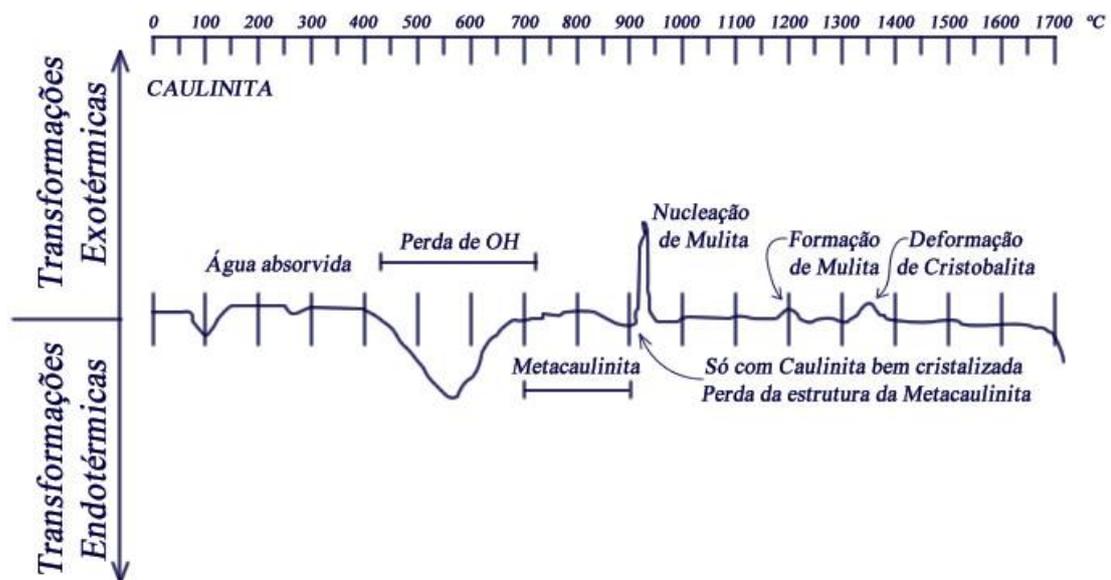


Figura 7 – Comportamento da Caulinita

Fonte: Adaptado de Santos (1989)

As análises quanto às propriedades físico-químicas da massa cerâmica deixam ainda mais claro que o processo de queima precisa de uma atenção especial. Durante todas as etapas da queima, existem peculiaridades quanto às propriedades da massa cerâmica que devem ser respeitadas. Um processo de queima considerado como ideal, contempla a fase de aquecimento com um controle gradativo de ascensão da temperatura, a fase de patamar com temperaturas mantidas estáveis e a fase do resfriamento com declínio de temperatura ocorrendo de forma natural ou mediante controle gradativo. Todas essas questões devem ser

avaliadas para que se evitem avarias que impactem negativamente o valor agregado ao produto final (Kokot, 1998; Messias, 1996).

2.7 Automação Industrial

Desde meados do século XVIII, o homem já caminhava no campo da automação industrial como aperfeiçoamento dos processos de produção. Aos poucos foram produzidos os primeiros dispositivos simples e semi-automáticos, porém, foi no século XX que o desenvolvimento da área foi alavancado. Nessa época, com o surgimento dos relés eletromecânicos que posteriormente foram substituídos pelos Controladores Lógicos Programáveis [CLP], o termo automação foi se popularizando e representava a movimentação automática dos materiais.

Até 1960, as empresas automobilísticas possuíam linha de produção fixa, produzindo com eficiência modelos pré-programáveis. No entanto, quando era necessário produzir com algumas variações no modelo, o circuito de controle precisava ser todo alterado. Diante da necessidade de flexibilidade na produção, a GM (General Motors) percebeu a necessidade da criação de um dispositivo capaz de proporcionar versatilidade à produção. Dessa maneira, surgiu o primeiro CLP, desenvolvido pela empresa *Allen-Bradley*, revolucionando a indústria nos anos seguintes (Hayden, Assante, Conway, 2014).

Observando ao redor, percebe-se que a automação é intimamente ligada ao dia-a-dia, em despertadores, semáforos, iluminação pública, etc. Essas facilidades se tornaram possíveis devido ao surgimento de dispositivos como controladores, temporizadores, relés e sensores.

2.7.1 Conceito de Automação

Segundo Hayden (20014), a automação é a aplicação de técnicas computadorizadas ou mecânicas para diminuir o uso de mão-de-obra em qualquer processo. A automação diminui os custos e aumenta a velocidade da produção. Seu principal objetivo é criar mecanismos capazes de produzir o melhor produto com o melhor custo, melhorando a produtividade, as condições de trabalho, possibilitando operações antes inviáveis e simplificando as mesmas.

2.7.2 Instrumentos de Controle

O controle de um processo é realizado através da utilização de instrumentos de medição, atuação, comunicação e controle, onde existem vários tipos de equipamentos que podem ser utilizados para cada um. Sendo assim, em cada processo é identificada a necessidade de uma forma de controle em particular e dos elementos para sua execução.

2.7.2.1 Sensores

Sensor é o termo utilizado para indicar os dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente realizando a associação das informações sobre uma grandeza que necessita ser medida, como a temperatura, por exemplo. Também são conhecidos como transdutores, quando modificam variáveis físicas em variáveis convenientes como as elétricas, que são a tensão e a corrente. Sendo assim, em muitos casos os termos transdutor e sensor acabam se misturando, podendo considerar o transdutor como um instrumento completo, envolvendo os circuitos de interface para aplicação industrial e o sensor (Morales & Castrucci, 2007).

Os sensores podem ser classificados como digitais ou analógicos. Os Sensores digitais são definidos por Thomazini e Albuquerque (2005), como sensores que assumem apenas dois valores no sinal de saída, 0 ou 1 (saídas são binárias). Eles podem ser divididos em dois grupos: sensores de contato mecânico, que necessitam de uma força para realizar a detecção entre o sensor e a matéria e sensores de proximidade, que realizam o reconhecimento do objeto pela proximidade com o sensor (este último possuindo seis categorias: indutivo, capacitivo, ótico, ultrassônico, fotoelétrico e Efeito Hall). Já os sensores analógicos podem apresentar qualquer valor no seu sinal de saída, basta que o valor esteja dentro de uma faixa operacional, podendo variar em muitos valores de tensão (PATSKO, 2006).

Os transmissores podem ser aplicados para diversas variáveis, como o nível, pressão, temperatura e vazão, dentre outras. De forma resumida o transmissor pode ser definido como um equipamento capaz de habilitar o sinal de saída de um transdutor através de algumas adaptações no sinal, ou seja, o transmissor é constituído basicamente de um sensor, transdutor e transmissor no mesmo dispositivo (Thomazini & Albuquerque, 2005). A alimentação de um transmissor pode ser realizada a dois, quatro e três fios, sendo os dois primeiros tipos os mais utilizados. A escolha da fonte de alimentação depende diretamente de qual tipo de alimentação o transmissor utiliza, para a alimentação de dois fios a energização é de 24 Volts em corrente contínua, nas de 4 fios podem ser realizadas as alimentações com 110 / 115 / 127 / 220 / 240 Volts em corrente alternada e 24 Volts em corrente contínua (Bega *et al.*, 2011).

Além dos transmissores de temperatura que são sensores analógicos, existem outros como os termopares, que são muito utilizados no âmbito industrial devido à facilidade na instalação, no manuseio e confiabilidade. Os termopares são constituídos por dois fios de materiais diferentes e unidos em uma de suas extremidades (Moreira, 2002).

2.7.2.2 Controladores

Os controladores são instrumentos que efetuam a comparação da variável de processo com o valor de referência. Através dessa comparação é produzido um sinal de saída, com o objetivo de conservar a variável de processo em valores próximos ao valor desejado (Eletrobras, *et al.*, 2008). No âmbito industrial, o CLP é o principal equipamento que realiza o controle dessas variáveis. De forma resumida, o CLP é definido como um computador planejado para realizar operações em ambientes industriais. Suas primeiras utilizações foram em substituição aos painéis de relé que tinham a função de efetuar o controle no ambiente industrial. Atualmente é utilizado tanto para operações de grande porte quanto de pequeno porte, devido à evolução de sua tecnologia e barateamento do custo (Franchi & Camargo, 2009).

Moraes e Castrucci (2007) definem algumas características importantes de um CLP, dentre elas destaca-se sua capacidade de utilização de linguagens de alto nível, o que torna a programação mais amigável ao operador. Além disso, o CLP simplifica toda a parte de comandos elétricos de um processo, em um quadro ou em painéis, diminuindo a quantidade de fios e trazendo uma maior confiabilidade operacional ao sistema. Dessa maneira é possível alterar apenas o programa, sem a necessidade de alterações na parte elétrica.

O código de programação utilizado nos CLP's gera maior facilidade e flexibilidade quanto à realização de alterações nos programas, permitindo o armazenamento do programa na memória e possibilitando a utilização em outro dispositivo ou como backup, entre outros. Sendo assim, essa é considerada a principal vantagem da utilização do CLP's em comparação ao uso de relés para realizar o controle. Já as desvantagens estão no alto custo desses CLP's, podendo ser de difícil compreensão para eletricitistas, são sensíveis a interferências e ruídos, e necessitam de mão de obra qualificada para realizar a manutenção – o que gera custos adicionais (Franchi & Camargo, 2009).

2.7.2.3 Atuadores

Os elementos responsáveis pela modificação da variável controlada, num processo de controle industrial são os elementos finais de controle ou atuadores. Os mesmos trabalham recebendo o sinal proveniente do controlador e atuando sobre o processo para controlá-lo (Franchi & Camargo, 2009). Dentre os atuadores mais utilizados tem-se os Relés, Solenóides, Cilindros, Motores e as Válvulas de Controle.

As Válvulas de controle têm a finalidade de provocar uma obstrução na tubulação para permitir o controle, operam como uma resistência variável na tubulação do processo. É um elemento que é exposto a condições adversas de pressão, temperatura, corrosão, erosão, etc. No entanto, esses atuadores 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).

2.7.3 Sistemas de Controle em Malha Fechada

Os sistemas de automação visam o controle dos mais variados processos, eles compreendem as principais necessidades lógicas e controlam os resultados de maneira a tornar tudo mais eficiente. Esses sistemas podem ser estruturados baseados em dois tipos de formato de malha de controle: malha aberta e malha fechada. Em conjunto, devem-se conhecer as características peculiares de cada uma das técnicas de controle que podem ser utilizadas e os instrumentos aplicados à medição, controle e supervisão das variáveis controladas (Ogata, 2007).

Para que um sistema de controle seja considerado em malha fechada é necessária sua interconexão formando um ciclo. Esse processo é preciso para projetar a relação das entradas do processo com suas respectivas saídas, possibilitando que a variável do processo que influenciará no desempenho do sistema seja controlada dentro de limites estabelecidos. Ou seja, é realizada a tentativa de estabilizar a variável controlada através de correções realizadas na variável manipulada, que é outra variável do processo (Åström & Murray, 2008; Eletrobras, *et al.*, 2008). O controle em malha fechada é realizado por meio de comparação entre o valor medido da variável, através de instrumentos de medição, e o *setpoint*. Essa comparação gera um sinal de erro que será reparado pelo controlador (Ogata, 2007). A comparação da saída do sistema com a resposta esperada, utilizando um sistema para medição adicional é conhecido como retroação e objetiva conservar a relação entre duas variáveis do sistema, já pré-estabelecidas. Sendo assim, é possível identificar as aplicações de cada variável e realizar o controle através da diferença entre elas (Dorf & Bishop, 1998).

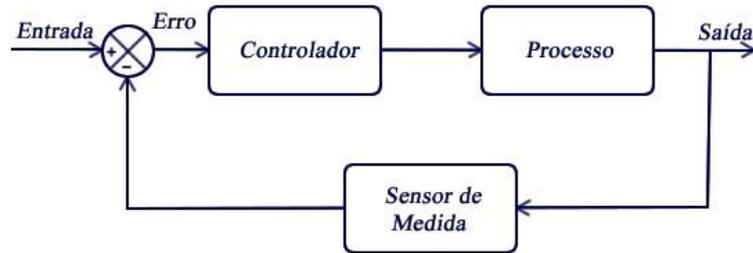


Figura 8 – Sistema de Controle em Malha Fechada

Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

2.7.4 Controle P+I+D

Para que os sistemas de controle sejam realizados é necessária a utilização de técnicas, dentre as quais, as mais conhecidas são: controle *On/Off* e controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID). Essas técnicas são utilizadas em sistemas de controle de malha fechada.

O Controle PID realiza a leitura do erro por meio de um sensor ou elemento de medição, realiza a comparação entre a variável medida e o valor desejado e através do cálculo proporcional, integral e derivativo gera uma resposta de saída. Os controladores PID são apresentados na forma de controlador autônomo ou incorporados a componentes embarcados, ou seja, são aplicados de várias formas distintas (Åström & Murray, 2008). Sua principal característica é apresentar desempenho, precisão e versatilidade favoráveis. São utilizados no controle de temperatura, pressão, nível e vazão. Os parâmetros podem ser ajustados manualmente ou por meio de técnicas de auto-sintonia, de acordo com o tipo de controle utilizado (BRISTROT *et al.*, 2015).

O controle PID através do seu parâmetro proporcional, possibilita que as oscilações no controle do processo sejam evitadas (ao contrário do controle *On/Off*) e possui a capacidade de acelerar a resposta de saída para pequenos erros. No entanto, possui a desvantagem de se distanciar um pouco do valor de referência, o chamado erro de offset.

Retirar o erro de *offset* significa manter o erro igual à zero (ou o mais próximo de zero) e acelerar a correção. Para que isso seja possível é necessário realizar uma ação de controle proporcional à integral do erro, que é chamado de controle integrador. Esse controle integrador possui a ação integral associada à ação proporcional sendo chamada de Controle Proporcional Integral [PI]. Mesmo que o controle PI consiga retirar o erro de offset, algumas desvantagens são identificadas no processo como é o caso do sobressinal gerado em decorrência da alteração do valor de referência (Åström & Murray, 2008; Eletrobras, *et al.*,

2008), outra desvantagem está no aumento excessivo do parâmetro integrador tendo como consequência a oscilação do sistema que é chamado de *reset windup* (Cruz, 2004).

O parâmetro Derivativo é capaz de antecipar o erro e permite um refinamento do controle, sendo utilizado para evitar a ocorrência de um sobressinal (*overshoot*) muito elevado, inviabilizando a estabilização do sistema quando tal característica não é aceitável (Åström & Murray, 2008). A ação derivativa é capaz de compensar o efeito de tempo morto do processo, sendo que se não forem bem sintonizados, o parâmetro pode causar grande instabilidade ao sistema. Por isso, nem sempre ele é utilizado e também não pode ser utilizado sem que haja o controle proporcional e integral. A Figura 9 mostra o comportamento de uma curva genérica, mediante ação dos diferentes parâmetros do controle PID.

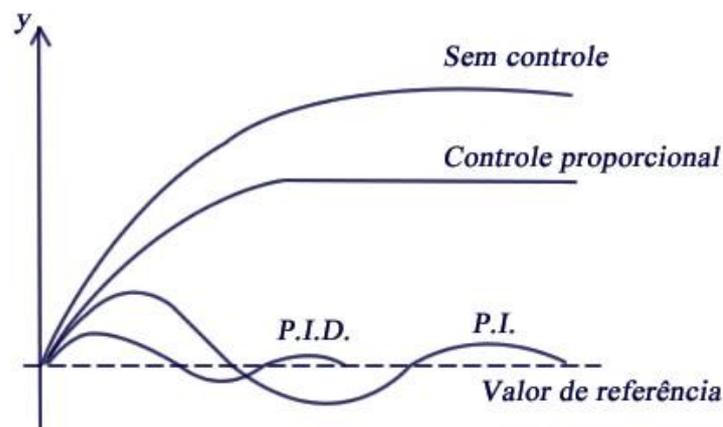


Figura 9 – Comparação entre curvas de resposta aos controles P, PI e PID

Fonte: Adaptado de Cruz (2004)

2.7.5 Comunicação SCADA

O *Supervisory Control and Data acquisition* (SCADA) é uma rede sensorial geral, com um controle de sistema acoplado sobre ela, formando assim o componente básico do controle e atuando como interface entre o sistema real e o usuário (Gao, *et al.*, 2014).

Existem vários tipos de sistemas sendo utilizados para gerenciar, controlar e monitorar qualquer tipo de planta (industrial ou não), sendo mais difundidos os Sistemas de Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA). Esse sistema é caracterizado por um processo de coleta, manipulação, análise e armazenamento de informações. Essas informações são provenientes do controle do CLP, podendo os softwares supervisórios gerenciar processos de qualquer tamanho ou natureza. Estes auxiliam no processo de implantação da qualidade e de

movimentação de informações para gerenciamento e diretrizes. Desta forma, a escolha do software de supervisão é muito importante na estratégia de automação de uma empresa.

Segundo Boyer (1993), um sistema SCADA permite a um operador, em uma localização central, controlar um processo distribuído em lugares distantes. Esses processos normalmente envolvem a manipulação de óleo ou gás natural, sistemas de saneamento ou complexos hidroelétricos, alcançar *setpoints* ou controlar processos distantes, abrir ou fechar válvulas / chaves, monitorar alarmes, armazenar informações de processo, etc. A Figura 10 mostra a arquitetura básica de comunicação de um sistema SCADA, onde interagem Interface Homem-Máquina [IHM], *Main Terminal Unit* / Terminal Principal [MTU] e *Remote Terminal Unit* / Terminal Remoto [RTU].

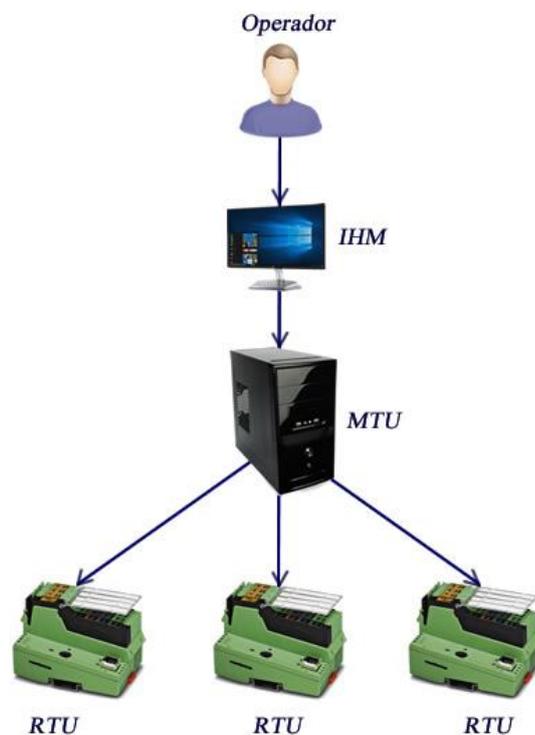


Figura 10 – Arquitetura básica de um sistema SCADA

Fonte: Adaptado de Choi, Kim, Won e Kim (2009)

2.7.6 Simulação via *Simulink*

Simulink é um ambiente de simulação integrada ao software MatLab® que permite modelar e simular sistemas dinâmicos. Seus recursos possuem alta integração com o resto do ambiente, sendo comumente utilizados em teoria de controle e processamento de sinais. Os modelos em *Simulink* são construídos na forma de diagrama de blocos, podendo também ser construídos via linhas de comando através da interligação com o próprio MatLab®. Seus

blocos e funções podem ser obtidos de sua própria biblioteca ou podem ser desenvolvidos manualmente. Dessa forma, a variedade de sistemas que podem ser projetados e testados através desse recurso é muito grande (COELHO; PINHO, 2018). O *Simulink*, através dos modelos matemáticos que descrevem o processo real, permite que a simulação do comportamento desse processo seja fiel. Importante ressaltar que os distúrbios e demais peculiaridades do processo real podem ser adicionados à simulação, possibilitando que testes e análises ocorram em condições mais próximas à realidade.

2.7.7 Simulação *Hardware-in-the-loop*

No cenário mundial atual, onde o desafio tecnológico leva a uma maior dificuldade do entendimento dos sistemas de fabricação e a maiores restrições no tempo de projeto do sistema, é necessária a utilização de métodos de simulação aprimorados a possibilitar um *desing* de garantia do projeto. O principal objetivo da simulação, envolve a reprodução do processo, findando ter ciência de forma mais precisa do que pode ser aplicado no mundo real (Menzel, Stoepler, & Douglas, 2005). A utilização de um modelo de simulação se mostra atrativo por uma série de benefícios, dentre os quais pode-se citar o baixo custo efetivo, uma vez que a máquina ou sistema real não são necessários. Outra importante vantagem em sua utilização é a segurança que o mesmo traz por não gerar riscos de avarias ao equipamento ou ao processo, bem como a rapidez de configuração dos componentes envolvidos, sem que ocorra 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 próprio processo (Menzel, Stoepler, & Douglas, 2005).

Um dos métodos de simulação mais utilizados é o *Hardware-in-the-loop* [HIL], pois preenche a lacuna entre as simulações e as condições reais. 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 de computador. Desta forma, no ciclo de desenvolvimento de um sistema, o risco de se descobrir um erro nas últimas etapas e na montagem em campo é reduzido consideravelmente (Bin Lu, Monti & Dougal, 2003).

Resumindo, pode-se caracterizar o HIL pela execução de componentes reais em conexão com componentes simulados, em tempo real. Usualmente, o Hardware é referente ao sistema de controle e o software referente ao sistema / processo real. O processo controlado, que consiste em atuadores, processo físico e sensores, pode ser então simulado (parcialmente

ou totalmente). De maneira geral, alguns atuadores são reais e os sensores e processo são simulados. Em muitos casos os atuadores e o hardware de controle formam um subsistema integrado, também pelo fato da dificuldade em se modelar com precisão e simular em tempo real os atuadores (Isermann, Schaffnit, & Sinsel, 1999).

A realidade da cerâmica vermelha na região é de fato artesanal, pois dispõe de processos produtivos defasados, sistemas e métodos ultrapassados, baixa inovação tecnológica e produtos com baixo valor agregado. No entanto, em um âmbito nacional essa 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 cortar custos desnecessários (Bega *et al.*, 2011). Mesmo com essas mudanças, são muitas as dificuldades encontradas para executar a automatização dos processos. Um dos principais problemas é o gasto inicial com compra e instalação de equipamentos. Outro empecilho se encontra no interesse das partes envolvidas quanto à utilização de novos métodos industriais, que possuem custos consideravelmente mais elevados, especialmente quando é necessário o treinamento da mão de obra (Bristol, *et al.*, 2015). Além dos fatores financeiros, outros fatores causam impedimentos ao desenvolvimento da automação nas cerâmicas. Muitas vezes a inclusão do controle no processo, por ocorrer gradativamente, acaba evoluindo de forma paralela e demonstrando diferentes graus de desenvolvimento (disparidade). Outro fator importante é que o material cerâmico é sólido, sendo muito mais difícil de controlar do que os processos com fluidos. Todas essas questões devem ser levadas em consideração para implementação do controle e desenvolvimento dos processos (Gasch, 2007).

Com o propósito de avaliar a introdução do controle e da automação na indústria foram estabelecidos níveis de automação, que vão 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 mesmos atuam no processo com 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. Quanto ao 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 muitos casos não serem utilizados os sensores adequados ou não definir corretamente a variável a ser controlada. O nível 4 envolve o controle global do sistema

produtivo cerâmico, pois as etapas que o envolve são interdependentes. Caso ocorra falha em alguma das etapas, poderá gerar um problema maior em uma outra (Franchi & Camargo, 2009). Este último nível está em fase embrionária no setor cerâmico, principalmente pelo fato de ser muito oneroso executar o controle do processo como um todo. Além disso, 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 nível 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 ocorre o controle através da medição contínua da densidade e da viscosidade, caso não estejam dentro das especificações, a atuação é feita pelo aumento ou diminuição das vazões de água e defloculantes (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 afetam 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 etapa que melhor precisa ser controlada e automatizada é mesmo a etapa da queima, devido às características técnicas e estéticas finais que são atribuídas ao produto cerâmico e devido ao seu gasto com energia. A temperatura interna do forno é controlada de forma contínua, mas muitas vezes não é o suficiente e as diferenças de temperatura do topo até a base 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).

2.8 Trabalhos Correlatos

Outras pesquisas tratam da questão da melhoria do processo de produção da cerâmica como um todo. Mais especificamente sobre a etapa da queima, alguns autores desenvolveram suas pesquisas com foco nas propriedades físico-químicas da matéria-prima da massa cerâmica, passando pelo re-aproveitamento térmico, até o controle da alimentação no ato da combustão. No entanto, a questão do controle da passagem de ar pela chaminé (*dampner*)

combinada com a alimentação não foi abordada por nenhuma das pesquisas que mais se assemelham à problemática definida nesta pesquisa. É importante destacar que o forno cerâmico costuma apresentar esse recurso para controle da passagem de ar pela chaminé, pois seu controle é importante para iniciar o processo de combustão nas fornalhas. Dessa maneira, tamanha a importância dessa questão, os resultados e conclusões dessa abordagem impactam diretamente as outras pesquisas relacionadas ao controle da combustão em fornos intermitentes de cerâmica vermelha.

O trabalho intitulado “Sistema de Controle de Alimentação para Fornos Intermitentes em Indústria de Cerâmica Vermelha” por Lima (2018) aborda o controle do processo de queima cerâmico com base na alimentação da combustão. Com base em alguns parâmetros definidos por pesquisa, o sistema de controle de alimentação [SCA] desenvolvido atua na alimentação da queima que ocorre no forno de forma automática. As conclusões do referido trabalho mostram melhorias nas características técnicas do produto cerâmico após a queima, redução nos insumos, desperdícios e impacto ambiental. Essa pesquisa apresenta direcionamentos importantes para a resolução do problema definido na presente pesquisa, explicitando o quanto o controle do processo resulta em melhorias diversas.

O trabalho que leva o nome de “Reaproveitamento Energético em Forno Intermitente na Indústria Cerâmica Vermelha” por Azevedo (2017) aborda o aproveitamento dos gases quentes expelidos de outra queima no processo de combustão da atual queima. O sistema de recuperação de calor [SRC] desenvolvido finda reduzir o consumo de combustível, uma vez que o acréscimo de temperatura ocorre também via inserção de comburente em alta temperatura. Os resultados dessa contribuição mostram que os valores das curvas de queima registradas pelas aferições dos termopares instalados no interior do forno tiveram seus valores elevados, apresentando características mais estáveis. Esse aumento na temperatura garante redução no uso de combustível para controle da combustão.

Cava (2015) em sua pesquisa intitulada “Otimização do Processo de Queima de Revestimentos Cerâmicos por meio do Controle da Atmosfera do Forno” findou estudar o comportamento da queima mediante análise do ambiente do forno no momento da queima. Para tal, foi feita uma caracterização física e química da matéria-prima utilizada, avaliando a tendência da eliminação dos defeitos em função da atmosfera do forno enriquecida com oxigênio. A conclusão desse estudo indica que a melhoria das condições do espaço físico onde ocorre a queima traz melhorias tanto na qualidade do produto final cerâmico, quanto redução no ciclo de queima.

Já a pesquisa do Oliveira (2011), chamada “Acompanhamento da Produção Industrial em Cerâmica da Microrregião do Vale do Assu: Estudo de Caso” se preocupa em avaliar todo o processo de produção cerâmico com a finalidade de identificar os principais pontos de melhoria. Essa pesquisa identifica os problemas, entraves, gargalos e defeitos advindos do processo, que podem ser minimizados ou sanados à curto e médio prazo. Suas conclusões apontam para problemas reais e de cunho prático encontrados no processo de uma forma geral. Sua contribuição permite uma macro-visão sobre o cenário explorado na atual pesquisa.

O trabalho de título “Efeito da Velocidade de aquecimento nas Propriedades de Produtos da Cerâmica Estrutural” por Dutra (2007) estudou diferentes taxas de aquecimento, com o objetivo de verificar a viabilidade da inclusão do gás natural como energia de queima para seus produtos. Suas considerações permitem a melhor compreensão de o quanto a velocidade na variação da temperatura para mais ou para menos impacta nas características técnicas do produto cerâmico.

Alguns trabalhos como o “Estudo por Microscopia Eletrônica das Transformações Durante a Queima de Argilas Altamente Aluminosas Brasileiras” por Santos *et al.* (2006) abrangem a questão das alterações sofridas pelo material que compõe as peças cerâmicas. Sua abordagem está relacionada à análise das propriedades do material cerâmico em resposta ao aumento da temperatura. Foram analisadas características como tensão de ruptura a flexão, módulo de elasticidade flexural, parâmetro de Weibull, tensão característica e massa específica aparente, dentre outras. Os resultados mostram que a temperatura de queima influencia diretamente nas propriedades mecânicas da cerâmica vermelha. Mediante suas conclusões é possível entender melhor a reação do material mediante ação da queima.

Todos os trabalhos apresentados apontam para a etapa da queima. A presente pesquisa avalia uma questão que apesar de não ter sido tema de estudo de trabalhos afins, abrange a maioria deles. As contribuições presentes na literatura fornecem informações relevantes para o desenvolvimento do novo controle proposto. Para que a melhoria do processo de queima seja uma realidade, os aspectos materiais e espaciais contidos nessas pesquisas devem ser levados em conta, prosseguindo com resultados que expressam uma continuação da pesquisa científica de modo geral.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da classificação da pesquisa e da descrição das etapas necessárias para o desenvolvimento da mesma, explicitando os procedimentos utilizados em cada uma delas.

3.1 Classificação da Pesquisa

A pesquisa é classificada de diversas formas: do ponto de vista da natureza, podendo ser básica ou aplicada; do ponto de vista da abordagem do problema, podendo ser quantitativa ou qualitativa; do ponto de vista dos seus objetivos, podendo ser exploratória, descritiva ou explicativa; por fim do ponto de vista dos procedimentos técnicos, podendo ser bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, pesquisa *expost-facto*, pesquisa-ação ou pesquisa participante (Silva & Menezes, 2001).

De acordo com essa lógica, do ponto de vista da natureza, a pesquisa básica envolve verdades e interesses universais tendo como objetivo adquirir novos conhecimentos de forma a contribuir para o avanço da ciência. Já a pesquisa aplicada envolve verdades e interesses locais, com objetivo voltado à aplicação prática e solução de problema específico. Sendo assim, quanto à natureza, a presente pesquisa se classifica como aplicada devido ao seu objetivo de prover solução à uma problemática específica (Silva, 2008).

Prosseguindo, do ponto de vista da forma de abordagem do problema, na pesquisa quantitativa, tudo pode ser convertido em números por meio de recursos e técnicas estatísticas. Na pesquisa qualitativa, a análise dos dados costuma ser indutiva, onde o processo e seu significado são os focos principais da abordagem e não podem ser simplesmente traduzidos em números. Diante do exposto, quanto à abordagem do problema, a pesquisa em questão é classificada como quantitativa devido ao seu foco em análises numéricas e diminuição de custos (Silva & Menezes, 2001).

Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa exploratória envolve levantamento bibliográfico, entrevistas, análise de exemplos e estudo de casos de forma a explicitar a problemática. A pesquisa descritiva envolve técnicas de coleta de dados e observação sistemática, descrevendo determinada população ou fenômeno. Já a pesquisa explicativa, se concentra em explicar o “porquê” das coisas, identificando os fatores que contribuem para a ocorrência de determinados fenômenos. Com relação aos objetivos, conclui-se que a pesquisa atual é predominantemente exploratória, fundamentada em apanhado bibliográfico, estudo de

caso e levantamento de opiniões que deixam claro o problema a ser resolvido (Silva & Menezes, 2001).

Pela ótica dos procedimentos técnicos ou meio para obtenção de dados, a pesquisa bibliográfica é elaborada com base em material publicado, como livros e artigos de periódicos. A pesquisa documental é elaborada com base em material que ainda não recebeu tratamento analítico. A pesquisa experimental ocorre quando se assume um objeto de estudo, avaliando e controlando as variáveis com potencial de influência. O que se chama por levantamento, ocorre quando a pesquisa envolve a opinião direta das pessoas cujo comportamento se deseja analisar. O estudo de caso envolve a análise profunda de um ou poucos objetos, de forma a permitir seu amplo conhecimento. A pesquisa *expost-facto* é definida por experimentos realizados após os acontecimentos. A pesquisa-ação ocorre conjunta a uma ação que promove a resolução de um problema, com participantes envolvidos de forma cooperativa ou participativa. Já a pesquisa participante, ocorre quando parte da interação dos pesquisadores com os envolvidos nas situações de análise (MORESI, 2003). Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a pesquisa analisada pode ser classificada de diversas formas. Possuindo características de pesquisa bibliográfica, documental, experimental e estudo de caso, a presente pesquisa pode ser considerada predominantemente como um estudo de caso.

Sendo assim, levando em conta todos os elementos clássicos para classificação metodológica, a classificação final da presente pesquisa pode ser considerada como sendo: aplicada, quantitativa, exploratória e estudo de caso.

3.2 Etapas da Pesquisa

O desenvolvimento do projeto ocorreu mediante sua divisão em 7 etapas, sendo elas: revisão da literatura, pesquisa de campo, avaliações técnicas, modelagem matemática do objeto de estudo, desenvolvimento do modelo lógico de controle, simulação e análises e testes.

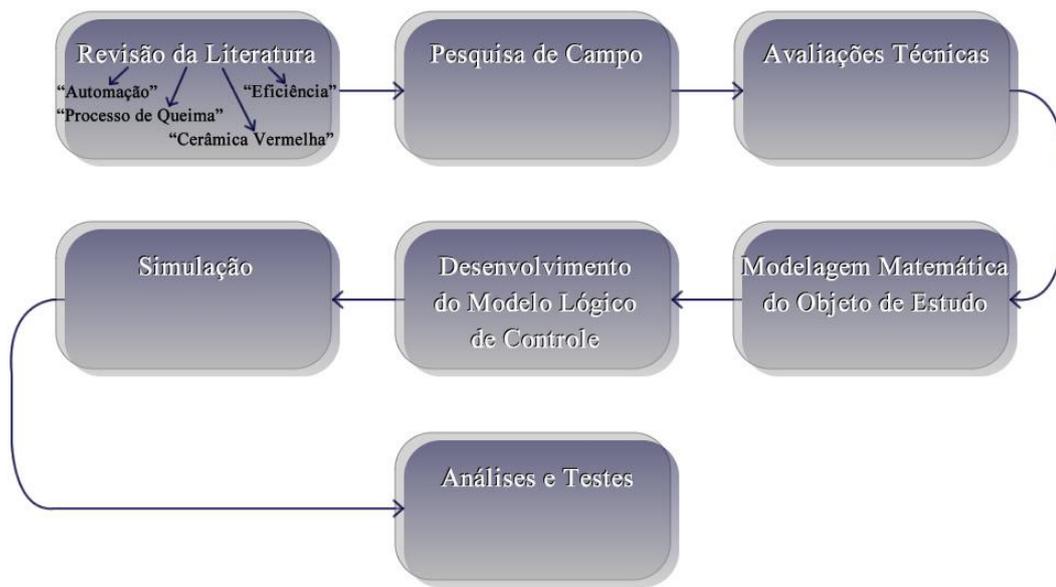


Figura 11 – Etapas da Metodologia

Fonte: Autor (2018)

3.2.1 Revisão de Literatura

Sabe-se que a revisão da literatura deve ser o primeiro passo a ser dado pelo pesquisador em direção à produção de um projeto. Por meio da revisão, o pesquisador é norteado e familiarizado com o tema, baseado em conteúdo científico acerca do que já foi desenvolvido. A revisão literária contribui não só para vislumbrar um caminho de novas contribuições, mas para também conduzir a pesquisa por metodologias previamente aplicadas e em conformidade com a área do estudo em questão (Sampaio & Mancini, 2007).

3.2.1.1 Revisão Sistemática

A Revisão da literatura teve início por meio de uma revisão sistemática. Com objetivos mais técnicos, essa técnica tem por objetivo localizar conteúdo científico relacionado de forma mais assertiva. Dessa maneira foram definidos os objetivos de pesquisa e levantados os principais questionamentos para construção das strings de busca a serem utilizadas como consulta das bases de dados científicas.

3.2.1.1.1 Objetivos de Pesquisa

A presente revisão sistemática foi conduzida visando três objetivos principais: imersão no perfil da indústria cerâmica, a fim de conhecer melhor seu histórico e funcionamento de seu processo produtivo; revisão da problemática em questão, findando obter uma macro-visão

do que já foi estudado em relação ao problema exposto; e interação da cerâmica com a automação, revelando o estado da arte que envolve a finalidade da pesquisa.

3.2.1.1.2 Questionamentos da Pesquisa

Mediante pesquisa de campo fundada em observações, medições e entrevistas, foram levantados os principais questionamentos que direcionam a pesquisa. Esses questionamentos são fundamentais para a melhor compreensão e definição da problemática. Os questionamentos levantados foram os seguintes:

- Em relação ao primeiro objetivo de imersão no perfil cerâmico, seguem:
 - Como ocorreu o processo evolutivo da tecnologia no setor ceramista?
 - Quais são os principais gargalos dos processos produtivos cerâmicos?
 - Qual a realidade atual do setor cerâmico dos pontos de vista tecnológico e financeiro?
- Em relação ao segundo objetivo de revisão da problemática em questão, seguem:
 - Quais as características técnicas sobre os fornos tipo abóbada?
 - Quais as características técnicas do processo de queima cerâmica?
 - Como funciona o controle da saída de ar nas chaminés de fornos tipo abóbada?
 - Quais as temperaturas ideais envolvidas no processo de queima cerâmico?
 - Como se dá o comportamento da massa de ar quente no interior do forno?
- Em relação ao terceiro objetivo de revisão da interação da automação com a cerâmica, seguem:
 - Quais as soluções atuais desenvolvidas para os gargalos da indústria cerâmica?
 - Quais as soluções em automação desenvolvidas para solucionar problemas da indústria cerâmica?

Com os objetivos de pesquisa e os principais questionamentos em mãos, a pesquisa iniciou-se por meio de cinco etapas principais: definição dos temas chave, definição das *Strings* de busca, seleção das bases de busca, aplicação do método e avaliação segundo critérios de seleção.

3.2.1.1.3 Definição dos Temas-chave

Após os processos descritos acima, a ideia do que deve ser estudado para ampliar a visão da pesquisa é muito mais clara. De acordo com o exposto, foram definidos quatro temas-chave para dar prosseguimento à pesquisa da revisão de literatura nas bases do conhecimento. Esses temas visam abordar termos que filtrem essas bases de dados da maneira mais eficiente possível, de forma a dispor conteúdo científico capaz de responder a maioria dos questionamentos anteriormente citados. Os temas-chave foram:

- Cerâmica Vermelha;
- Processo de Queima;
- Automação;
- Eficiência.

3.2.1.1.4 Definição das *Strings* de Busca

Uma vez definidos os temas-chave, foram escritos os termos que representam cada um e a partir deles, foram criadas as *Strings* de busca para facilitar as pesquisas. As *Strings* de busca são lógicas utilizadas pelas bases de conhecimento, de forma a filtrar e dispor seu conteúdo de acordo com os termos especificados e suas variações. Esse recurso é de suma importância e merece atenção especial ao ser elaborado, de forma a evitar desperdício de tempo e obter resultados mais precisos (Mergel, 2014).

Os termos (T) que representam os temas-chave e as *Strings* de busca (S) são mostrados a seguir:

T1 = ("Clay" OR "Clayey" OR "Clayey Ceramic");

T2 = ("Burning" OR "Burning Process*" OR "Burning Stage" OR "Burning Phase");

T3 = ("Automation" OR "Control" OR "Automation and Control" OR "Control System*");

T4 = ("Efficiency" OR "Calorific Efficiency");

S1 = (T1 AND T2 AND T3 AND T4);

Exemplo: S1 = (("Clay" OR "Clayey" OR "Clayey Ceramic") AND ("Burning" OR "Burning Process*" OR "Burning Stage" OR "Burning Phase") AND ("Automation" OR "Control" OR "Automation and Control" OR "Control System*") AND ("Efficiency" OR "Calorific Efficiency")).

S2 = (T1 AND T2 AND T3);

S3 = (T1 AND T2 AND T4);

S4 = (T1 AND T3 AND T4);

S5 = (T2 AND T3 AND T4);

S6 = (T1 AND T2);

S7 = (T1 AND T4);

S8 = (T1 AND T3);

S9 = (T2 AND T3);

S10 = (T2 AND T4);

S11 = (T3 AND T4).

3.2.1.1.5 Seleção das Bases de Busca

As bases selecionadas para a pesquisa foram SCOPUS e SCIELO. Com a intenção de mapear uma base de dados nacional e uma internacional, essas bases foram escolhidas devido à sua notoriedade. Tanto o SCOPUS quanto o SCIELO são bases amplas e bem conceituadas no meio científico, agregam outras bases e satisfazem as necessidades desse apanhado teórico. As bases foram utilizadas em conjunto, de forma a garantir uma boa sondagem dentro e fora do território brasileiro, compreendendo o estado da arte em âmbito mundial.

3.2.1.1.6 Aplicação do Método de Pesquisa

Com as *Strings* já definidas é possível buscar os temas relacionados à pesquisa. As bases de dados possuem campos de pesquisa que reconhecem a lógica de pesquisa desenvolvida. Dessa maneira é possível filtrar o conteúdo da base, tomando ciência das publicações científicas que mais se enquadram no universo definido. Uma vez dispostos os resultados, algumas bases até apresentam análises estatísticas dos mesmos, relacionadas ao ano de publicação, área, quantitativo, dentre outros. Após aplicação da pesquisa em questão, a quantidade de documentos encontrados para cada String de busca foram os seguintes:

S1: 6 documentos;

S2: 113 documentos;

S3: 43 documentos;

S4: 1.032 documentos;

S5: 1.144 documentos;

S6: 937 documentos;

S7: 7.206 documentos;

S8: 16.160 documentos;

S9: 13.293 documentos;

S10: 6.960 documentos;

S11: 315.873 documentos.

O diagrama de Venn, normalmente é utilizado para descrever como itens se relacionam uns com os outros dentro de um “universo” específico (Edwards, 2004). Para fins de visualização, os resultados da pesquisa bibliográfica realizada podem ser dispostos no formato definido por Venn, conforme demonstra a Figura 12 a seguir:

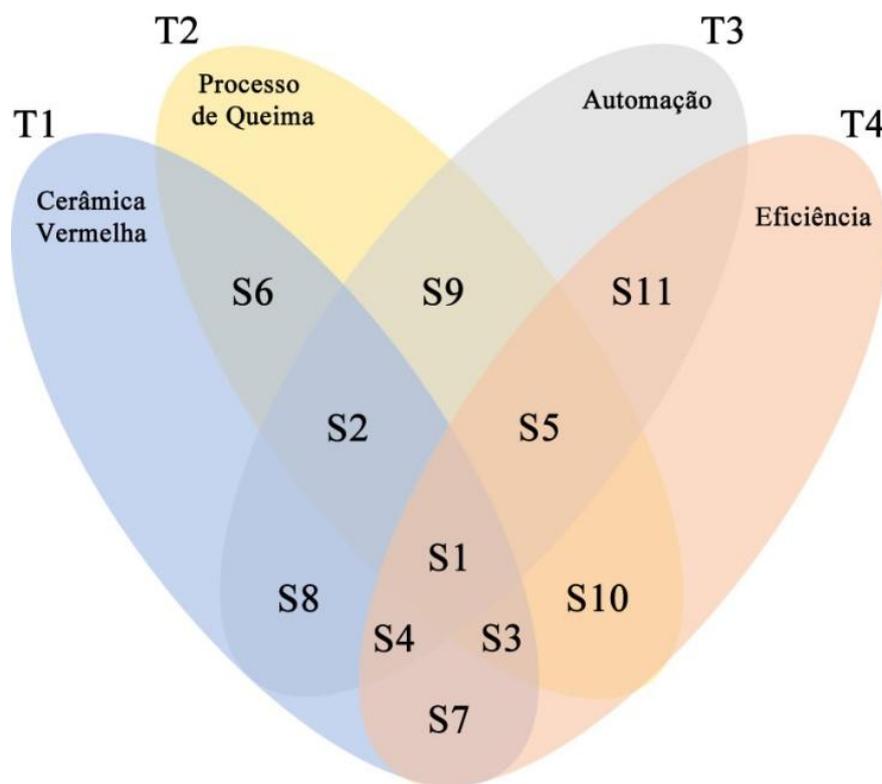


Figura 12 – Diagrama de Venn com resultados da pesquisa bibliográfica

Fonte: Autor (2018)

Mediante os resultados expostos, fica fácil analisar o quanto a intercessão dos principais temas que norteiam a pesquisa em questão não é comumente abordada. Dentre os 6 documentos encontrados por essa String, nenhum deles abordava de fato o problema em estudo, nem propunha soluções de engenharia. No tocante à contextualização e embasamento

teórico da pesquisa, foram encontrados documentos que em muito agregaram conhecimento, através de *Strings* mais clássicas que envolveram automação e cerâmica ou automação e processo de queima. Essas e outras análises podem ser feitas com base nos resultados dispostos no diagrama.

3.2.1.1.7 Avaliação Segundo Critérios de Seleção

Realizada toda a pesquisa descrita até o momento, foram definidos alguns critérios para seleção dos documentos científicos que melhor respondem aos questionamentos levantados e mais efetivamente agregam conhecimento à pesquisa. Seguem os critérios:

- Foram selecionados os documentos datados após 2008, salvo artigos clássicos cujas definições não sofreram alterações durante os anos;
- Foram selecionados os arquivos disponibilizados eletronicamente;
- Foram selecionados os artigos quanto à língua: Português, Inglês ou Espanhol;
- Foram selecionados os artigos com maior aderência aos assuntos da pesquisa, àqueles que continham pelo menos parte de sua contextualização compatível.

Dessa maneira, a revisão adotou duas triagens. A primeira selecionou os documentos científicos pertinentes à questão, tendo por base sua adequação com o tema e aos objetivos previamente definidos para essa revisão, analisando seus títulos, palavras-chave e resumos. A segunda triagem selecionou as principais referências dos documentos científicos escolhidos na primeira triagem, estudando-as de igual forma. Dessa metodologia, quanto à contribuição para a atual pesquisa, destacam-se as pesquisas científicas:

- ***“Reengenharia de Fornos Cerâmicos Visando o Aperfeiçoamento da Convecção Térmica”*** por Nascimento, Pavanello, Wojciechowski, Rodrigues e Muniz (2016);
- ***“Implementação de Servomotores no Controle de Válvulas de Gás para Queimadores de Fornos a Rolos em Indústrias Cerâmicas”*** por Bristot, Guimarães Filho, Pacheco, Natal, Rocha, & Bristot (2015);
- ***“Como Melhorar a Eficiência Energética na Indústria de Revestimentos”*** por Nasseti (2010).

A pesquisa de Nascimento *et al* (2016) tem como objetivo avaliar a contribuição da reengenharia dos fornos cerâmicos quanto à questões como: eficiência energética, emissão de poluentes, aumento da produtividade, etc. Já Bristot *et al* (2015) tem por objetivo contribuir para a melhoria do processo de produção cerâmico por meio da redução na quebra de placas de revestimentos cerâmicos, consumo de gás e questões ergonômicas. Por fim, Nasseti (2010) mapeia as melhorias realizadas nos últimos anos quanto à eficiência energética do processo de queima, para então propor novas soluções, considerando estratégias para a redução do consumo de eletricidade e métodos de controle de consumo de energia.

3.2.1.2 Outros Critérios de Busca

Levando em conta que a revisão sistemática pode não encontrar algumas contribuições científicas menores e mais específicas, a pesquisa se estendeu através de outros critérios de busca. Foram consideradas revistas científicas nacionais, como por exemplo, a “Cerâmica Industrial” - publicação trimestral da ABCERAM que costuma considerar conteúdo regional. Foram feitas também consultas em bibliotecas locais e consideradas referência de pesquisas anteriores quanto ao polo ceramista da região norte-fluminense do Rio. Grandes contribuições foram encontradas para embasamento técnico-científico e direcionamento quanto à solução do problema assumido. Algumas das pesquisas mais relevantes foram resumidas no quadro a seguir:

CONTRIBUIÇÕES LITERÁRIAS RELEVANTES					
Nº	TÍTULO	ASSOCIAÇÃO	AUTOR	ANO	OBJETIVO
1	Caracterização de Resíduo de Massa Cerâmica Crua para Aproveitamento em Cerâmica Vermelha	70º Congresso Anual da ABM - Internacional	Reis <i>et al</i>	2016	Caracterizar o resíduo de massa cerâmica crua para incorporação na massa argilosa usada em cerâmica vermelha.
2	Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer -6th Edition	John Wiley & Son Inc	Welty <i>et al</i>	2014	Fundamentos básicos da Física.
3	Análise Comparativa Entre Propriedades Mecânicas, Termofísicas e Geométricas de Tijolos Produzidos pelos Fornos Caieira e Abóbada.	Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Mestrado)	Silva	2011	Analisar as diferenças nas características termofísicas, mecânicas e geométricas dos tijolos produzidos pelos fornos caieira e abóbada, utilizando a NBR 15720 e avaliar o rendimento energético de ambos os fornos.
4	A modelagem Matemática Através de Conceitos Científicos. Ciência e Cognição	Ciências & Cognição	Costa	2009	Apresentar uma proposta que utiliza a modelagem matemática para promover uma aprendizagem significativa dos conceitos matemáticos de limite e continuidade a partir de conceitos científicos.
5	Impactos ambientais da expansão da cerâmica vermelha em Carnaúba dos Dantas-RN	HOLOS	Silva	2008	Discutir e mostrar os resultados obtidos no estudo sobre os principais impactos ambientais da expansão da indústria de cerâmica vermelha no município de Carnaúba dos Dantas-RN.

6	Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Evolução e Perspectivas	Cerâmica Industrial	Gasch	2007	Analisar as possibilidades atuais de automação das etapas do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, analisar as vantagens e inconvenientes dos sistemas de controle propostos e apontar aspectos que podem ajudar a definir o perfil da “planta produtiva do futuro.
7	Engenharia de controle moderno-5ª ed.	Pearson Prentice Hall	Ogata	2007	Fundamentos básicos de Controle.
8	Operaciones de Transferencia de Masa	McGraw-Hill	Robert	2001	Fundamentos básicos de Transferência de Massa.
9	Ciência e Tecnologia de Argilas-2ª ed.	Edgard Blucher LTDA	Santos	1989	Propriedades físico-químicas da Argila.
10	Clay Mineralogy-2nd Edition	McGraw-Hill	Grim	1968	Mineralogia na Cerâmica Vermelha.

Quadro 1 – Contribuições literárias relevantes

Fonte: Autor (2018)

3.2.2 Pesquisa de Campo

Realizadas as leituras dos artigos pertinentes à contextualização e compreensão do cenário cerâmico, foi realizada uma série de visitas técnicas, onde por meio de entrevistas não estruturadas e observação assistemática pôde-se enxergar todo aporte teórico sendo posto em prática. Durante essas visitas, o processo de queima cerâmico foi detalhadamente estudado, as variáveis já controladas pelo sistema foram acompanhadas e os detalhes do processo como são implementados atualmente foram compreendidos.

Através dessa pesquisa de campo, foi possível entender o funcionamento da etapa de queima de diferentes pontos de vista. Devido às diferentes realidades vividas pelo forneiro e pelo empresário responsável, verifica-se que a compreensão do processo se dá de maneiras distintas. A questão cultural impacta o processo diretamente, as definições das funções de cada cargo e a busca por melhorias na qualidade do processo não estão exatamente alinhadas entre o nível operário e o gerencial. Enquanto a gerência não consegue enxergar os resultados esperados pelas práticas de melhoria, o nível operário pensa não ser possível obter resultados concretos advindos de planejamentos teóricos e puramente estatísticos.

Com base nas informações de cunho prático colhidas durante as visitas, foi definido o objeto de estudo em questão, bem como os aspectos tangíveis e intangíveis a serem controlados de forma a otimizar o processo de queima cerâmico. Quanto aos aspectos tangíveis, deve-se controlar: o *damper* (passagem de ar para a chaminé), a entrada de combustível (pó de serra), os termopares (aferição de temperatura), os níveis de aferição internos do forno (níveis de aferição de temperatura definidos pelos termopares) e a

disposição da carga no interior do forno (considerando diferentes tipos de tijolos). Quanto aos aspectos intangíveis, deve-se controlar: o tempo de queima, a variação de temperatura, o deslocamento do gradiente de temperatura contido no forno e o fluxo de calor.

3.2.2.1 Definição do Objeto de Estudo

O estudo de caso foi elaborado com base em um forno intermitente tipo abóbada com ingestão de comburente (ar atmosférico em movimento) pelos canais das fornalhas. O processo de queima ocorre no interior do forno sendo monitorado por 5 termopares espalhados ao longo da carga (tijolos) e 1 termopar no topo do forno, sem contato com a carga. A cada nova queima, esses termopares são re-posicionados, não havendo exatamente um ponto ótimo para aferição no qual fiquem fixados. O forno não dispõe de revestimento térmico, o que acarreta uma perda de calor significativa. Sua estrutura conta com 2 portas (para carga e descarga) e 4 fornalhas / cinzeiros que encaminham o fogo até a parte superior da abóbada. Devido às características estruturais já apresentadas no capítulo 2 (Seção 2.3.1 – Fornos Cerâmicos), a queima ocorre de cima para baixo até que todas as camadas de tijolos estejam cozidas. Os gases provenientes da queima são eliminados à atmosfera através de um duto subterrâneo ligado à chaminé. Esse duto tem sua seção controlada por um registro ou *damp*er que limita a passagem de ar para o meio externo. O forno em estudo é também todo composto em cerâmica. Durante a fase de resfriamento todas as suas aberturas são liberadas em 100%, incluindo o tampão que veda seu topo. Ventiladores também são utilizados na fase de resfriamento para reaproveitar calor entre um forno e outro. Toda essa transmissão de gases quentes ocorre pelos dutos subterrâneos destinados a tal função.

3.2.2.1.1 Localização

O forno em questão fica situado na Arte Cerâmica Sardinha, localizada em São Sebastião, distrito de Campos dos Goytacazes – estado do Rio de Janeiro. A empresa em questão sempre disponibilizou acesso ao seu acervo industrial para estudo e realização de testes práticos. Compromissada com o desenvolvimento da educação e da tecnologia, a Arte Cerâmica Sardinha possui alguns projetos para melhoria de seus processos já implementados. Pioneiros em inovação, produzem os mais diversos tipos de estrutura cerâmica com foco na qualidade. Dentre seus produtos destaca-se o tijolo branco maciço.

3.2.2.1.2 Características Técnicas

Também conhecido como forno de “chama invertida”, o objeto de estudo possui paredes de 1,20 metros de espessura. Seu diâmetro total mede 6,83 metros e a altura do plano

até o topo da abóbada corresponde a 3,3 metros. Seu interior é preenchido com 22 camadas de tijolos, sendo assim a altura do plano até a última camada de carga pode ser considerada como 2,2 metros. As fornalhas possuem 0,62 metros de comprimento por 0,75 metros de altura e as portas 1,27 metros de comprimento por 1,84 metros de altura. É importante destacar que essas proporções podem variar de um forno para o outro. Sua estrutura é constituída por tijolos maciços comuns, porém as fornalhas são de tijolos refratários (devido às altas temperaturas por volta de 1.200°C). Seu piso possui crivos por onde ocorre a passagem dos gases mediante depressões que os levam às chaminés (daí a queima conhecida como invertida, que ocorre de cima para baixo). A Figura 13 mostra a visão frontal do forno em estudo (detalhe para a porta, as fornalhas laterais e o tampo na parte superior da abóbada).



Figura 13 – Vista frontal do forno intermitente tipo abóbada em estudo

Fonte: Autor (2018)

Os termopares são essenciais para o controle da queima no interior do forno, eles definem os níveis de aferição e permitem ao operador saber a temperatura que foi alcançada naquele determinado nível. Suas instalações são dispostas em pontos estratégicos, visando a monitoria do forno de forma geral. No total, são instalados 6 termopares do tipo K; um na parte de baixo, chamado de M4 (porta 1); dois na parte do meio, chamados de M1 (porta 1) e M2 (porta 2); dois na parte de cima, chamados de C1 (porta 1) e C2 (porta 2) e um no teto, chamado de T9. Os valores das medições realizadas por esses instrumentos são transmitidos

ao CLP de forma a serem utilizados na lógica de controle nele contida. A Figura 14(a) ilustra o posicionamento dos termopares na porta 1 e a Figura 14(b) na porta 2.



(a)

(b)

Figura 14 – Instalação dos termopares

Fonte: Autor (2018)

Tendo finalizado a etapa de aquisição dos principais dados relacionados à pesquisa, faz-se necessário definir os aspectos que devem ser considerados para desenvolvimento do projeto, findando atingir os objetivos propostos. Esses aspectos abrangem todas as questões tangíveis e intangíveis com potencial de influência direta sobre o comportamento do processo que se deseja controlar.

Os aspectos tangíveis são aqueles que podem ser considerados fisicamente. Esses aspectos possuem características e restrições que devem ser consideradas na solução da problemática. Tais aspectos podem ser verificados a seguir:

3.2.2.2.1 Damper

A comporta que regula a saída de ar da chaminé se encontra no duto subterrâneo que liga o interior do forno ao ambiente externo. Essa comporta é feita de material metálico maciço, sendo capaz de vedar a saída de ar da chaminé, controlando a exaustão dos gases de combustão. No controle dessa comporta é que basicamente está o foco da pesquisa em questão, de maneira a maximizar o potencial calorífico do forno. A Figura 15 ilustra a comporta da chaminé e o mecanismo elaborado para seu controle, da forma que são implementados atualmente. Percebe-se na Figura 15(a), que o mecanismo é capaz de controlar duas comportas que restringem a passagem de ar em dois dutos subterrâneos distintos ligados

à mesma chaminé. A Figura 15(b) traz detalhes do registro utilizado para controle das comportas.



(a)

(b)

Figura 15 – Comporta da chaminé

Fonte: Autor (2018)

Em um ambiente caracterizado por constante combustão e predominantemente fechado, a queima “expele” seus gases provenientes da queima pelo único caminho de exaustão, comumente a chaminé. Como a queima ocorre na parte superior do forno e a saída da chaminé se encontra na parte inferior, o fluxo de gases quentes é o inverso do que seria o natural (fluxo inverso - de cima para baixo). A abertura dessa comporta é o que determina aspectos decisivos para a eficiência do processo de queima, como o deslocamento dos gases provenientes da queima e a necessidade de alimentação. Sua atuação influencia todo o sistema e diretamente a temperatura aferida pelo termopar M4. Normalmente a maior preocupação quanto ao processo de queima se encontra na parte da alimentação (queima de combustível), mas levando em consideração os aspectos construtivos do forno de chama invertida, a saída de ar também deve ser considerada.

O mecanismo descrito acima como “comporta”, pode ser substituído por um *damper* tipo guilhotina (de funcionamento bem semelhante) para que seja controlado automaticamente. O controle do sistema leva em consideração o *damper* como sendo um elemento final de controle, responsável por corrigir a “variável medida”. A Figura 16 traz um exemplo do *damper* tipo guilhotina considerado neste projeto.

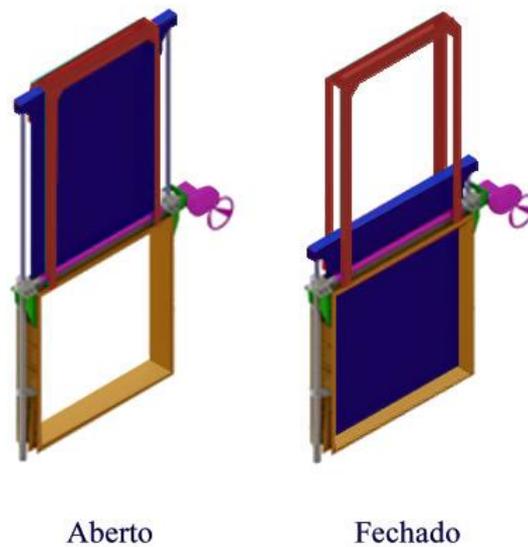


Figura 16 – Damper

Fonte: Adaptado de CRANFOS (2016)

3.2.2.2.2 Entrada de Combustível

A entrada de combustível é outro aspecto primordial para o controle. Os canais de alimentação são a fonte de calor a ser considerada, influenciando todo o sistema e diretamente a temperatura aferida pelo termopar T9. A fornalha é o local onde ocorre a queima propriamente dita, ela conta com um duto responsável pela inserção de comburente e o cinzeiro para depósito dos resíduos sólidos provenientes da queima. A máquina de pó de serra possui um reservatório onde o combustível fica armazenado e disponível até que seja necessária sua utilização. Em sua parte inferior, consta um “parafuso sem fim” que encaminha o pó de serra para ser consumido no interior da fornalha. Em sua capacidade máxima, essa máquina opera com a inserção média de 25 Kg de combustível por hora.

Para que ocorra uma queima ideal, existe uma relação de 20% a mais de comburente para uma dada quantidade de combustível (LIMA, 2018). Essa é a relação considerada nesta pesquisa, uma vez que o desenvolvimento do controle do *damper* será feito com base num processo que já possui alimentação controlada dentro de parâmetros discutidos mais à frente. Devido ao processo de pré-aquecimento dos fornos mencionado no capítulo 2, o processo de queima já inicia na temperatura de 130 °C. Essa temperatura foi assumida conforme dados experimentais retirados do campo e com base nas entrevistas realizadas no processo metodológico para mapeamento do processo. Quando a entrada de combustível começa a atuar na queima de fato, a temperatura em seu interior já está elevada, o que garante a

integridade física das peças cerâmicas e o aproveitamento energético entre as diferentes queimas.

Apesar de a abertura para a adição de combustível ser teoricamente vedada, caso o *damper* esteja sendo operado de forma errada, o fogo pode voltar pela entrada de combustível prejudicando o processo e outros aspectos construtivos do forno. Ao mesmo tempo, o controle da incidência de fogo nessa área é o que determina o valor máximo para o fechamento da passagem de ar para a chaminé. Com base em testes e medições realizados em campo, determinou-se com folga o fechamento máximo do *damper* em 90%. Ou seja, foi considerado para este projeto que o *damper* sempre ficará aberto em no mínimo 10%, garantindo que o fogo não retorne pelos canais de alimentação (causando danos ao equipamento e perda calorífica) e garantindo também o maior aproveitamento do calor no interior da abóbada.

3.2.2.2.3 Termopares

Os termopares dispostos fisicamente como demonstrado na Seção 3.2.2.1.2 – “Características Técnicas”, são os elementos sensores do sistema de controle. Isso quer dizer que sem eles, não seria possível comparar os valores que descrevem o comportamento real do sistema, com o *setpoint* definido na lógica de controle. Dessa forma, não seria possível dimensionar a ação corretiva necessária para controle do processo. São os termopares que determinam os níveis de aferição a serem considerados no controle do projeto e já citados anteriormente.

Como já foi mencionado, a carga é disposta em 22 camadas no interior do forno. Por isso, os termopares são posicionados estrategicamente, de forma a acompanhar a queima na carga como um todo e não só em um ponto ou nível limitado. Segundo medições realizadas em campo, determinou-se uma relação de posicionamento desses termopares. Apesar de os mesmos serem reposicionados em cada queima, os testes empíricos retornam uma relação de C1 e C2 (termopares da parte superior da carga) como sendo 75% do valor de T9 + 25% do valor de M4. Já para M1 e M2 (termopares da parte intermediária da carga) essa relação pode ser considerada como sendo a soma das médias dos valores aferidos pelo termopar do topo e o da base da carga. Essa relação do posicionamento dos termopares em proporção aos termopares de referência é a que foi considerada para o acompanhamento de dados neste projeto.

3.2.2.2.4 Níveis de Aferição

Os níveis de aferição seguem a mesma ordem do posicionamento dos termopares descrita até aqui. De cima para baixo (fluxo invertido), considera-se o 1º nível definido pelo termopar T9 (topo da abóbada), o 2º nível como sendo a média dos termopares C1 e C2 (parte superior da carga), o 3º nível como sendo também a média entre os valores dos termopares M1 e M2 (parte central da carga) e por fim o 4º nível definido pelo termopar M4 (parte inferior / base da carga).

É através do monitoramento desses níveis que se acompanha o fluxo de calor e se sabe como os gases quentes provenientes da queima, estão sendo distribuídos no interior do forno. Esse monitoramento já acontece na queima atual e apesar de os instrumentos de aferição de temperatura necessitarem de calibração e muitas vezes não apresentarem a exatidão ideal esperada, junto à ação de um controlador lógico programável, seus dados garantem a melhoria do processo de queima em vários aspectos. Em outras palavras, os níveis de aferição são essenciais para o acompanhamento e controle da queima no interior do forno cerâmico.

3.2.2.2.5 Disposição da Carga

Outro aspecto de muita importância é a maneira como a carga é disposta no interior do forno. Sabe-se que as indústrias cerâmicas produzem mais de um tipo de peça e que essas peças vão para uma mesma queima em batelada. Dependendo do tipo de peça, têm-se diferentes áreas e seções (formatos) constituídas por diferentes quantidades de material em sua estrutura. Essa diferença entre formatos e quantidade de material (gramatura) impacta em toda a dinâmica do fluxo de calor no interior do forno, quesito que deve ser levado em conta, pois descreve o cenário a ser explorado na pesquisa.

Dentre diversas outras características, o coeficiente de aquecimento dos diferentes tipos de peças varia em uma mesma queima devido ao material. Constituídas por diferentes combinações de argilas, as peças cerâmicas assumem diferentes cores e resistências como produto final. Isso significa dizer que a temperatura aferida por um termopar em contato com a carga tipo A, não será mesmo igual à temperatura aferida por outro termopar em contato com a carga tipo B, por mais que o fluxo de calor que passa por ambos os tipos seja idealmente controlado.

3.2.2.3 Aspectos Intangíveis para Controle

Os aspectos intangíveis são aqueles que apesar de não estarem fisicamente presentes, possuem alto poder de influência sobre o processo. De igual forma, suas características e

restrições devem ser consideradas na solução do problema. Os aspectos intangíveis podem ser verificados na seção 3.2.2.3.1.

3.2.2.3.1 Tempo de Queima

É através do tempo de queima que se sabe o andamento do processo em cada uma das 22 camadas de carga. O tempo de queima e de aumento da temperatura deve ser monitorado de forma a proporcionar uma queima dentro dos aspectos considerados como ideais. Esse controle deve ser feito com base no tempo já conhecido e os valores de temperatura mostrados pelos termopares. A disposição da carga agrupada em camadas é demonstrada na Figura 17.



Figura 17 - Interior do forno cerâmico com carga disposta em filas

Fonte: Autor (2018)

Com base nos dados das queimas reais monitoradas, verifica-se que o processo de queima (sem considerar o pré-aquecimento) dura cerca de 130 horas. Esse foi o tempo de queima considerado neste projeto. Pela experiência adquirida nos processos de queima, sabe-se uma média de temperatura a ser atingida em cada nível de aferição e o tempo que essa temperatura deve se manter constante. Dessa maneira empírica é que o controle manual é feito no processo de queima, baseado na supervisão e ação corretiva do operador (fornheiro). Sendo assim, como a única forma de acompanhar a queima é pelas aferições dos instrumentos, considera-se que a carga em determinada queima está pronta após esse período de tempo pré-determinado por dados experimentais. Através desse conhecimento, pode-se basear a redução do tempo de queima mediante ação do controle em atingir níveis de temperatura mais altos,

em períodos de tempo mais curtos. Essa redução e tudo o que ela acarreta, representa a melhoria do processo pela ação do controle e será melhor discutida mais à frente.

3.2.2.3.2 Variação de Temperatura

O aumento de temperatura deve ser controlado findando principalmente a conservação das características físico-estruturais das peças cerâmicas, definidas na Norma Técnica Brasileira [NBR] 7170 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT]. A temperatura deve mostrar aumento gradual e constante de forma a ser distribuída proporcionalmente no interior do forno. O termopar T9, por ser o primeiro instrumento a detectar o aumento da temperatura proveniente da queima, deve ser levado em conta no controle desse aumento gradual de temperatura. Com base nos relatos dos forneiros em pesquisa de campo, foi verificado que o aumento gradual da temperatura de queima adotado corresponde a 30 °C à cada 2 horas. Esse é o aumento gradativo ideal para manter as características qualitativas da peça cerâmica, baseado em experimentos de cunho prático. Essa regra para aumento de temperatura no interior do forno é a adotada nesse projeto. A Figura 18 mostra o gráfico do aumento linear da temperatura a ser considerado para o controle da mesma através da alimentação da fornalha.

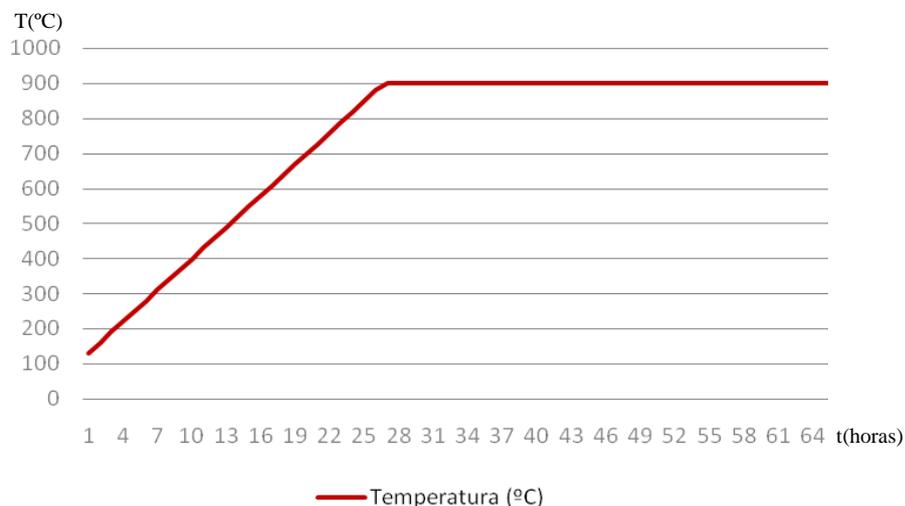


Figura 18 – Aumento linear da temperatura ideal para o controle da alimentação

Fonte: Autor (2018)

3.2.2.3.3 Deslocamento do Gradiente de Temperatura

Existe no interior do forno uma variação de temperatura (gradiente), que é estabelecida devido às características físico-químicas envolvidas no processo. Esse gradiente deve ser deslocado de forma controlada no interior do forno, para que todas as fileiras de carga sejam queimadas da maneira mais uniforme possível. Essa uniformidade na queima

determinará as características estéticas e estruturais, que agregam valor ao produto final. Fica claro que a maior temperatura aferida na estrutura se encontra no topo do forno, mas pelo deslocamento da massa de ar quente via fluxo invertido, essa temperatura pode ser melhor distribuída pelas camadas de carga inferiores. Por fim, objetiva-se estabilizar essa variação de temperatura dentro do processo, garantindo um fluxo constante de incidência dos gases quentes sobre a carga.

3.2.2.3.4 Fluxo de Calor

O fluxo de calor é o principal fenômeno físico a ser controlado no processo, pois ele tem poder direto de influência sobre a distribuição do calor no interior do forno. Como já discutido anteriormente, o forno em estudo possui características construtivas que forçam um fluxo de queima invertido e de acordo com a regulação da passagem desse fluxo de calor pela chaminé, toda a temperatura em seu interior sofre alteração. Como verificado em análise de queimas reais, a atuação do *damper* impacta diretamente nas aferições de todos os termopares ligados ao processo. Ao fechar o *damper*, os gases provenientes da queima são acumulados no topo da abóbada (termopar T9) e ao abrir o *damper*, esses gases são deslocados para as camadas inferiores sendo lançados à atmosfera (provocando aumento na temperatura aferida pelo termopar M4). Dessa maneira, tendo os termopares que detectam a entrada e a saída de calor no sistema, fica intuitivo administrar melhor a distribuição do mesmo.

Para uma maior dimensão da importância do controle do fluxo de calor (fluxo invertido) dentro do forno, as Figuras 19 e 20 apresentam o comportamento da chama e do fluxo de calor no interior do forno.

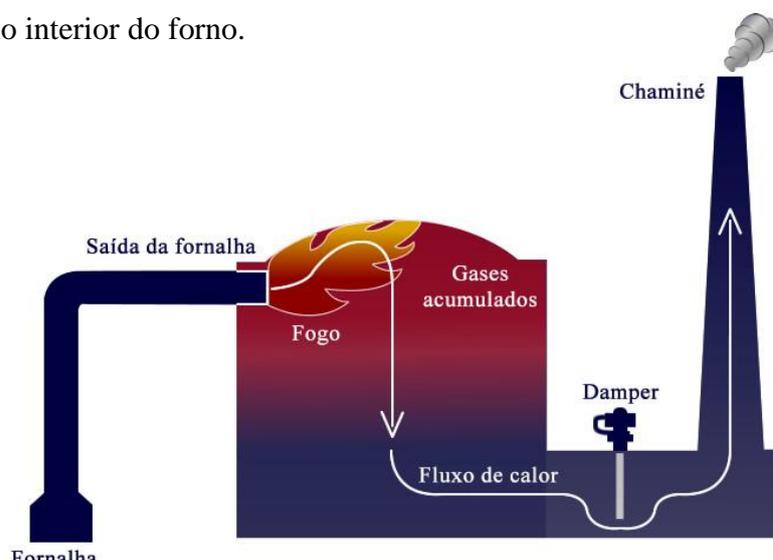


Figura 19 – Comportamento da chama e do fluxo de calor (*damper* fechado)

Fonte: Autor (2018)

Na Figura 19 pode-se verificar que o *damper* se encontra fechado em grande porcentagem, limitando a passagem de ar pela chaminé. Nesse caso, a incidência do fogo tende ao topo da abóboda e o vetor do fluxo de calor fracamente tende à saída da chaminé, passando primeiro pelo todo da abóboda. Dessa forma, os gases quentes provenientes da queima se acumulam na parte superior e o potencial calorífico do forno não é desperdiçado para a atmosfera.

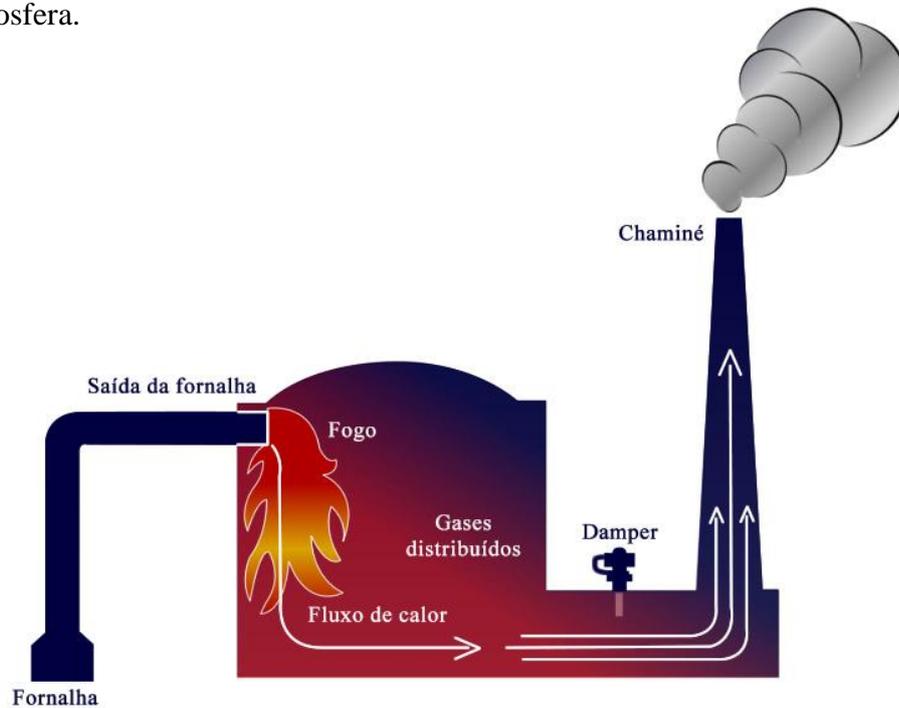


Figura 20 – Comportamento de chama e do fluxo de calor (*damper* aberto)

Fonte: Autor (2018)

Já na Figura 20 verifica-se que o *damper* se encontra aberto em grande porcentagem, permitindo a passagem de grande quantidade de ar pela chaminé. Nesse caso, o fogo é induzido à parte inferior do forno e o vetor do fluxo de calor tende fortemente à saída da chaminé, sem que seja direcionado previamente ao topo da abóboda. Dessa forma, os gases quentes provenientes da queima se distribuem pelo forno, incidindo mais na parte inferior e desperdiçando o potencial calorífico do forno para a atmosfera. É de fácil observação que essas extremas condições de comportamento do *damper* trazem resultados que não são os desejados para uma queima controlada. O meio termo entre as condições demonstradas acima, seria o ideal para resultar em um produto final em maior adequação com os padrões exigidos pelo mercado. Como essas características de reação à ação do *damper* dentro do forno podem variar devido à vários distúrbios externos, faz necessário desenvolver um controle que considere esses aspectos.

3.2.2.4 Definição da Problemática

Com a ampla visão permitida através das pesquisas bibliográficas, documentais e pelas visitas técnicas, pôde-se vislumbrar todos os aspectos necessários para compreensão do gargalo de produção existente na etapa da queima do processo cerâmico em questão. Avaliado como sendo um problema que afeta a maioria das indústrias cerâmicas, os gastos provenientes da baixa eficiência das queimas merecem uma atenção especial, para que sejam minimizados ao máximo.

O que acontece atualmente é que o gasto com combustível para alimentação da etapa de queima é exacerbado, elevando em muito o custo do produto final. Como se não bastasse a elevação do custo, a falta de controle durante o processo de queima confere características indesejadas às peças, diminuindo seu valor de mercado. Além de todo o problema para controlar a queima gradual dentro do processo, as temperaturas são atingidas de forma inconstante no interior do forno, gerando uso descontrolado do combustível na tentativa de minimizar tais inconsistências.

A comporta que controla a saída de ar pela chaminé não é um componente controlado dentro do processo atual. Com base na experiência do operário, podendo esta ser vasta ou não, a comporta é deixada em uma posição genérica que não prejudique a operação. Sendo que, esse componente possui alta influência no processo de queima, podendo ajudar no controle dos dois fatores que mais desestabilizam o processo: o consumo de combustível e a proporção de queima.

Para melhor entendimento da questão, verificou-se em campo, que na grande maioria das vezes a comporta estava aberta em demasia. Isso faz com que os gases da combustão sejam todos “sugados” pelo caminho de exaustão. Dessa maneira, o calor não se acumula na abóbada, desperdiçando seu potencial calorífico e resultando em queimas totalmente irregulares.

Diante da reação do sistema e através das respostas de aferição dos termopares, os forneiros acrescentam mais combustível na intenção de aumentar a temperatura, compensando as perdas que eles mesmos nem têm ciência. O gasto de combustível em uma situação como essa é bem maior, sem contar que a proporção entre a quantidade de combustível e o aumento de temperatura não é corretamente percebida. Fica constatado que não existe uma utilização equilibrada e otimizada dos recursos.

No exemplo observado em prática, a comporta que regula a saída de ar pela chaminé deveria ser fechada de forma a permitir o acúmulo dos gases de combustão do interior da abóbada. Dessa forma, esses gases iriam se ajuntando, queimando as primeiras fileiras de carga e conseqüentemente as seguintes, à medida que as peças iriam perdendo umidade, sofrendo retração e permitindo a passagem dos gases para as fileiras inferiores. A temperatura também atingiria mais rapidamente os valores conhecidos e definidos para cada nível, evitando o acréscimo desnecessário de combustível e uniformizando um pouco mais a queima da carga.

Como pode ser observado, a abertura da comporta basicamente controla o fluxo dos gases quentes no interior do forno. Isso significa dizer que além de promover o acúmulo dos gases no interior da abóbada como explicitado no parágrafo acima, esse controle é capaz de auxiliar no deslocamento do gradiente de temperatura, uma vez que determinado nível de queima já atingiu seus resultados baseados no tempo e nas temperaturas pré-estabelecidas. Dessa forma, o controle da queima proporcional é amplamente facilitado, resultando em peças mais padronizadas, com custo reduzido, maior valor agregado, com tempo de produção encurtado e com menores impactos ambientais.

A proporção ideal para controle da abertura da comporta não é conhecida, seu controle é feito de maneira completamente experimental. O desenvolvimento de um sistema de controle capaz de responder pelo comportamento desse componente, levando em conta todos os fatores que possam interferir no sistema, seria de grande contribuição para a realidade das cerâmicas que perdem lotes de produtos em disparidade com as especificações técnicas. Sendo assim, essa é a definição da problemática abordada nessa pesquisa.

3.2.3 Avaliações Técnicas

Existem ainda algumas características técnicas que devem ser analisadas antes do desenvolvimento do controle, para que sua lógica esteja de acordo com alguns conceitos físicos fundamentais. Alguns dados importantes sobre o objeto de estudo foram levantados durante a fase da pesquisa de campo, mediante testes e observações. As informações mais importantes são dispostas a seguir:

3.2.3.1 Temperaturas de Referência

Sabe-se que a temperatura ideal para queima da cerâmica vermelha gira em torno de 900 °C para tijolos e 950 °C para telhas. Temperaturas acima dessas trazem às peças cerâmicas características de vitrificação, onde as mesmas assumem aspectos não desejados ao

processo (Vieira; Teixeira; Monteiro, 2009). Com base no histórico de queima do forno em estudo, sabe-se que chegar à essa temperatura padrão é algo possível, porém sem a ação correta dos elementos de controle do processo a média das queimas atinge valores de temperatura em torno de 800 °C. Da mesma forma, devido à dissipação do calor, as temperaturas na base da carga giram em torno de 600 °C sendo muito instáveis e suscetíveis de erros. Apesar disso, constata-se que em sua maioria as peças da parte inferior do forno se apresentam como um bom resultado, devido aos seus formatos vazados e ao acúmulo de gases no chão do mesmo. O problema maior encontrado nos lotes de peças cerâmicas ao final das queimas se encontra nas peças com posições intermediárias, devido ao fluxo de calor desordenado promovido pela falta de controle dos recursos supracitados. Mediante essas informações, este projeto considerou a temperatura referência de T9 (entrada do forno) como sendo 900 °C e a temperatura referência de M4 (saída do forno) como sendo 600 °C.

3.2.3.2 Eficiência Térmica

Tendo os valores de referência dos termopares T9 e M4, pode-se controlar as curvas geradas por suas aferições. Do ponto de vista da lógica, uma melhor distribuição do calor no interior do forno tenderia a igualar as temperaturas entre os níveis de aferição pré-definidos, porém do ponto de vista da Física essa linha de pensamento está incorreta.

Para que se garanta o fluxo de calor no interior do forno, deve-se garantir a diferença de potencial calorífico entre os níveis de aferição. Sendo assim, como naturalmente a curva gerada por T9 aponta para temperaturas mais elevadas do que as temperaturas da curva gerada por M4, esse fluxo de calor das camadas superiores da carga para as inferiores irá acontecer. Caso as temperaturas se igualassem, o que não é possível em um ambiente real, esse fluxo de calor não existiria - invalidando toda a proposta do objeto de estudo em questão.

Garantindo que as curvas se estabilizem o mais rápido possível nas temperaturas de referência adotadas nesta pesquisa, garante-se também um fluxo de calor uniforme e contínuo sobre a carga disposta no interior do forno. Existe um tempo estabelecido de 50 horas após estabilização da temperatura de entrada no valor de referência de 900 °C. Esse tempo também foi adotado nesta pesquisa com base nos padrões de referência que os forneiros seguem na cerâmica em estudo. Tendo mantido a queima estável por esse tempo pré-determinado, os gases quentes serão melhor distribuídos quanto à sua incidência sobre a carga, garantindo a eficiência do processo e uma queima mais homogênea, livre de tantas variações.

A eficiência térmica η é baseada na diferença da quantidade de calor que entra no sistema Q_h e a quantidade de calor que sai Q_c (Trabalho W), dividida pela quantidade de calor que entra. Esse mesmo conceito pode ser aplicado utilizando-se a temperatura como referência, sendo T_h a temperatura de entrada e T_c a temperatura de saída (Pereira, 2018). As Equações (5) e (6) demonstram essa relação quantidade de calor e temperatura.

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}; \quad (5)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}. \quad (6)$$

Seguindo essa lógica, quanto maior a diferença de potencial entre as curvas de temperaturas geradas pelas aferições de T9 e M4, maior o valor da eficiência térmica daquela queima. Em outras palavras, comparando uma queima que apresenta a diferença de valores entre essas curvas de forma desordenada e outra que apresenta essa diferença entre as curvas de forma controlada e estável, a melhoria na eficiência é garantida e se faz visível mediante o controle. A Figura 21 mostra a diferença de potencial necessária às curvas do ponto de vista da eficiência para uma curva na ausência do controle e outra controlada e estável.

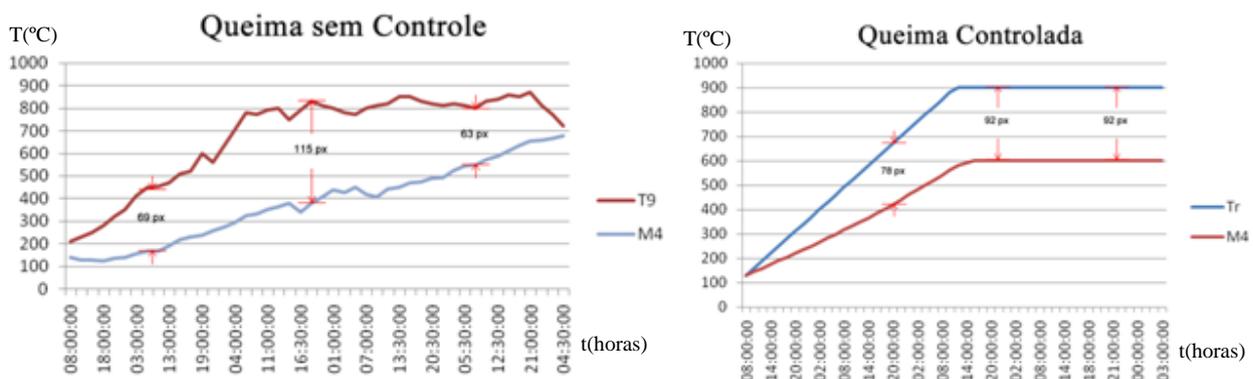


Figura 21 – Condições para garantia do fluxo de calor e eficiência térmica

Fonte: Autor (2018)

3.2.3.3 Distribuição de Carga

Com base nos acompanhamentos das queimas realizadas nos últimos meses, tendo como foco a arrumação das peças cerâmicas no interior do forno, verificou-se um padrão na disposição dessas peças. As peças maiores e vazadas são agrupadas de maneira mais próxima

na parte inferior do forno, ao passo que as peças menores e maciças são agrupadas com um espaçamento maior na parte superior.

Segundo informações adquiridas nas entrevistas de campo, essa arrumação sempre segue esse padrão na tentativa de equilibrar a quantidade de massa e espaços vazios (sem resistência) dentro do forno cerâmico. Esse modelo de layout para alocação dos diferentes tipos de peças no interior do forno foi definido segundo o comportamento físico esperado para os gases quentes – sabe-se que esses gases tendem a acumular-se na parte superior da abóbada. As peças dispostas na parte superior da carga, por serem maciças, de fato demandam um poder calorífico bem maior. Conclui-se que apesar do comportamento natural esperado para gases quentes em um ambiente fechado, mesmo com a ação de um controle ideal, a temperatura no tipo de peça alocada na base da carga nunca atingirá a mesma temperatura do tipo de peça alocada na parte superior.

A proposta de solução desenvolvida nesta pesquisa segue o modelo genérico de layout utilizado para diferentes tipos de peça, constatado em 100% dos casos avaliados. Levando tudo isso em consideração, sabe-se que para um layout diferente, tanto o comportamento real da queima quanto as considerações do controle desenvolvido sofreriam alterações significativas. Como visto nas últimas queimas reais, a carga maciça é alocada na parte superior da carga e a vazada na parte inferior. A Figura 22 mostra o layout considerado para a solução de controle proposta na presente pesquisa.

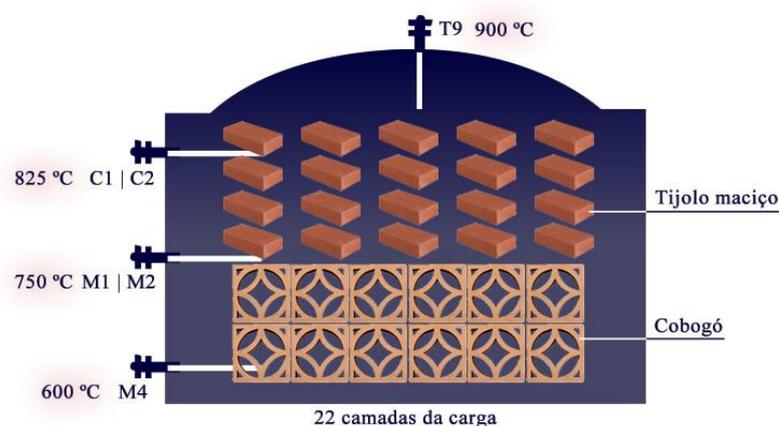


Figura 22 – Arrumação padrão da carga considerada na pesquisa

Fonte: Autor (2018)

3.2.3.4 Consumo

A cerâmica em estudo gasta cerca de 13.000 Kg de pó de serra por queima atualmente, levando em consideração a vazão máxima de operação das máquinas de pó-de-serra. Cada saco de pó de serra com 12 Kg, pode ser encontrado no mercado por até R\$2,20 quando adquirido em larga escala. Com base nesses valores, uma queima completa custaria em média R\$2.380 em relação ao gasto com combustível. Sabe-se ainda, que 30% do custo total do produto final cerâmico é advindo da etapa da queima (Nassetti, 2018; Sposto, Medeiros, Ramos, Naya, & Morais, 2007). Levando em conta que o produto em questão possui baixo valor agregado quanto ao preço de venda no mercado e que os valores apresentados acima são expressivos por si só, qualquer melhoria no sentido da economia de recursos no processo é sempre muito bem-vinda.

3.2.3.5 Emissão de Gases

A emissão de gases poluentes à atmosfera proveniente da etapa de queima na indústria cerâmica é algo comum desde sempre. Esses gases acabam sendo lançados diretamente à atmosfera sem nenhum tipo de tratamento ou aproveitamento de seu poder calorífico. Eles são tão poluentes quanto o tipo de elemento químico envolvido no processo de preparação da massa cerâmica (matéria-prima). As principais emissões resultantes desse tipo de queima são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x). De acordo com a resolução nº 436 do Conselho Nacional do Meio Ambiente [CONAMA], órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente, o limite máximo para emissão de monóxido de carbono ao meio ambiente é de 3.250 mg/Nm³. Na literatura consta que a taxa de emissão de CO, por fornos do tipo e dimensões consideradas nesta pesquisa, tem sido de 24.478 mg/Nm³ aproximadamente para uma queima de 120 horas (Nascimento; Pavanello; Wojciechowski; Rodrigues; Muniz, 2016). Ou seja, a emissão de poluentes tem ultrapassado em muito os limites estabelecidos por norma e qualquer melhoria quanto à emissão de poluentes também é muito bem-vinda ao processo.

3.2.4 Modelo Matemático do Objeto de Estudo

Para o modelo matemático do objeto de estudo, as Equações (1) e (4) estão acopladas, uma vez que a variação da temperatura está intimamente ligada à variação da umidade. Por meio de um software, foi realizada a modelagem dos dados experimentais do forno em questão, o melhor sistema de equações diferenciais que representa o processo é dado por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \beta(T_s - T) - \gamma U ; \quad (7)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\gamma U ; \quad (8)$$

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

3.2.4.1 Confirmação do Modelo Matemático

Antes de fazer as análises com o modelo matemático descrito para esta pesquisa, faz-se necessário detalhar as equações diferenciais. Sabe-se que:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} T_L) = \nabla^2 T_L \text{ (Laplaciano da temperatura),} \quad (9)$$

onde:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 T_L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_L}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_L}{\partial z^2} . \quad (10)$$

Uma aplicação 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 quer alcançar é T_s , a curva vai estabilizar em T_s e a equação passa a ser:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \beta(T_s - T) , \quad (11)$$

onde β é uma constante de condução térmica. Em geral considerando que o termopar é uma haste de cobre, tem-se $k=3382.000 \text{ J/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\alpha=1153. \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Onde α é a difusidade térmica e k é a condutividade térmica (unidade de temperatura). Tem-se também que ρ é a massa específica e C_p o calor específico, para:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} . \quad (12)$$

A temperatura é uma função da posição e do tempo $T(t,x)$. Para entender β deve-se considerar a condução do calor em uma haste (o termopar):

$$T(0, \vec{x}) = f(x) = \text{temperatura inicial ou final.}$$

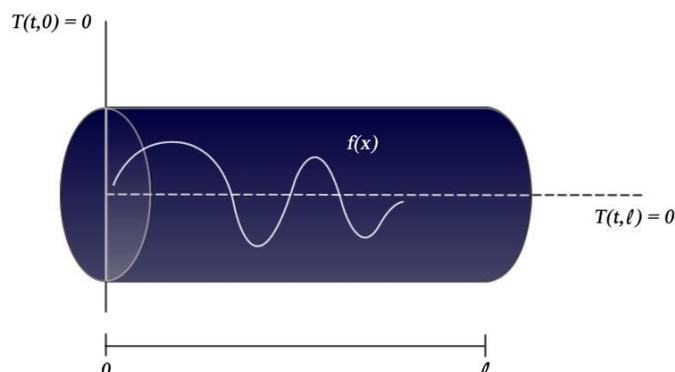


Figura 23 – Análise do comportamento da curva através da haste (termopar)

Fonte: Autor (2018)

Considerando a técnica de separação de variáveis para esse problema: $T(t,x) = \tilde{T}(x)T(t)$.

Só existe propagação de calor em x , desta forma:

$$\frac{\partial T(t,x)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(t,x)}{\partial x^2} ; \quad (13)$$

$$\tilde{T}(x) \frac{\partial T(t)}{\partial t} = \alpha T(t) \frac{\partial^2 \tilde{T}(x)}{\partial x^2} . \quad (14)$$

Então pode-se separar as variáveis como:

$$\frac{\partial T(t)}{\alpha T \partial t} = \frac{\partial^2 \tilde{T}(x)}{\tilde{T} \partial x^2} = -\lambda , \quad (15)$$

que resulta em:

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} = -\alpha \lambda T(t) . \quad (16)$$

Para estabilizar, tem-se:

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} = \underbrace{-\alpha\lambda(T - T_s)}_{\beta}. \quad (17)$$

A equação em x é dada por:

$$\boxed{\frac{\partial^2 \tilde{T}(x)}{\partial x^2} = -\lambda \tilde{T}}. \quad (18)$$

Da mesma forma para a **umidade** tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x^2}. \quad (19)$$

Sendo $U(t, x) = U(t) \tilde{U}(x)$, tem-se:

$$\frac{1}{DU} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\rho \partial x^2} = -\eta; \quad (20)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\eta DU; \quad \text{sendo } \eta D = \gamma. \quad (21)$$

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

$$U = \frac{m_a}{m_s}, \quad (22)$$

onde m_a é a massa contida no produto e m_s é a massa do produto depois da queima. Então U é uma grandeza adimensional. Já D é o coeficiente de difusão de massa. Em função da temperatura ele é dado por:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (23)$$

onde D_0 é o coeficiente de difusão máximo, E_A é a energia de atuação em dimensões, ρ é a energia por quantidade de substância e R é a constante dos gases perfeitos. Para o ar (meio considerado na pesquisa) $D \cong 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Então pela dinâmica do sistema, quanto maior a temperatura menor a umidade. Utiliza-se um “*ansatz*” que resulta na constante de acoplamento (ligação entre temperatura e umidade):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\beta(T - T_s) - \gamma U ; \quad (24)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\gamma U . \quad (25)$$

Resolvendo a equação da **umidade** como consta no Apêndice A, obtêm-se a resposta:

$$\boxed{U = U_0 \cdot e^{-\gamma t}}, \quad (26)$$

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

Resolvendo a equação da **temperatura** como consta no Apêndice B, obtêm-se a resposta:

$$\boxed{T = T_s - \left\{ x_0 (e^{-\gamma t} - e^{-\beta t}) + (T_s - T_0) e^{-\beta t} \right\}}, \quad (27)$$

onde T_s é a temperatura final, β é a constante de condução térmica, T_0 é a temperatura inicial e t o tempo.

3.2.5 Desenvolvimento da Lógica de Controle

Para desenvolvimento da parte lógica do sistema de controle, foram utilizados os recursos do MatLab® (*simulink*), *PC Worx Express (OPC configurator / OPC Test Client)* e o *Intouch* (supervisório). Todos esses recursos em integração são responsáveis pela escrita da lógica de controle e simulação para aplicação da mesma, de forma a serem realizados testes até que o algoritmo esteja pronto para implementação. Os softwares e Hardwares foram escolhidos para o projeto por conta de sua disponibilidade em laboratório da instituição de ensino apoiadora.

O recurso do *Simulink*, presente no MatLab®, contém o diagrama de bloco com a interação do processo. Ele é responsável por simular o comportamento do processo real que está sendo trabalhado, permitindo o desenvolvimento do controle mediante testes e adequações. Dessa maneira, por meio de simulação, fica mais fácil o desenvolvimento de uma lógica de resposta proporcional às intempéries vividas pelo sistema físico real.

O *PC Worx Express*® é o software responsável pelo desenvolvimento do algoritmo de controle, construído em linguagem de programação *Ladder* e responsável pela principal estrutura de comportamento lógico do sistema de controle. Através desse algoritmo que serão definidos os padrões e as regras fundamentais para que o sistema efetue seu controle. A linguagem de programação utilizada faz uso de representações gráficas de contatos, bobinas e blocos operacionais para construção da lógica de controle.

O *InTouch* é um sistema supervisor, onde é criada a Interface Homem-Máquina para interagir e acompanhar o funcionamento da lógica de controle desenvolvida. Na verdade, ele é o ponto de comunicação entre o usuário e o sistema de controle. Por meio dele são efetuados os testes de funcionamento, que permitem correções e aprimoramento da lógica desenvolvida, antes de ser implementada como um sistema real. Dessa forma, são evitados danos, erros e riscos maiores.

Para que o modelo lógico funcione corretamente, é necessário que esses recursos trabalhem em conjunto e se comuniquem com o Controlador Lógico Programável, principal responsável pelo controle do processo. Para configurar essa comunicação, o software de desenvolvimento da lógica de controle traz os complementos *OPC Configuration*, responsável pela interação da lógica de controle com o CLP *Phoenix Contact* e o *OPC Test Client*, responsável pela interação entre as variáveis utilizadas na lógica referentes ao CLP junto ao *Simulink*. A comunicação entre as aplicações ocorre por meio de um protocolo de comunicação de dados chamado OPC. A conexão *Simulink* – *PC Worx* ocorre segundo o modelo cliente (MatLab®) servidor (*Phoenix OPC Server*).

3.2.5.1 Descrição da Lógica de Controle

A lógica de controle tem por objetivo controlar as curvas de temperatura expressas pelas aferições dos termopares T9 e M4. Assim como constatado na Seção 3.2.3.1 – “Temperaturas de Referência”, deste mesmo capítulo, a curva expressa pelo termopar T9 deve estabilizar o mais rápido possível na temperatura referência de 900 °C. Da mesma maneira, a temperatura expressa pelo termopar M4 deve estabilizar na temperatura referência de 600 °C,

mantendo assim o fluxo de calor constante através de toda a carga e garantindo uma distribuição de calor mais uniforme.

Após todo o estudo descrito no decorrer da pesquisa, determinou-se que a lógica de controle deve seguir os seguintes passos:

1º - Para início da queima, o *damper* deve estar mais aberto, permitindo a passagem de oxigênio pelas fornalhas e possibilitando a alimentação do fogo – essa deve ser a condição inicial anterior à atuação do controle;

2º - Uma vez estabilizada a atuação das fornalhas, será dado início à atuação do controle. O *damper* deve fechar ao máximo, obedecendo o limite de 10%, para que a temperatura no topo (termopar T9) atinja o *setpoint* (900 °C) o mais rápido possível;

3º - Garantindo o acúmulo de gases quentes na parte superior do forno e conseqüente o aumento de temperatura, o *damper* deve abrir gradualmente em relação às aferições de temperatura do termopar do topo, permitindo o aumento de temperatura do termopar da base (M4) o quanto antes.

4º - Ao mesmo tempo que a temperatura de *setpoint* do topo (900 °C) é garantida, a temperatura de *setpoint* da base (600 °C) também deve ser alcançada.

5º - Uma vez que a condição otimizada para a queima foi alcançada, o controle deve garantir que a queima prossiga estável dentro dos padrões supracitados. Esse tempo de queima controlado permite um fluxo de calor constante no interior do forno, adequando o calor nos espaços físicos e evitando as bruscas variações que costumam ocorrer na ausência do controle.

6º - Após o tempo de queima de 130 horas, assume-se por dados experimentais, que os tijolos já estão totalmente cozidos em uma queima controlada. O controle é desativado e as aberturas do forno são abertas em sua totalidade, findando o resfriamento da carga em seu interior. Dá-se fim ao processo de queima.

Observações pertinentes: *Vale ressaltar que o limite de abertura do damper foi definido como medida de segurança, assim como evidenciado na Seção 3.2.2.2.2 – “Entrada de Combustível” e a velocidade máxima de aumento da temperatura que incide na carga também foi controlada, assim como expresso na Seção 3.2.2.3.2 – “Variação de Temperatura”. Essas medidas foram adotadas com o objetivo de evitar danos técnicos nas características físicas do produto final. As temperaturas de referência do topo e da base do*

forno também foram estipuladas com base nos conceitos documentados na Seção 3.2.3.1 – “Temperaturas de Referência”. O controle descrito leva em consideração a distribuição de carga comumente usada na rotina de queima da cerâmica analisada, assim como fica claro na Seção 3.2.2.2.5 – “Distribuição de Carga”. O tempo de queima usual na indústria cerâmica em questão é determinado na Seção 3.2.2.3.1 – “Tempo de Queima” e pode ser reduzido mediante resultados apresentados pela ação do controle do processo.

Para o CLP, através do software de desenvolvimento *PC Worx*, a lógica de controle foi construída na linguagem de programação *Ladder*. Utilizando os mesmos conceitos dos diagramas de comandos elétricos que utilizam bobinas e contatos, o diagrama de contatos *Ladder* visa representar graficamente um fluxo de “eletricidade virtual”. Esse diagrama conta com a lógica de controle para o incremento de 30 °C à cada 2 horas à temperatura de T9, acionamento do alarme de temperatura alta (acima de 950 °C) e o controle da abertura do *damper* proporcional ao aumento da temperatura de T9. Conta também com a implementação de dois blocos “fPID” que descrevem os controles PID responsáveis pelo comportamento da alimentação e do *damper*.

A lógica de controle desenvolvida para os comportamentos da alimentação (com base na aferição de T9) e o *damper* (com base na aferição de M4) teve como base a técnica de controle PID e estratégia *Feedback*. Como visto na Seção 2.7.4 – “Técnica de Controle PID”, pelo ajuste dos parâmetros proporcional, integral e derivativo do PID, chega-se à melhor resposta de controle de acordo com o comportamento do processo. Esses parâmetros (K_p , K_i e K_d) são passados ao bloco “fPID” por meio do *Simulink*, com origem no Supervisório. Já os valores de temperatura considerados no controle são fornecidos pela simulação implementada no *Simulink*, por meio das funções de transferência que descrevem as curvas de T9 e M4 (mais informações sobre essas funções de transferência constam na Seção 3.2.6.1 – Arquitetura de Simulação adiante). A Figura 24(a) mostra os blocos “fPID” implementados no sistema de controle e a Figura 24(b) as lógicas para o comportamento da alimentação, do alarme e do *damper*.

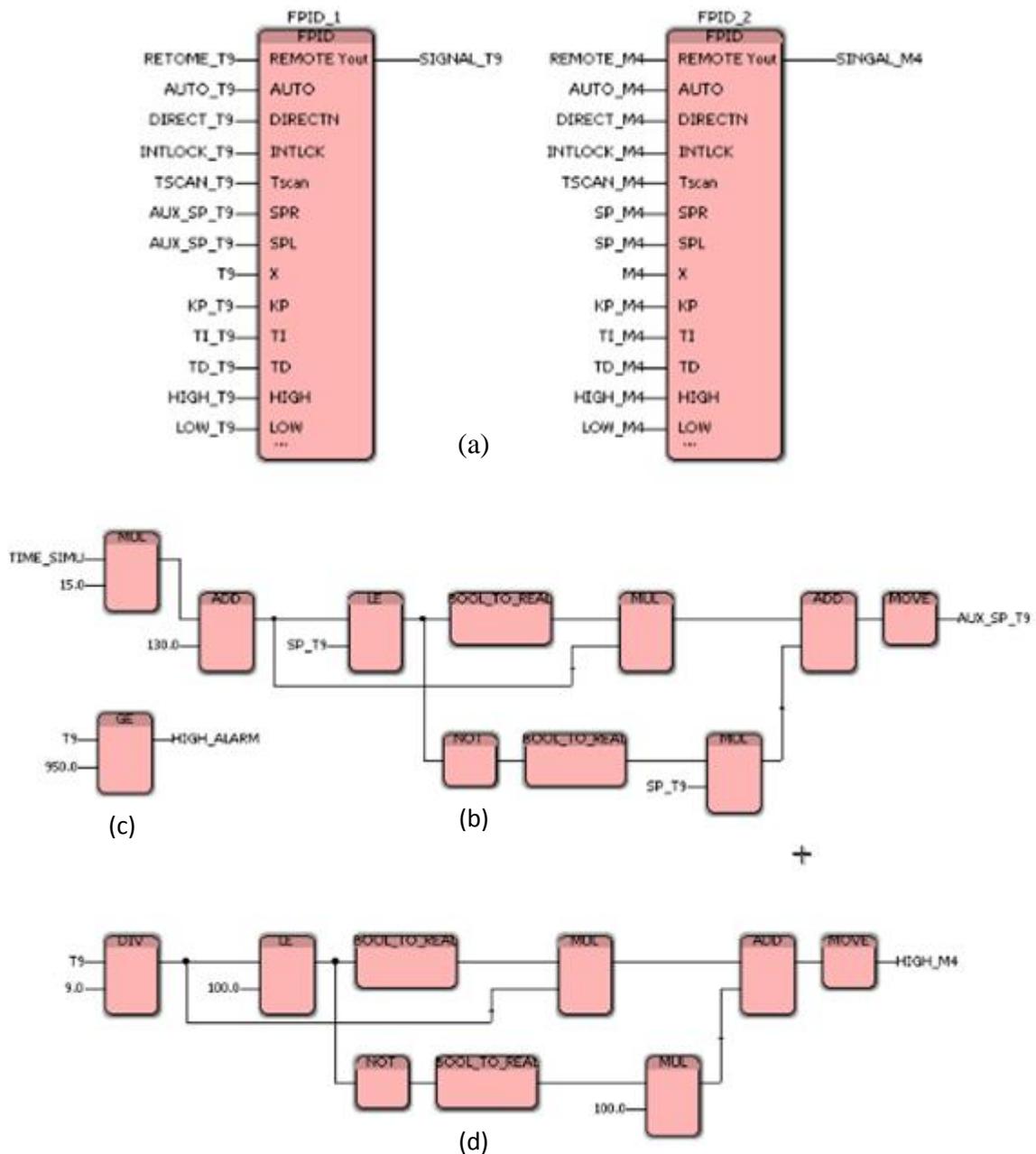


Figura 24 – Lógica de controle (PC Worx)

Fonte: Autor (2018)

Controle PID: Os parâmetros proporcional, integral e derivativo são recebidos pelo *PC Worx*, via *Simulink*, advindos do *InTouch*, pois o operador é quem decide os melhores valores a serem utilizados para os mesmos. O controle nada mais é do que a aplicação desses parâmetros sobre o valor de erro (diferença entre o valor de *setpoint* e a resposta real do sistema detectada pelos elementos sensores) gerado pelo *feedback* da malha de controle. Essa intervenção no sistema que vai garantir o comportamento controlado das curvas de T9 e M4. Os blocos “fPID” demonstrados na Figura 24(a) são os responsáveis por esse controle. Esses blocos são encontrados de forma padrão no software de desenvolvimento e trazem toda a estrutura PID necessária, bastando configurar as variáveis que entrarão e sairão dele.

Controle da máquina de pó-de-serra (alimentação): a aferição de temperatura feita pelo termopar T9 oferece os dados com ligação mais fiel quanto ao acréscimo de temperatura ao sistema através da alimentação. Para que a temperatura referente à T9 aumente 30 °C à cada 2 horas, a lógica de controle representada na Figura 24(b) foi implementada no *PC Worx*. Nela pode-se observar que o tempo de simulação (advindo do *Simulink*) é multiplicado por 15 (que é o coeficiente linear da curva de aumento da temperatura de T9). Esse valor é somado ao valor de 130 (temperatura que se inicia o processo de queima). Através do bloco de comparação “LE” (menor ou igual) e do bloco “*Bool to Real*” (que transforma sinais booleanos para reais), a lógica de controle diz ao PID em tempo real que o *setpoint* para o sinal de controle de T9 é acrescido de valor em um espaço de tempo determinado.

Controle do alarme de alta temperatura (Figura 24.c): O alarme implementado na lógica é extremamente simples. Ele faz uso apenas de um bloco de função de comparação GE. Esse bloco compara a variável de entrada com um valor pré-estabelecido na regra “maior que ou igual”. Sendo assim, caso o valor de temperatura de T9 seja maior ou igual a 950 °C, o valor binário será “1” e acionará o alarme informando temperatura demasiadamente alta (não desejada pelo controle). Como esse valor de temperatura alta limite (950 °C) foi utilizado apenas para a implementação do alarme visual no controle, por meio das pesquisas de campo efetuadas na pesquisa, ele foi escolhido com base nos relatos das partes interessadas no processo. Constatou-se então que valores de temperatura acima de 950 °C são indesejados no processo devido ao impacto sobre as características técnicas do produto final, portanto essa situação deve ser avisada ao operador via supervisório.

Controle de abertura proporcional do *Damper* (Figura 24.d): Seguindo praticamente a mesma lógica de controle de T9, essa parte de controle do M4 recebe o sinal da variável T9 e o divide por 9 (para que o máximo valor enviado à M4 não seja superior à 100). Por meio do mesmo bloco de comparação “LE” e do bloco “*Bool to Real*” utilizado no controle de T9, a lógica de controle diz ao PID em tempo real o valor (em porcentagem) que o *damper* deve abrir proporcionalmente ao aumento de temperatura aferido por T9.

3.2.5.2 Arquitetura de Controle

No sistema real, as temperaturas aferidas pelos termopares (temperaturas no interior do forno) são enviadas pelos mesmos à um CLP, o qual contém a lógica de controle pronta a processar as informações e intervir no processo. No uso da simulação, que é o caso deste

trabalho, o comportamento da queima é simulado via *Simulink* o qual emite os sinais de T9 e M4 para o CLP atuar de igual forma.

Na arquitetura de controle foi adicionado o recurso para controle manual ou automático do processo. O controle automático busca estabilizar as temperaturas aferidas pelos termopares T9 e M4 o mais rápido possível, através da abertura / fechamento do *damper*, considerando um controle de alimentação com aumento gradativo de 30 °C à cada 2 horas. No modo automático nenhuma ação do operador é requisitada. Já o controle manual permite, através do supervisor, que o operador escolha as temperaturas de *setpoint* do processo, o valor do sinal de controle que rege a alimentação e a porcentagem de abertura do elemento final de controle (*damper*).

Falando mais especificamente quanto ao modo automático de controle, o CLP atua no controle da adição de combustível (pó de serra) nas fornalhas do forno e no controle da abertura / fechamento do *damper* (passagem de ar quente pela chaminé). De acordo com os dados de temperatura aferidos pelos termopares, o CLP envia sinal de controle proporcional à ação que deseja realizar para a máquina de pó de serra e para o *damper*, interferindo diretamente na fonte e no fluxo de calor do sistema. Como o foco do estudo é o controle da ação do *damper* (temperatura de M4), a entrada de comburente foi considerada em alimentação com nível ideal, conforme foi abordado na Seção 3.2.2.2.2 – “Entrada de Combustível”. A Figura 25 representa o modelo esquemático geral do sistema de controle desenvolvido.

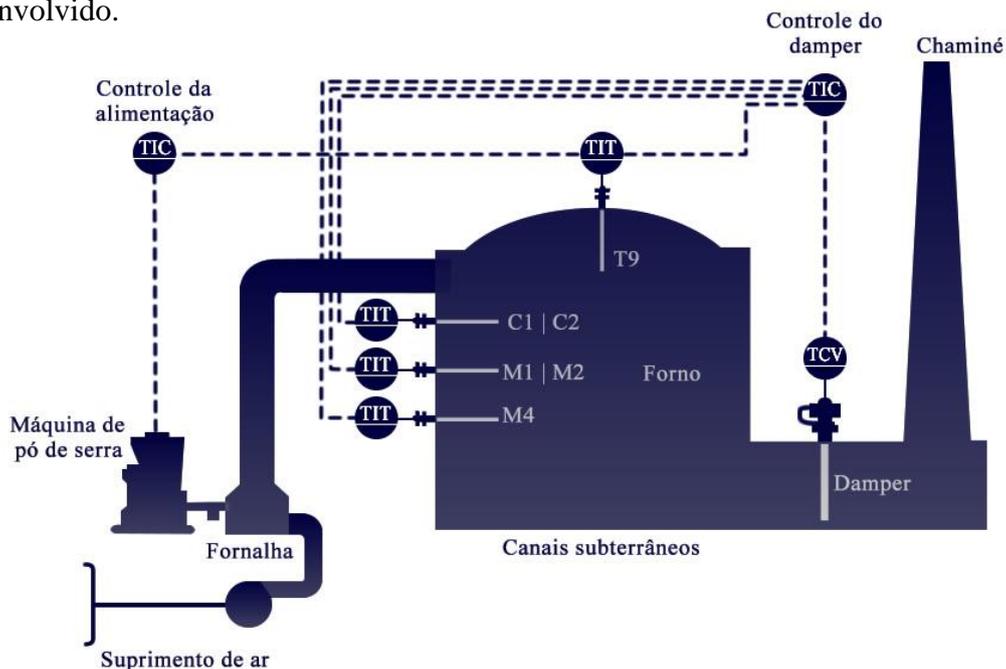


Figura 25 – Modelo esquemático do sistema de controle desenvolvido

Fonte: Autor (2018)

3.2.6 Simulação

A simulação nada mais é do que a representação virtual do comportamento do sistema. No caso do projeto em questão, a simulação se encarregou em dizer ao sistema de controle como seria o comportamento do processo de queima estudado. Mais especificamente, a simulação mostra o comportamento das curvas de T9 e de M4 em resposta aos sinais de controle emitidos sobre elas. Através da interação entre o software de simulação (*Simulink*), o software de controle (*PC Worx*) e o software de supervisão (*Intouch*), a lógica de controle pode ser testada e aprimorada de forma a ser implementada apenas em sua fase final. O processo de simulação evita perdas, erros e acidentes, enfrentando todos os possíveis erros por antecipação, diminuindo o tempo de desenvolvimento do projeto.

3.2.6.1 Arquitetura de Simulação

Como o controle desenvolvido nesse projeto não foi implementado em campo, para que os parâmetros de controle (K_p , K_i e K_d) pudessem ser ajustados e a lógica de controle pudesse ser validada, uma simulação do processo de queima teria que interagir com esse controle. Essa simulação foi desenvolvida utilizando os recursos do *Simulink* contidos no MatLAB®, que utiliza diagramação gráfica para construção dos diagramas de bloco que descrevem o comportamento do processo real. Levando em consideração a estratégia de controle utilizada (*feedback*), as funções de transferência que relacionam a alimentação e a ação do *damper* com a temperatura entram como parte principal da lógica desenvolvida em *Simulink*, tendo associadas à elas todas as variáveis a serem consideradas na simulação. Lembrando que na técnica *Hardware-in-the-loop*, utiliza-se um controlador real junto à uma planta virtual (funções de transferência) para verificar a atuação do controle desenvolvido.

Para obtenção da função de transferência que descreve a dinâmica dos valores aferidos por T9, foi necessário avaliar como o sistema se comporta mediante um estímulo. Para tal foi realizado um teste de alimentação no forno em estudo com carga em seu interior, ingestão de combustível em capacidade máxima (100 Kg/m^3) e valor mediano de 55% para a abertura do *damper* (já considerando o limite para fechamento de 10%). Analisando os dados aferidos pelo termopar T9, o sistema que já é iniciado na temperatura de $130 \text{ }^\circ\text{C}$ devido ao pré-aquecimento reage com um aumento gradativo de temperatura de $48 \text{ }^\circ\text{C}$ por hora. A temperatura se estabiliza em $200 \text{ }^\circ\text{C}$, no tempo de 1h30min, sem variação na atuação do *damper*. A Figura 26 mostra o resultado do referido teste.

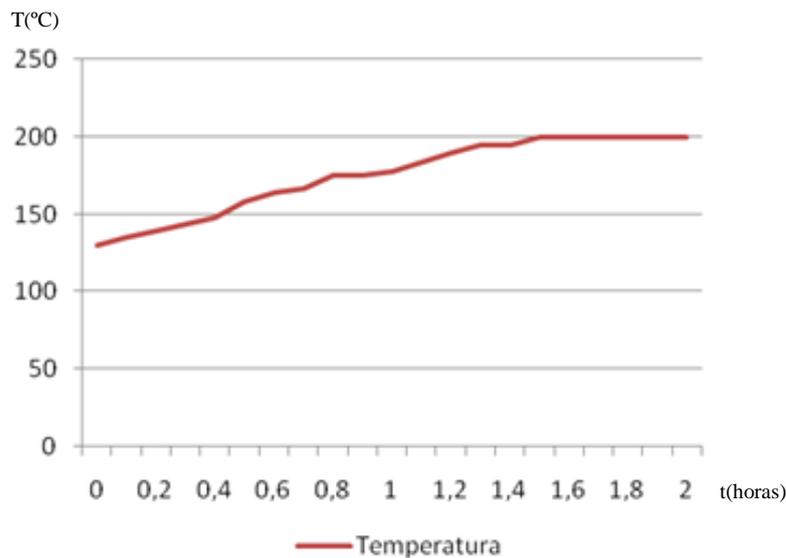


Figura 26 – Resposta gráfica ao teste de alimentação

Fontes: Autor (2018)

Verifica-se um comportamento de função de primeira ordem e segundo o tipo de estímulo utilizado no teste, uma resposta de entrada em degrau. Portanto, para obtenção de uma função nessas condições é necessário descobrir em qual valor de tempo a temperatura alcançou 63,2% de seu valor final. A Figura 27 mostra o padrão de resposta para uma entrada em degrau e sua definição de período em 63,2% do valor da curva.

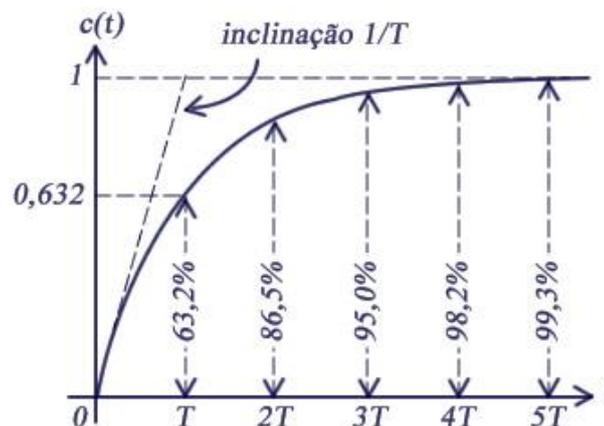


Figura 27 – Resposta a uma entrada em degrau

Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

Considerando então a temperatura final de 200 °C, foi descoberto qual instante de tempo corresponde ao valor de temperatura de 174,2 °C. A Figura 28 mostra os dados do teste de alimentação dispostos no MatLab® para gerar o gráfico que evidencia o dado necessário para obtenção da função de transferência.

```

dados_t9.m* x +
1 - T = [130 135 140 145 150 160 165 170 175 175 180 185 190 195 195 200 200
2 -       200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200];
3
4 - x = [0:0.1:2.8];
5
6 - plot(x,T,'b:s')

```

Figura 28 – Comandos MatLab® para plotagem gráfica

Fonte: Autor (2018)

Em posse do gráfico, constata-se que o valor mais próximo de 174,2 °C corresponde à 175 °C atingido em 0,8 horas. Valor esse a ser inserido na função de transferência que se pretende obter. A Figura 29 mostra o gráfico gerado através da metodologia supracitada.

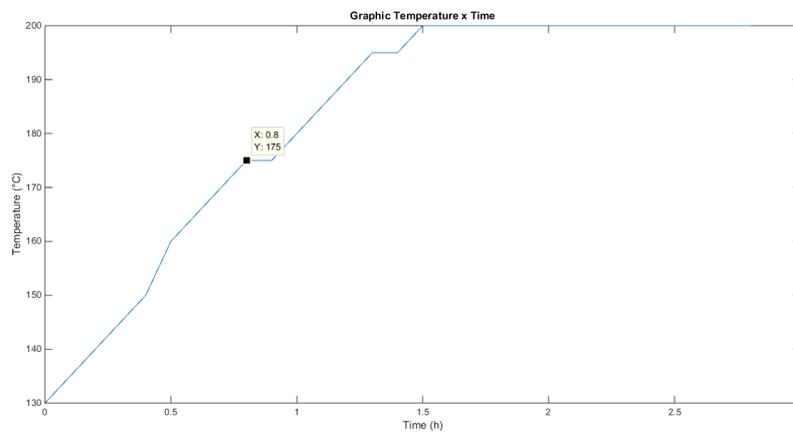


Figura 29 - Gráfico com dados para obtenção da função de transferência (T9)

Fonte: Autor (2018)

Obtendo esse dado é possível encontrar a função de primeira ordem que se aproxima do comportamento da curva. A Figura 30 mostra o código para obtenção dessa função também via MatLab® e a resultante “f” do mesmo.

```

dados_t9_2.m x +
1 - num = [70];
2 - den = [0.8 1];
3 - f = tf(num,den)
f =

```

$$\frac{70}{0.8s + 1}$$

Figura 30 – Obtenção da função de transferência (T9)

Fonte: Autor (2018)

Após obtenção da equação de primeiro grau foi feita a comparação da curva gerada pela mesma com a curva obtida anteriormente em teste. Essa comparação foi feita para verificar se as curvas são dinamicamente próximas. A Figura 31 mostra o código utilizado no MatLab® para plotar essa comparação e o gráfico gerado por esse código, comparando as duas curvas em questão.

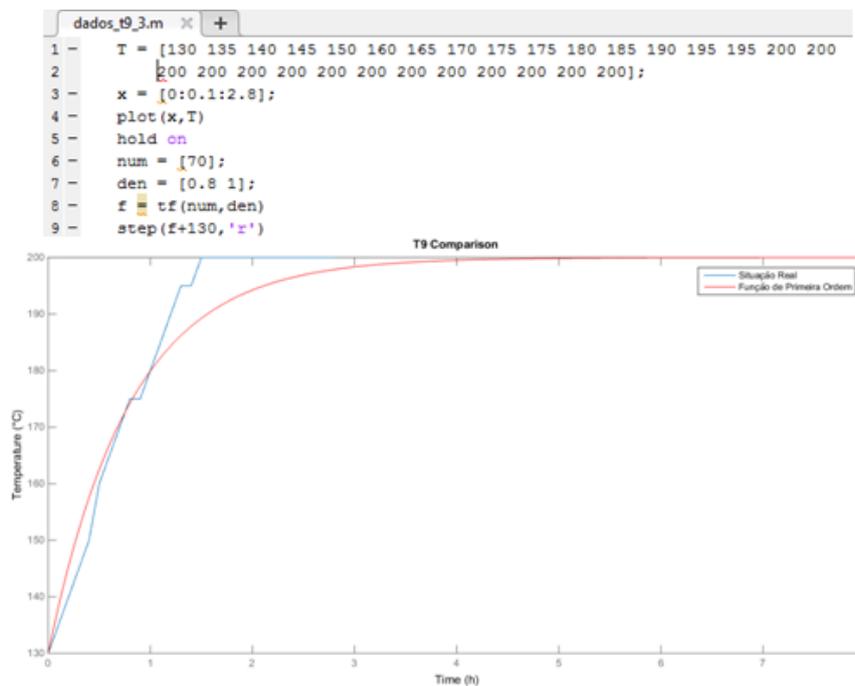


Figura 31 – Comparação entre a curva gerada pela função de transferência (T9) e a curva de teste inicial

Fonte: Autor (2018)

Analisando o gráfico verifica-se que a curva de primeira ordem gerada a partir da função de transferência apresenta um comportamento muito próximo à curva real, deixando perceptível apenas uma defasagem no tempo de acomodação no valor final da função de primeira ordem. Sabe-se que essa defasagem não é um fator muito relevante, tendo em vista que nos regimes transitórios e permanentes as curvas apresentaram comportamentos bem parecidos.

Devido às restrições do projeto quanto aos testes técnicos realizados em campo, não foi possível fazer o levantamento da curva de aquecimento do termopar M4 para quando o *dampner* inicia com atuação máxima. Um teste nessas condições no início da queima prejudicaria o processo, avariando toda a carga, podendo inclusive danificar a própria ferramenta. Sendo assim, a curva que descreve a dinâmica dos valores aferidos por M4 foi estimada através da modelagem das equações diferenciais da temperatura.

$$T = T_s - \left\{ \left(\frac{\gamma \cdot U_0}{\beta - \gamma} \right) \left(e^{-\gamma \cdot t} - e^{-\beta \cdot t} \right) + (T_s - T_0) e^{-\beta \cdot t} \right\}, \quad (44)$$

onde “ U_0 ” é a umidade inicial do sistema, considerada como 300 kg/m^3 ; “ γ ” taxa de decréscimo da umidade, definida como $0,11 \text{ Hz}$; “ T_s ” a temperatura final, considerada 900°C , “ β ” é a constante de condução térmica, definida como $0,04 \text{ Hz}$; “ T_0 ” é a temperatura inicial e “ t ” o tempo. Esses valores foram assumidos com base no melhor teste de parâmetros que descreve a curva de T9 presente na Seção 4.3 – “Validação do Modelo Matemático Desenvolvido” adiante.

Como a equação não supõe possíveis limitações, o fluxo ocorre de forma livre e isso corresponde a um transporte de temperatura que simula o *damper* completamente aberto. O código para gerar o gráfico que corresponde à equação de temperatura, e o gráfico propriamente dito, é representado na Figura 32:

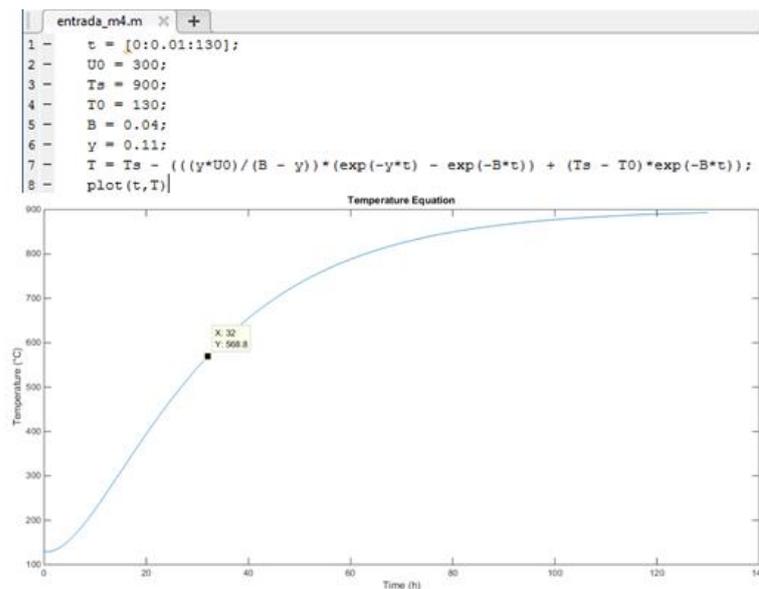


Figura 32 – Gráfico gerado pela equação da temperatura

Fonte: Autor (2018)

Considerando então a temperatura final como sendo 900°C , o valor que corresponde a $63,2\%$ desse valor é $568,8^\circ\text{C}$. Como pode ser observado a função alcança esse valor em 32 horas. Desses dados foi retirada uma função de transferência de primeira ordem. O código para obtenção dessa função, a função propriamente dita, bem como o gráfico de atuação dessa função podem ser vistos na Figura 33. Essa função corresponde ao atuador *damper*.

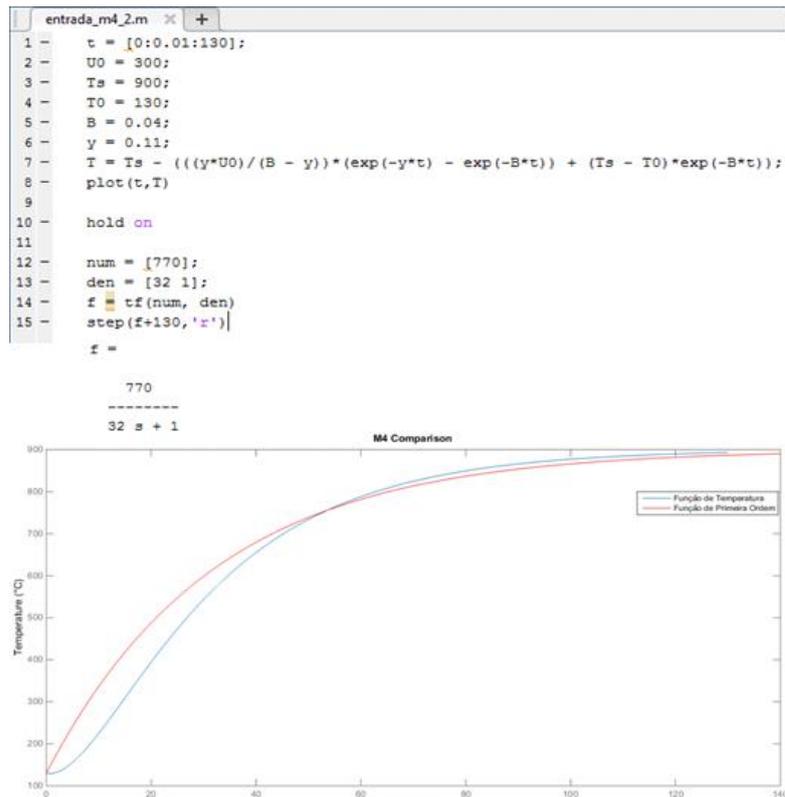


Figura 33 – Obtenção da função de transferência (M4) e o gráfico que descreve seu comportamento

Fonte: Autor (2018)

Como pode ser observado, a função de primeira ordem aproxima-se bastante do comportamento da função de temperatura quanto ao comportamento em regime permanente. No regime transitório por outro lado, apesar de não ter se comportado estritamente semelhante, é importante ressaltar que o comportamento do *damp*er não inicia com abertura total. Tal como está sendo proposto para o levantamento das curvas, não se é realizada uma resposta tão brusca de início, ficando por conta do controle a resposta de ambos. Dessa forma, a função de temperatura e a função de primeira ordem acabam tendo resultados bem próximos na prática.

3.2.6.2 Diagrama de Blocos no *Simulink*

No *Simulink* que ocorre a construção da simulação, por meio das funções de transferência que descrevem o comportamento da queima; a construção dos canais de comunicação entre o operador e o controlador; bem como a descrição de toda a dinâmica do processo, suas intempéries e tudo o que o mesmo envolve. Por conta da estratégia de controle *Feedback* utilizada, os diagramas de bloco construídos consideram os termopares como sendo os elementos sensores que enviam os valores reais encontrados no processo para serem comparados com o valor de referência (*setpoint*). Essa comparação gera um erro, que aciona

uma ação de controle para interagir com a planta do sistema, gerando novos valores a serem lidos pelos elementos sensores e enviados para novas comparações. Dependendo dos parâmetros de controle que são utilizados nessa lógica, essa comparação por meio da realimentação construída irá se repetir, até que o valor lido pelo elemento sensor retorne pouco ou nenhum erro.

Com as funções de transferência que descrevem os comportamentos das curvas dos termopares T9 (alimentação) e M4 (*dampner*) em mãos, desenvolveram-se os diagramas de blocos no *Simulink*, incluindo nele cada uma das interações necessárias para descrever o sistema real. A Figura 34 mostra o diagrama de blocos principal desenvolvido no *Simulink*, junto às lógicas para cálculo dos valores dos termopares intermediários (C# e M#) e alguns blocos de configuração / comunicação.

Pode-se observar o bloco “*OPC Config*”, que estabelece comunicação com o CLP; o “*clock*” ligado ao bloco “*OPC Write*”, que fornece (escreve) o tempo de execução da simulação ao CLP e o “*OPC Read*”, que recebe o valor de alarme advindo do CLP e fornece (escreve) ao *InTouch* via *Matlab function*.

As lógicas para cálculo dos valores dos termopares intermediários C1, C2, M1 e M2 são baseadas nas medições feitas localmente quanto ao posicionamento desses termopares em relação às posições de T9 e M4. Sabendo-se que a série C# fica posicionada aproximadamente 50% de T9 e M4 e que a série M# fica a aproximadamente 75% de T9 e 25% de M4, a lógica para cálculo dos seus valores foi construída da mesma forma (assim como explicitado na Seção 3.2.2.2.3 – “Termopares”). Lembrando que esses termopares são reposicionados à cada nova queima e que essas proporções foram assumidas como uma média das posições medidas em campo.

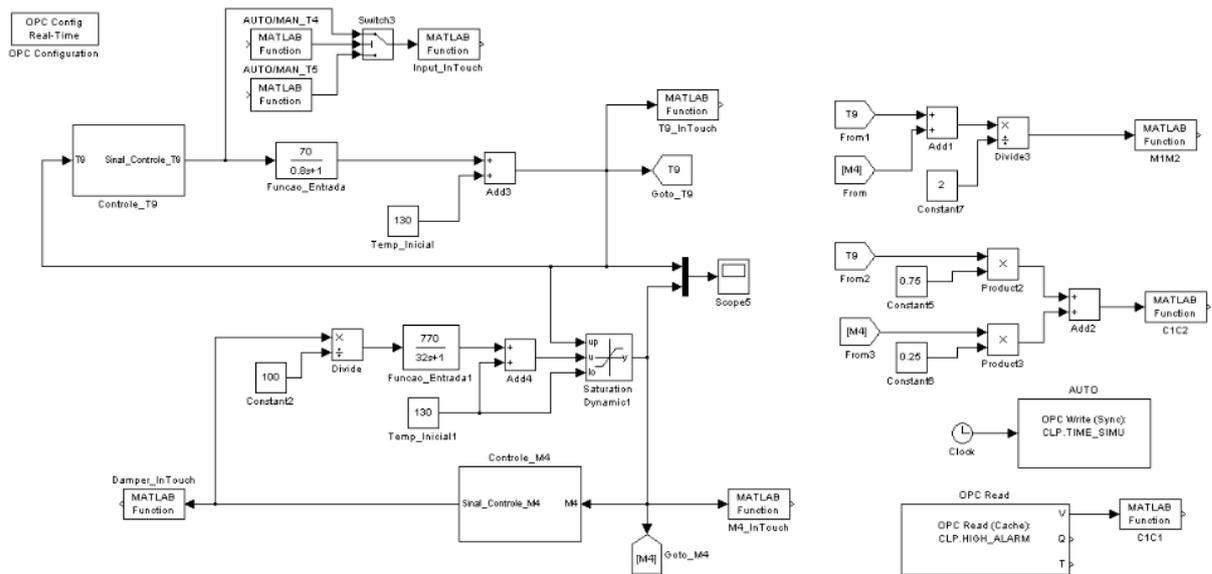


Figura 34 – Diagrama de bloco principal para simulação do processo (Simulink)

Fonte: Autor (2018)

Tratando-se do diagrama de blocos principal, ele possui a parte referente à T9 (alimentação) e a parte referente à M4 (*damper*). Quanto à parte de T9, tudo parte da função de transferência utilizada, seu sinal passa por um limitador (900°C) e também é acrescido de 130°C (temperatura mínima a qual começa a queima devido ao pré-aquecimento). Quanto à parte do M4, a mesma estrutura é montada, acrescida de uma lógica para trabalhar com o sinal do valor de M4 em porcentagem de abertura do *damper*. De forma geral, no diagrama principal ainda existe uma parte destinada à reconhecer se um dos controles foi selecionado como manual ou automático pelo operador na IHM.

Ao clicar para expandir o subsistema do controlador PID de T9, pode-se observar a configuração descrita pela Figura 35 a seguir:

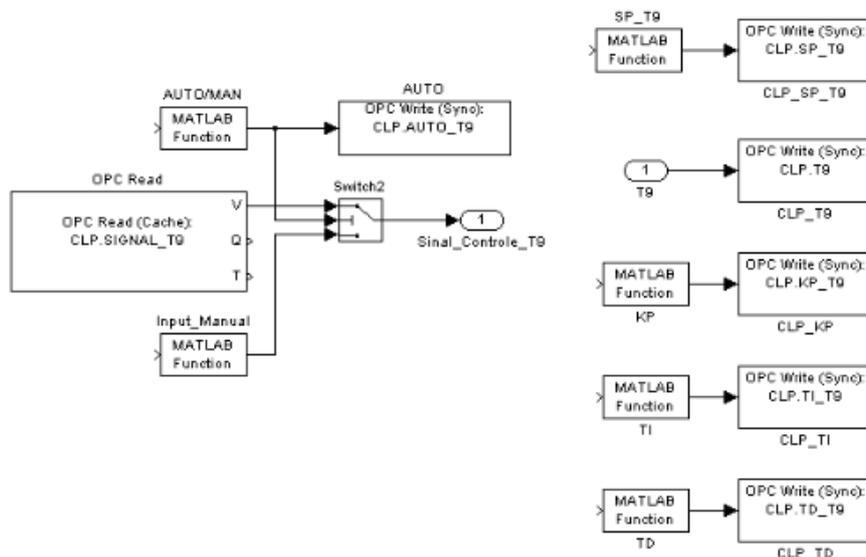


Figura 35 - Subsistema do controlador PID (T9)

Fonte: Autor (2018)

Pode-se verificar uma lógica para tratamento manual ou automático do controle. Como dito anteriormente, essa opção é escolhida pelo operador via IHM e dirá ao controle se o mesmo receberá valores do controlador ou valores inseridos manualmente. Informa-se também o valor de *setpoint* e o sinal de controle de T9 ao CLP e como parte principal, também informa-se os valores dos parâmetros Kp, Ki e Kd (Ti e Td para o CLP que leva em conta valores de tempo integral e tempo derivativo).

Ao expandir o subsistema do controlador PID de M4, pode-se observar a configuração descrita pela Figura 36 abaixo, que segue exatamente a mesma estrutura descrita para T9:

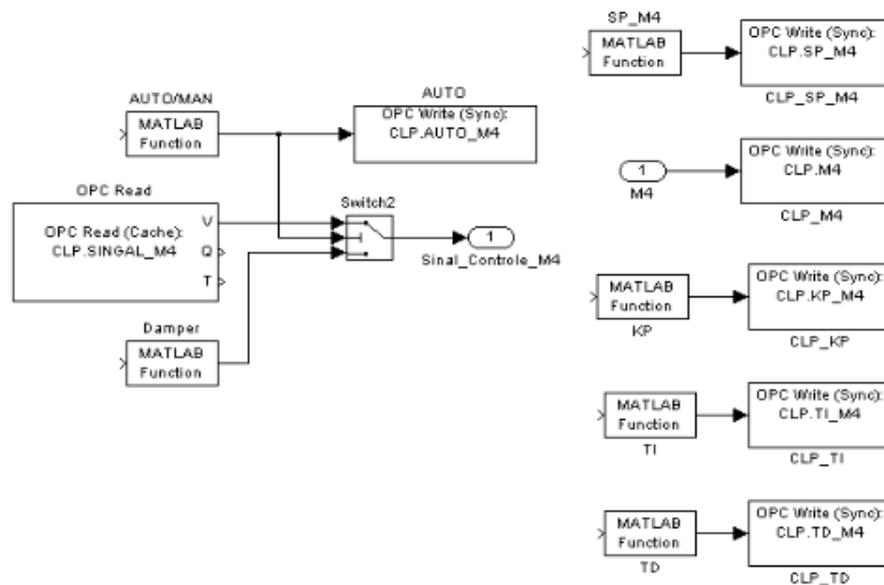


Figura 36 – Subsistema do controlador PID (M4)

Fonte: Autor (2018)

As configurações dos parâmetros de simulação que definem o tempo da queima dentro da simulação podem ser conferidas na Figura 37 abaixo:

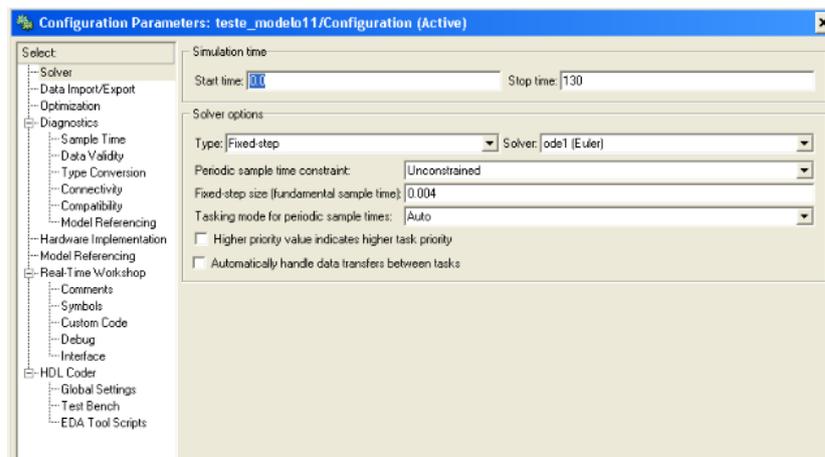


Figura 37 - Configuração dos parâmetros de simulação

Fonte: Autor (2018)

3.2.7 Interface Homem-Máquina (IHM)

Em posse do controle implementado para o CLP (via *PC Worx*) e da simulação do processo de queima (via *Simulink*), deve-se desenvolver uma forma de acompanhamento e interação com esse processo e o respectivo controle do mesmo. Essa interação do operador com o processo é permitida graças aos recursos do *InTouch*. Através da IHM que o operador pode ativar ou desativar o sistema de controle do processo, pode modificar os valores dos parâmetros de controle, pode acompanhar as aferições dos termopares, o sinal de controle enviado à máquina de inserção de combustível e a porcentagem de abertura/fechamento do *damper*. A Figura 38 mostra a tela principal do sistema supervisório desenvolvido. Os valores expressos na mesma são referentes à 3ª simulação discutida no capítulo seguinte, Seção 4.4.3 – “Simulação III”.

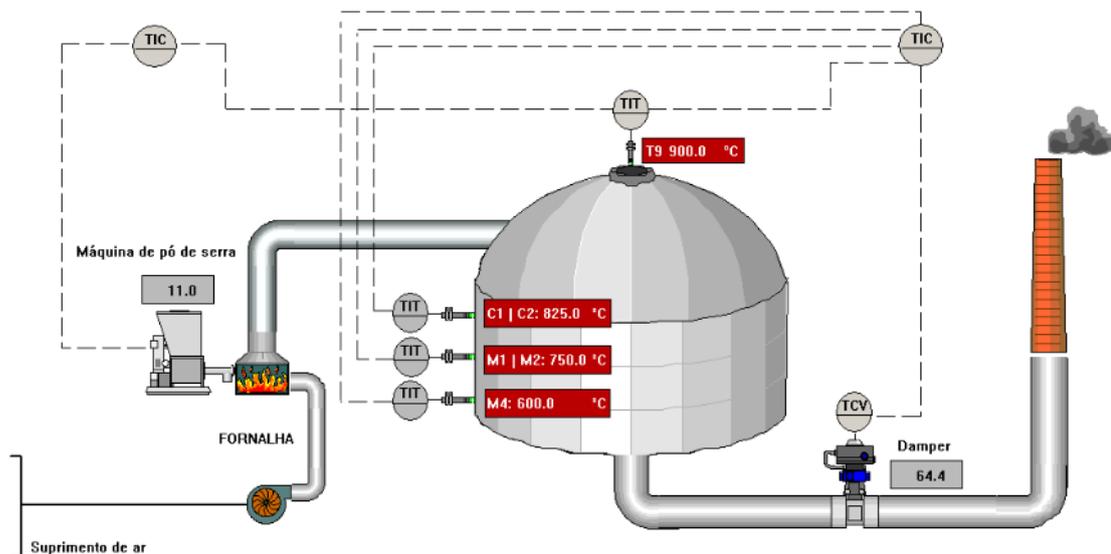


Figura 38 - Interface Homem-Máquina desenvolvida para o projeto

Fonte: Autor (2018)

Pode-se verificar detalhes dos controles de T9 e M4 clicando na representação gráfica dos mesmos na tela principal de supervisão. Na Figura 39 pode-se verificar que a tela mostra a comparação da aferição da temperatura de T9 com o *setpoint* definido em gráfico de barras, os valores dos parâmetros P, I e D para edição, bem como os valores de *setpoint* e sinal de controle para a máquina de alimentação com combustível. Essa tela mostra também o acompanhamento numeral da temperatura de T9, o gráfico da curva de T9 que está sendo controlada e o sinal visual de temperatura muito alta. A Figura 39 mostra ainda o histórico gráfico de entrada para o controle da curva de T9, que é gerado a partir do botão “*Input Histogram*”.

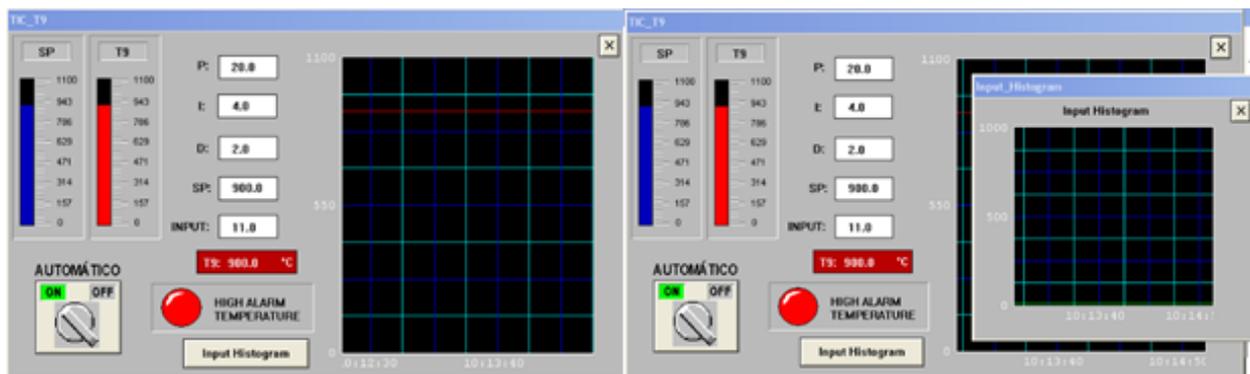


Figura 39 – Detalhes do controle na IHM (T9)

Fonte: Autor (2018)

De igual maneira ao clicar na representação do controle de M4, abre-se uma janela que expressa os detalhes desse controle. Na Figura 40 pode-se verificar que a tela também mostra a comparação da aferição da temperatura de M4 com o *setpoint*, os valores dos parâmetros P, I e D para edição, bem como os valores de *setpoint* e controle do *damper*. Essa tela mostra também o acompanhamento numeral das temperaturas de todos os termopares e o gráfico da curva de M4. A Figura 40 mostra ainda o histórico gráfico de comportamento do *damper* gerado a partir do botão “*Damper Histogram*”. Todas as janelas de detalhes trazem também a opção de interação com o botão de ativação e desativação do controle.

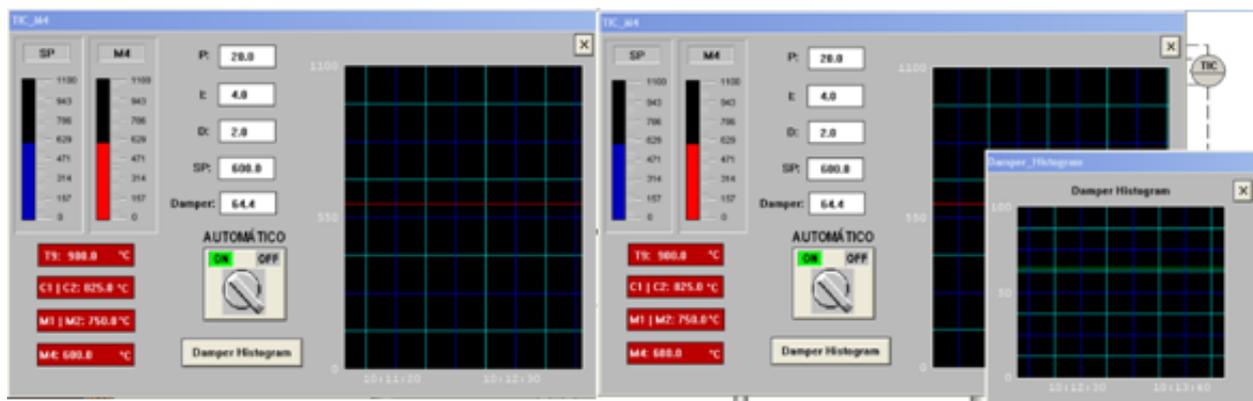


Figura 40 – Detalhes do controle na IHM (M4)

Fonte: Autor (2018)

Para que toda a arquitetura de controle, simulação e supervisão demonstrada até aqui funcione corretamente é necessário estabelecer protocolos de comunicação entre os recursos utilizados. Protocolos de comunicação de dados são conjuntos de regras que controlam a comunicação para que ela seja eficiente e sem erros, são softwares que recebem e enviam dados evitando a perda dos mesmos (JUNCAS, 2010).

Como já mencionado, o *Simulink* é responsável pela simulação do processo real e a principal ponte de comunicação entre o CLP e o supervisor. Sua comunicação software / hardware é demonstrada metodologicamente a seguir.

3.2.8.1 *Simulink X InTouch*

A comunicação entre o *Simulink* e o *InTouch* é estabelecida pelo protocolo chamado *Dynamic Data Exchange* [DDE]. O protocolo DDE foi criado pela Microsoft para que aplicações que partilham do mesmo protocolo pudessem trocar informações em um ambiente Windows. Para que esse protocolo seja estabelecido na comunicação necessária ao *Simulink*, cria-se um canal de comunicação através da função “*ddeinit*” no MatLab®. Essa função segue a seguinte sintaxe:

canal = ddeinit('nome da aplicação','nome do tópico')

Para o caso do projeto, esse comando é configurado da seguinte maneira:

canal = ddeinit('view','tagname')

Onde “canal” é a variável que armazena a requisição por conexão (sendo declarada do tipo global), “view” é o nome da aplicação servidora e “tagname” se refere à seção da aplicação servidora que será acessada. Esse comando, uma vez passado ao MatLab® cria o canal de comunicação entre o *Simulink* e o *InTouch* sob as regras do protocolo DDE. A Figura 41 mostra as configurações aplicadas no caso desta pesquisa, para que as condições descritas acima sejam estabelecidas ao MatLab®, toda vez que o *Simulink* for executado.

[Caminho de execução: **File>>model properties>>Callbacks>>StartFcn**]

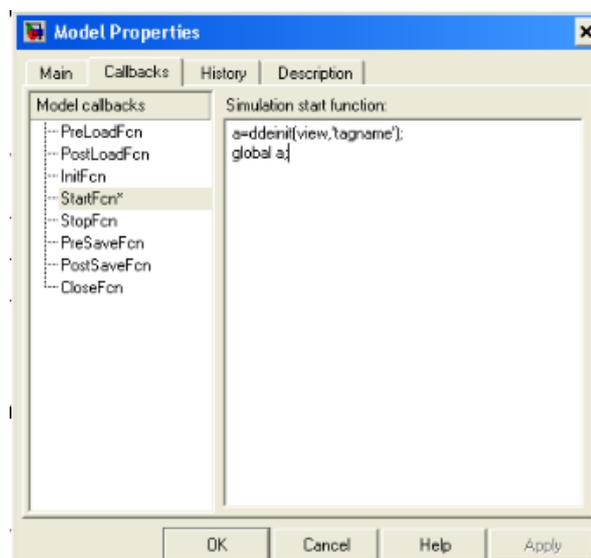


Figura 41 – Configuração para criação automática do canal de comunicação *Simulink X InTouch*

Fonte: Autor (2018)

Outro recurso necessário nessa comunicação é a utilização do bloco *Matlab Function* no *Simulink*. Esse recurso é fundamental para que as informações inseridas pelo operador na tela do supervisor sejam passadas à simulação e para que os dados da simulação sejam dispostos na tela para o operador. O bloco em questão pode ser configurado para ser do tipo leitura ou escrita. Sendo assim, para receber informações do operador (leitura) é utilizado o comando “*ddereq*” junto aos parâmetros “canal de comunicação” e “nome da variável” configurados dentro do bloco *Matlab Function*. Para enviar informações (escrita) é utilizado o comando “*ddepoke*” junto aos parâmetros “canal de comunicação”, “nome da variável” e “valor que deve ser escrito na variável escolhida”, também configurados dentro do bloco. A Figura 42 mostra os blocos *Matlab Function* para leitura e escrita e suas configurações internas.

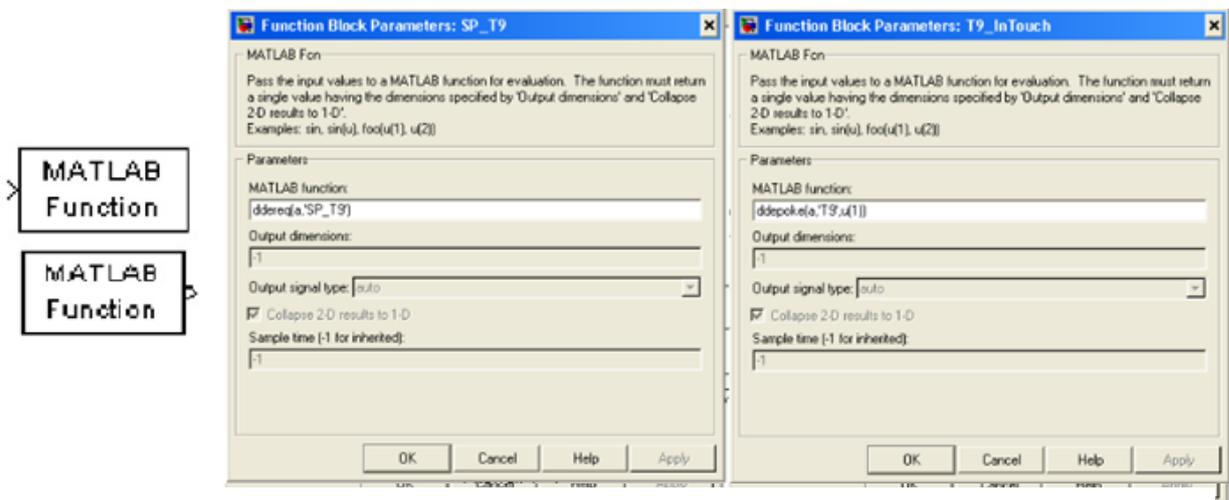


Figura 42 – Blocos *Matlab function* e suas configurações

Fonte: Autor (2018)

A comunicação entre o *Simulink* e o CLP é estabelecida pelo protocolo de comunicação chamado OLE for *Process Control* [OPC]. O protocolo OPC é um padrão de interoperabilidade, para troca de dados de forma segura, em um ambiente de automação industrial. Para que a comunicação necessária ocorra sob as regras do protocolo OPC, faz-se necessário configurar o “nome do servidor OPC”, o “modelo de CLP envolvido” e seu respectivo “endereço IP” através da aplicação auxiliar *OPC Configurator*, já citada anteriormente. Para o presente projeto, o CLP foi selecionado através da opção ILC 1xx(fw>=v1.00) e o IP do equipamento 192.168.0.210. A Figura 43 mostra a tela do *OPC Configurator* com as devidas configurações.

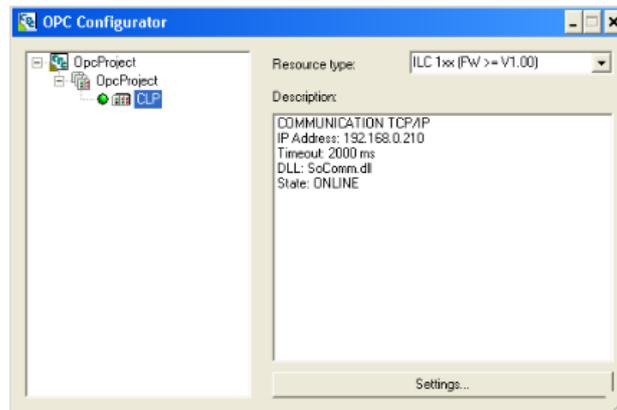


Figura 43 – Tela do OPC Configurator

Fonte: Autor (2018)

Tendo finalizado as configurações necessárias no OPC Configurator, alguns detalhes precisam ser adequados no software do CLP, no PC Worx Express e no Simulink. No PC Worx configura-se o IP cadastrado no driver OPC e seleciona-se a opção OPC para cada uma das variáveis criadas nessa comunicação. Essa configuração quanto às variáveis é necessária para que as mesmas possam utilizar esse mesmo tipo de protocolo. A Figura 44 mostra a configuração realizada no projeto para ambos os softwares.

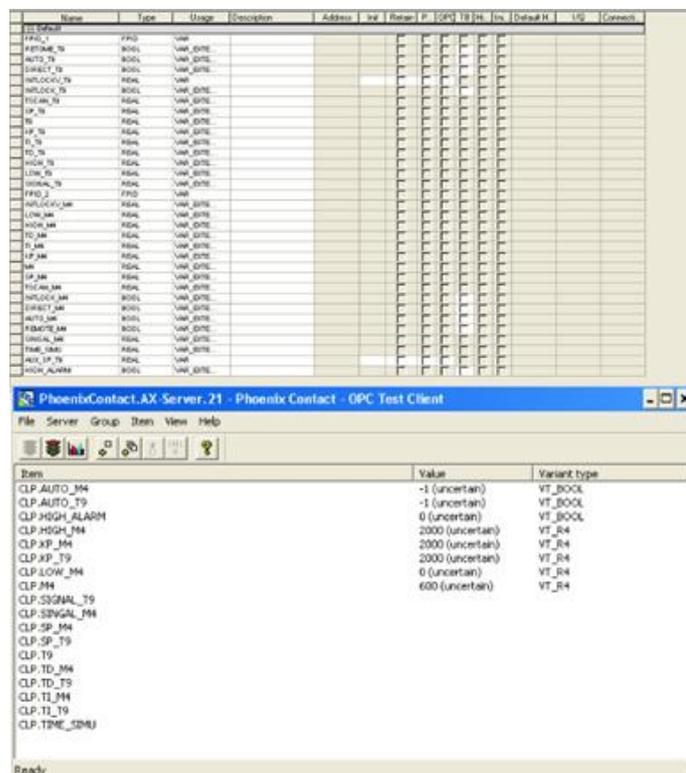


Figura 44 – Configuração para comunicação das variáveis entre os softwares PC Worx e Simulink.

Fonte: Autor (2018)

Já no *Simulink*, no bloco “*OPC Config Real Time*”, o protocolo OPC deve ser configurado. Seleciona-se também o CLP *Phoenix* como cliente OPC. Essa configuração permite que os valores armazenados nas variáveis do *Simulink* sejam escritos ou lidos do mapa de memória do CLP, atuando sobre a planta do sistema. A Figura 45 mostra o bloco “*OPC Config Real Time*” utilizado na comunicação do *Simulink* com o CLP.

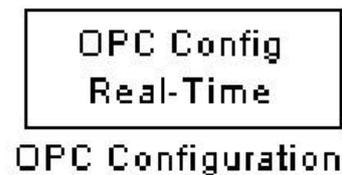


Figura 45 – Bloco *OPC Configurator Real Time*

Fonte: Autor (2018)

Assim como na interação da simulação com o supervisor, o *Simulink* e o CLP também possuem a comunicação de escrita e leitura de dados. Para que esses dados sejam trocados, existem blocos de leitura para leitura dos valores do CLP que devem ser adicionados ao *Simulink*. O bloco para leitura dos dados é chamado “*OPC Read*” e deve ser configurado para cada variável a ser lida do CLP. A Figura 46 mostra a configuração de um dos blocos “*OPC Read*” configurados neste projeto.

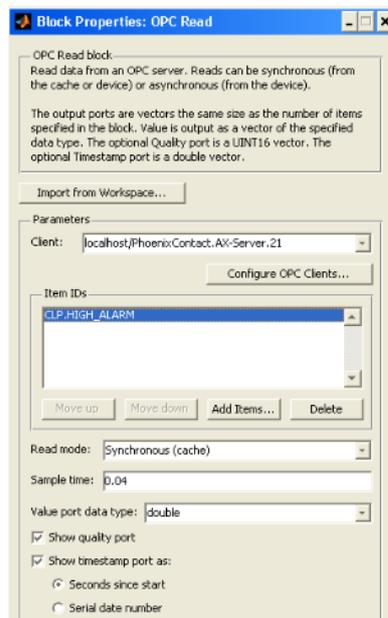


Figura 46 – *OPC read* (configuração)

Fonte: Autor (2018)

De igual forma, o bloco para escrita dos dados do *Simulink* no CLP é chamado “*OPC Write*” e também deve ser configurado para cada variável a ser escrita na memória do

controlador. A Figura 47 mostra a configuração de um dos blocos “*OPC Write*” configurados neste projeto.

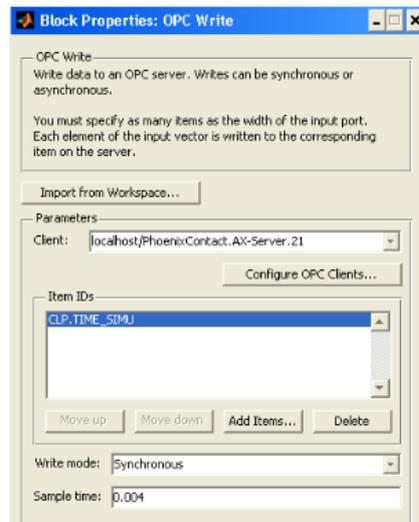


Figura 47 – OPC write (configuração)

Fonte: Autor (2018)

3.2.9 Análises e Testes

Após o desenvolvimento do modelo lógico de controle e a interação do mesmo com a simulação do processo via *Simulink* e *software* supervisorio, algumas análises e testes foram aplicados de forma a validar a pesquisa desenvolvida. Os valores estatísticos traduzem opiniões e mostram comparações essenciais às conclusões e obtenções das metas da pesquisa. Os principais questionamentos levantados inicialmente para a melhor compreensão da problemática são respondidos nessa etapa. Dessa forma, fica comprovada a eficácia do estudo em questão e o sucesso na obtenção de cada uma de suas metas. Se houver redução do custo do processo de queima ou do produto final devido à algum aspecto, redução na emissão de poluentes para a atmosfera, melhora nas conformidades da peça cerâmica, valorização de mercado ou qualquer outro aspecto positivo, a pesquisa já se justificará como aplicada e bem-sucedida. A solução notória para um ou mais fatores envolvidos nos gargalos de produção, dentro de um processo produtivo industrial, é o principal motivo da presente pesquisa. As análises e testes são etapa essencial para a comprovação dos resultados esperados.

Foram realizadas 3 simulações com aplicação do controle e essas simulações comparadas aos dados de 3 queimas reais colhidas na cerâmica em estudo. Por meio de comparação de valores e análises gráfica, fica evidente que o controle desenvolvido atribuiu ao processo uma característica muito mais estável e uniforme. Esses testes foram feitos mediante a técnica da “Estratégia de Aceitação” para validação de resultados apresentada a seguir.

3.2.9.1 Validação de Resultados

Para que os resultados sejam comprovados e validados, deve-se adotar uma metodologia para garantir que esses resultados sejam de fato comprovados. Testes e avaliações devem ser feitas e refeitas a fim de que se comprove que o comportamento daquela amostra não foi algo atípico ou momentâneo. O método da Estratégia de Aceitação assegura que o calendário de execução de testes e o esforço associado aos mesmos estejam alinhados. Este método parte do princípio de que uma vez que se inicia um teste, este teste apresentará erros que necessitarão ser corrigidos, gerando um retrabalho (Galp, 2017).

Diante do exposto, o método de validação de resultados adotado neste projeto leva em consideração a necessidade da realização de 3 passagens de execução de testes. Nesse pensamento, sabe-se que cada ciclo de teste é executado em média 3 vezes em cada uma de suas fases. Segue o objetivo principal de cada uma dessas execuções:

1ª execução – executar o ciclo de teste, identificando o maior número de erros;

2ª execução – repetir o ciclo de testes implementando melhorias para os problemas advindos do primeiro teste. Nesse estágio deve-se verificar se as ações corretivas para os problemas detectados na primeira execução geraram outros erros;

3ª execução – o ciclo de testes é efetuado uma terceira vez. Dessa vez, aplicando melhorias em cima dos erros apresentados na 2ª execução. Nesse último passo não se colhem mais erros, salvo da execução de um 4º ciclo de testes.

Na Estratégia de Aceitação considera-se que a 2ª execução pode gerar dúvidas, mas a 3ª execução é decisória. Esse é exatamente o conceito de validação dos resultados por meio desse método. Dessa forma, assegura-se que todos os erros encontrados são resolvidos e testados. Também assegura-se que as melhorias implementadas durante o processo de validação não impactam inadvertidamente outras áreas do sistema (Galp, 2017).

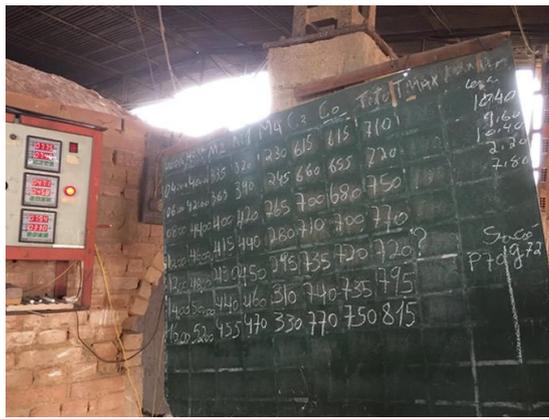
4. RESULTADOS

Para dispor os resultados da melhor forma, as 3 queimas reais acompanhadas em campo foram dispostas e analisadas como são. Após essas análises o modelo matemático do objeto de estudo é relatado de forma a validar o controle do processo. Por fim as simulações são comparadas com as queimas reais e algumas melhorias podem ser constatadas. Essas evidências foram todas documentadas a seguir.

4.1 Comportamento Atual da Queima

O forno tipo abóbada passou a ser utilizado inicialmente com o intuito de proporcionar uma queima mais uniforme à sua carga de forma geral, porém devido aos seus aspectos construtivos e ao comportamento físico natural da troca de calor, alguns aspectos específicos devem ser considerados para controlar uma queima sob essas condições. As queimas atualmente são controladas mediante as aferições realizadas pelos termopares dentro e fora da carga. De forma a controlar as temperaturas “já conhecidas” (com base na experiência do operador) para cada nível de aferição do forno, os operadores (forneiros) conduzem de forma empírica, os processos de alimentação e manejo do *damper*. Dessa maneira, para aumentar a temperatura em determinado termopar, por exemplo, acrescenta-se combustível nas fornalhas (sem controle sobre a quantidade de combustível utilizado) e fecha-se o *damper* (em uma proporção nunca conhecida).

Os forneiros registram as temperaturas aferidas pelos termopares em uma tabela, criando um histórico do comportamento usual dessas queimas. Através desses dados é possível observar como o sistema se comporta, quanto à distribuição de temperatura e o quanto a ação empírica do operário não favorece o desenho ideal do comportamento da queima para todos os níveis da carga. Pela observação em campo sabe-se que os valores registrados sofrem variação pela ação da ingestão de combustível. Raras vezes o *damper* foi alterado, o que faria total diferença no comportamento dos valores aferidos pelos termopares. Como resultado, tem-se queimas irregulares com fluxo de calor altamente variado e aumento desordenado da temperatura sobre a carga. Desta maneira, nem se garante o cozimento igualitário das peças cerâmicas no interior do Forné, nem se garantem as demais condições para garantia da qualidade do produto final segundo as propriedades do material utilizado. A Figura 48 mostra o quadro para acompanhamento da queima em campo e seus dados passados para uma planilha em Excel.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1			baixa = carga inf		piso	alto = carga sup		
2	Horas	horas AC	M2	M1	M4	C0	C3	T9
3	08:00:00	0:00:00	155	130	130	175	170	170
4	13:00:00	5:00:00	165	160	110	175	180	185
5	15:00:00	7:00:00	165	165	115	180	185	210
6	18:00:00	10:00:00	170	165	125	200	200	250
7	21:00:00	13:00:00	180	170	135	230	230	280
8	00:00:00	16:00:00	185	175	140	250	250	310
9	03:00:00	19:00:00	190	180	145	275	275	340
10	07:00:00	23:00:00	195	195	160	320	320	380
11	11:00:00	27:00:00	235	230	170	375	375	415
12	13:00:00	29:00:00	250	240	190	405	405	440
13	15:30:00	31:30:00	255	255	210	425	420	480
14	17:30:00	33:30:00	280	270	220	435	435	520
15	19:00:00	35:00:00	300	280	230	450	455	560
16	23:00:00	39:00:00	335	315	250	485	490	500
17	02:00:00	42:00:00	360	340	265	505	510	630
18	04:00:00	44:00:00	380	360	275	520	530	660
19	07:30:00	47:30:00	415	395	310	575	590	680
20	09:30:00	49:30:00	420	405	325	600	610	730
21	11:00:00	51:00:00	430	415	335	630	640	750
22	13:00:00	53:00:00	435	420	345	660	670	760
23	14:30:00	54:30:00	445	430	360	690	700	750
24	16:30:00	56:30:00	450	435	340	710	715	790
25	19:30:00	59:30:00	465	445	380	730	740	?

Figura 48 – Dados de acompanhamento das queimas

Fonte: Autor (2018)

4.1.1 Queima I

Para análise simplificada dos valores registrados durante as queimas, foi considerada a média dos termopares que se encontram no mesmo nível. Ou seja, os termopares C1 e C2 foram considerados como C0 e os termopares M1 e M2 considerados com M0. Sendo assim, foram levadas em consideração 4 medidas: T9 (no topo – fora da carga), C0 (parte superior da carga), M0 (parte mediana da carga) e M4 (parte inferior da carga). Para fins de análise, considerou-se apenas um valor por dia e no mesmo horário (por volta das 8 horas da manhã). Observa-se que as queimas duram cerca de 5 dias (130 horas), apresentando comportamentos instáveis. Seus valores estão dispostos na tabela simplificada abaixo, explicitando em qual nível a temperatura se encontra mais alta em cada dia. Cada termopar representa um nível de aferição dentro do forno.

QUEIMA I					
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
T9	170	380	730	800	770
C0	172,5	320	605	837,5	840
M0	142,5	195	412,5	507,5	772,5
M4	130	160	325	445	560

Tabela 1 – Dados de Acompanhamento da Queima I (valores em graus Celsius)

Fonte: Autor (2018)

A partir dos dados expostos na Tabela 1, os valores de acréscimo ou decréscimo de temperatura foram analisados entre os dias da queima. Essa análise pode ser conferida na Tabela 2, também com destaque para o nível onde a variação de temperatura foi acrescida com maior valor.

Variação de Temperatura (Queima I)				
	Dia 1 para Dia 2	Dia 2 para Dia 3	Dia 3 para Dia 4	Dia 4 para Dia 5
T9	210	350	70	-30
C0	147,5	285	232,5	2,5
M0	52,5	217,5	95	265
M4	30	165	120	115

Tabela 2 – Dados de acompanhamento da Queima I (valores em graus Celsius)

Fonte: Autor (2018)

Percebe-se que da maneira natural, não ocorre uma boa distribuição dos gases quentes no interior do forno e nem as condições para garantia de um fluxo de calor ideal são alcançadas. Sendo assim, considerando que a alimentação possui influência direta sobre o valor de T9 e que o *dampers* possui influência direta sobre o valor de M4, algumas conclusões importantes podem ser tiradas das tabelas acima. A Tabela 1 evidencia que na queima I o calor foi mais incidente nos níveis de aferição superiores. Analisando a Tabela 2, pode-se observar através dos valores de T9, que a alimentação foi mais atuante até o 3º dia e a atuação do *dampers* foi mais eficaz também a partir do 3º dia (*dampers* mais aberto). Ou seja, esses dois componentes poderiam ter sido controlados de forma a trazer melhores resultados para a queima, estabilizando as temperaturas de T9 e M4 nos níveis desejados em um tempo menor dentro do período de queima. O gráfico gerado à partir dos dados da queima I pode ser observado na Figura 49 a seguir:

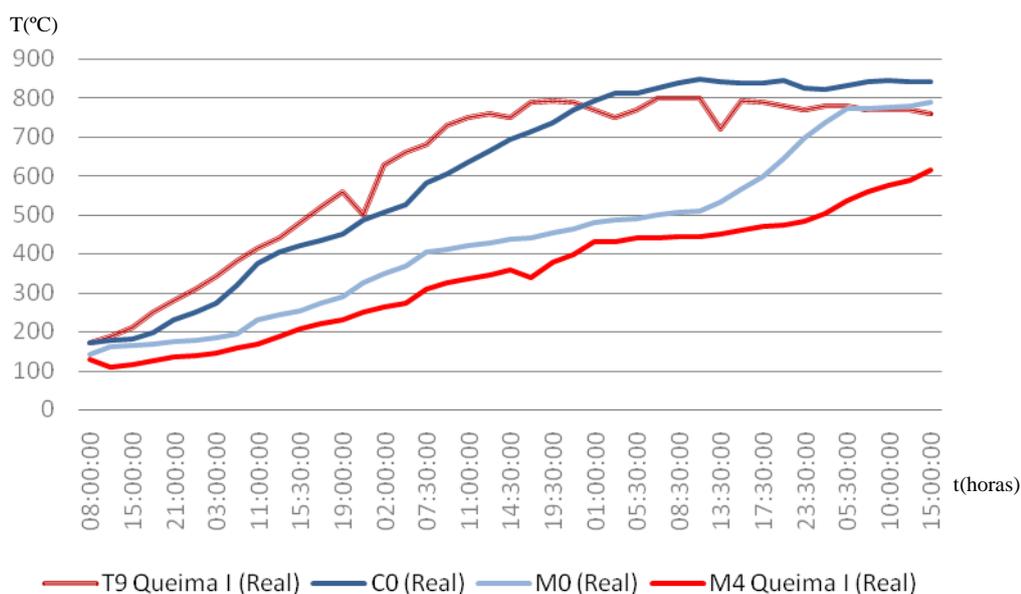


Figura 49 – Gráfico da Queima I (real)

Fonte: Autor (2018)

4.1.2 Queima II

Assim como na queima I, os valores da segunda queima estão dispostos na tabela simplificada abaixo, explicitando em qual nível a temperatura se encontra mais alta em cada dia.

QUEIMA II					
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
T9	170	380	680	770	790
C0	172,5	320	582,5	840	827,5
M0	142,5	195	810	772,5	840
M4	130	160	310	560	690

Tabela 3 – Dados de acompanhamento da Queima II (valores em graus Celsius)

Fonte: Autor (2018)

Mais uma vez, partindo dos dados da Tabela 3, os valores de acréscimo ou decréscimo de temperatura foram analisados entre os dias da queima. Esses dados constam na Tabela 4,

também com destaque para o nível onde a variação de temperatura foi acrescida com maior valor.

Variação de Temperatura (Queima II)				
	Dia 1 para Dia 2	Dia 2 para Dia 3	Dia 3 para Dia 4	Dia 4 para Dia 5
T9	210	300	90	20
C0	147,5	262,5	257,5	-12,5
M0	52,5	615	-37,5	67,5
M4	30	150	250	130

Tabela 4 – Dados de acompanhamento da Queima II (valores em Celsius)

Fonte: Autor (2018)

A Queima II mostrou uma maior variação de temperatura entre os níveis de aferição do que a queima anterior. Através das tabelas pode-se garantir que o comportamento da temperatura em cada nível nem sequer se assemelhou à um comportamento estável e controlado. Verificando a Tabela 3, constata-se que houve uma maior distribuição dos gases da queima no interior do forno, não ocorrendo o mesmo acúmulo de gases na parte superior da abóbada que na Queima I. Os níveis inferiores tiveram um aumento de temperatura mais expressivo, se direcionando ao que se é desejado, porém as temperaturas de T9 não tenderam ao que se é esperado para esse nível de aferição. Analisando a Tabela 4, observa-se que houve maior incidência no processo dos efeitos de variação do comportamento da alimentação e do *damper*. Comparando as duas tabelas referentes à Queima II, fica evidente que a atuação do controle da alimentação com o controle do *damper* leva facilmente o sistema a melhor distribuir os gases quentes no interior do forno. A maior incidência de alimentação pode ser verificada no 2º dia e de atuação do *damper* no 3º e no 5º dia. O gráfico gerado à partir dos dados da queima II pode ser observado na Figura 50 abaixo:

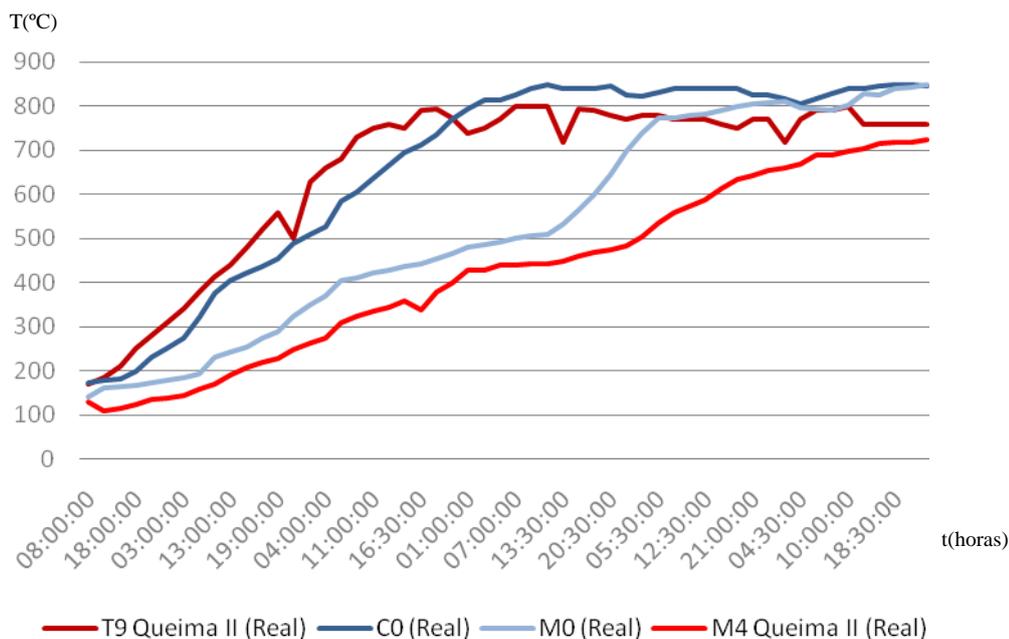


Figura 50 – Gráfico da Queima II (real)

Fonte: Autor (2018)

4.1.3 Queima III

Assim como na queima II, os valores da terceira queima estão dispostos na tabela simplificada abaixo, explicitando em qual nível a temperatura se encontra mais alta em cada dia.

QUEIMA III					
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
T9	210	450	780	810	800
C0	232,5	410	608	800	805
M0	208	235	420	505,5	783
M4	140	170	325	410	550

Tabela 5 – Dados de acompanhamento da Queima III (valores em graus Celsius)

Fonte: Autor (2018)

Mais uma vez, partindo dos dados da Tabela 5, os valores de acréscimo ou decréscimo de temperatura foram analisados entre os dias da queima. Esses dados constam na Tabela 6,

também com destaque para o nível onde a variação de temperatura foi acrescida com maior valor.

Variação de Temperatura (Queima III)				
	Dia 1 para Dia 2	Dia 2 para Dia 3	Dia 3 para Dia 4	Dia 4 para Dia 5
T9	240	330	30	-10
C0	177,5	198	192	5
M0	27	185	85,5	277,5
M4	30	155	85	140

Tabela 6 – Dados de acompanhamento da queima III (valores em graus Celsius)

Fonte: Autor (2018)

Assim como a Queima I, a 3ª queima traz um comportamento com menos intervenções quanto à alimentação e ao *damper*. Fica evidente mais uma vez que esse comportamento natural nem de longe mostra um fluxo contínuo de calor incidindo sobre a carga. As temperaturas na Tabela 5, mais uma vez mostram que os gases quentes ficaram acumulados nos níveis superiores de aferição, porém com incidência maior da alimentação nos dias 2, 3 e 4 e quase nenhuma atuação do *damper*. Observando a Tabela 6, percebe-se claramente a atuação do *damper* apenas do 4º para o 5º dia de queima. A distribuição de calor no interior do forno é bem lenta e pequena, as curvas de T9 e M4 mais uma vez demoram a se estabilizar e os níveis intermediários atingem temperaturas potencialmente baixas. O gráfico gerado à partir dos dados da queima III pode ser observado na Figura 51 abaixo:

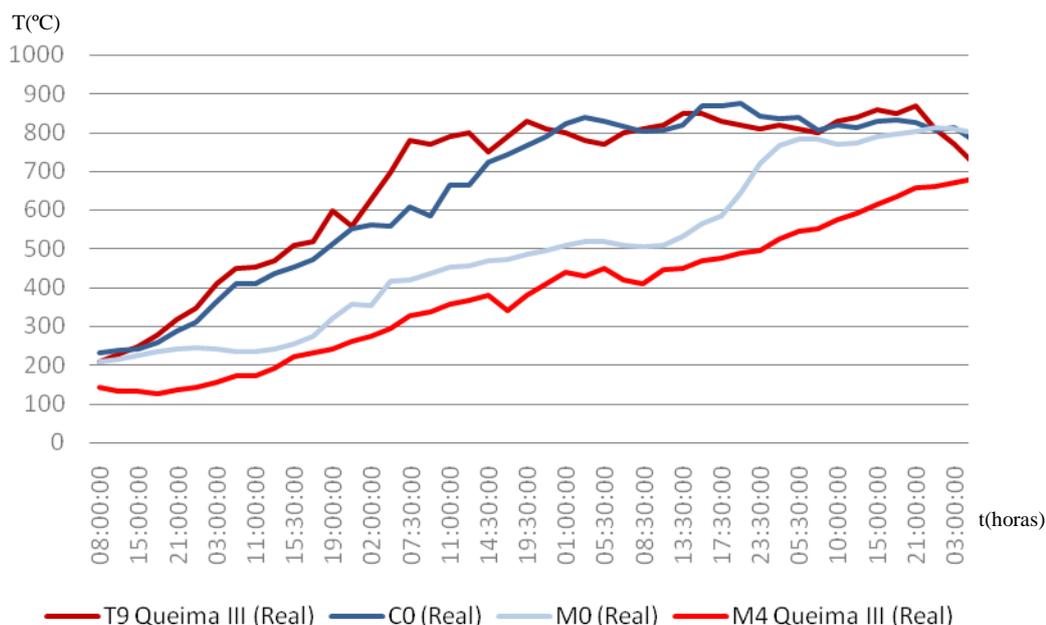


Figura 51 – Gráfico da Queima III (real)

Fonte: Autor (2018)

Verifica-se que as queimas atuais demonstram indícios de um sistema que pode ser melhor trabalhado para atingir valores mais significativos dentro do objetivo da queima. Fica evidente que a inconstância na atuação, tanto da alimentação quanto na do *damper*, acaba gerando ao processo valores de picos e ínfimos indesejados quanto à temperatura. Em análise dos dados provenientes das queimas encontram-se indícios da forte reação do sistema às ações dos elementos que devem atuar no controle. Esses dados sugerem fortemente à lógica de controle, como utilizar alguns recursos ao seu favor, atingindo o controle necessário das curvas que expressam o fluxo de calor no interior da abóbada.

4.2 Parametrização das Queimas

Como já explicitado no início deste capítulo, os dados que descrevem as queimas reais são obtidos em campo pelos forneiros de plantão. Como esses dados são registrados manualmente durante vários dias, apesar de procurarem seguir um padrão quanto ao tempo entre uma anotação e outra, o resultado é bem irregular quanto à esse quesito. Por isso, é necessário analisar a curva gerada por esses dados e parametrizar esses registros de forma que esses dados possam ser comparados com os dados provenientes das simulações e da modelagem. Sendo assim, os dados reais foram re-organizados e parametrizados de 2 em 2 horas. Dessa forma foram obtidos os gráficos das queimas reais parametrizadas, que muito fielmente descrevem os mesmos processos de queima dispostos nos gráficos anteriores, porém agora podem ser mais facilmente comparados com outros dados na mesma escala

temporal. As Figuras 52, 53 e 54 mostram as parametrizações das queimas I, II e III respectivamente.

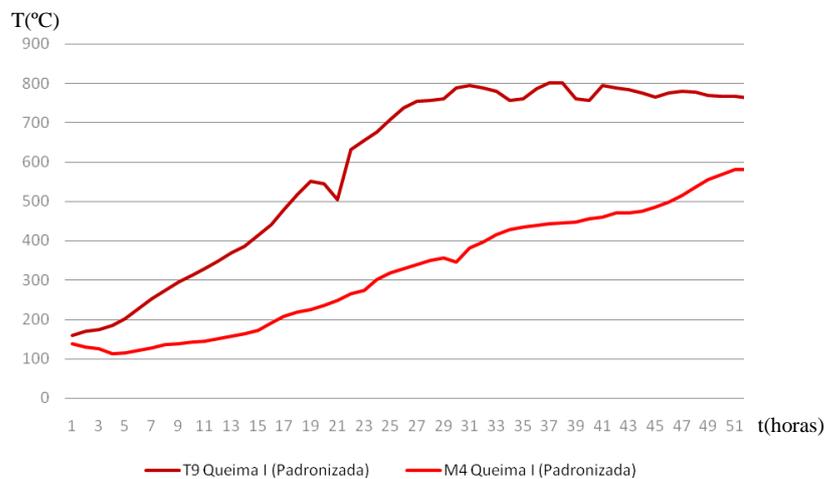


Figura 52 – Queima I (padronizada)

Fonte: Autor (2018)

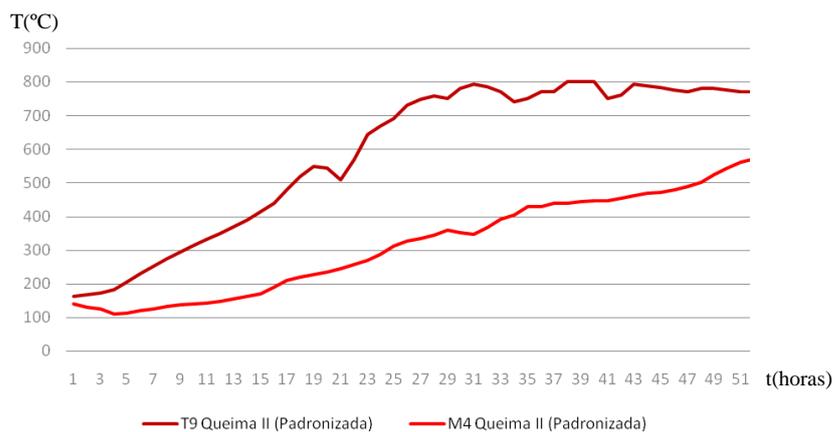


Figura 53 – Queima II (padronizada)

Fonte: Autor (2018)

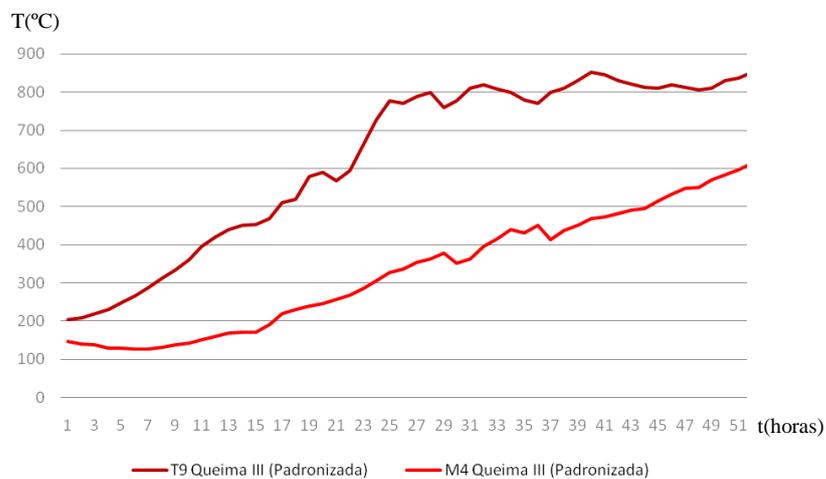


Figura 54 – Queima III (padronizada)

Fonte: Autor (2018)

4.3 Validação do Modelo Matemático Desenvolvido

Para validar o modelo matemático desenvolvido com a finalidade de descrever o comportamento do forno, seus parâmetros foram ajustados de forma a melhor acompanhar a curva real. Essa foi a técnica escolhida para estudar a dinâmica do sistema, determinando as curvas ótimas que o descrevem e evitando testes práticos desnecessários para a compreensão do mesmo. Os gráficos gerados desses ajustes comprovam o quão próximo do real o modelo se comporta e o quão bem ele pode descrever o comportamento das curvas de temperatura aferidas pelos termopares. Essa validação permite que o modelo matemático seja considerado no desenvolvimento do controle e comprova a simulação final de maneira geral. O modelo entrega à pesquisa, o comportamento que evidencia a dinâmica da queima no objeto de estudo, de uma forma mais linear. Essas devem ser então as curvas consideradas na pesquisa.

Em posse dos dados coletados em campo que representam as queimas reais, pode-se verificar um padrão entre todas elas. Tendo em vista que as queimas são controladas empiricamente mediante as mesmas instruções e que as ferramentas são as mesmas, faz sentido que os resultados sejam parecidos mediante as mesmas condições. Isso prova também que uma melhoria significativa só seria possível, mediante um controle que aborde novas táticas e ações corretivas. Os gráficos dispostos acima, gerados pelos dados das queimas reais evidenciam curvas significativamente semelhantes. Analisando esses dados pela média de valores ou pelo cálculo da eficiência em relação à carga, os valores se encontram todos dentro da mesma faixa. A referida eficiência, por exemplo, se encontra em torno de 60% em todas as 3 queimas analisadas (esses cálculos são melhor discutidos na Seção 4.6 – Resultados com Base na Eficiência Térmica). Dessa forma, a queima I foi escolhida para guiar a variação de parâmetros nessa fase de análise da modelagem. Seguindo o padrão de comportamento de todas as queimas estudadas, a queima I comprova a fidelidade do modelo matemático às suas curvas.

Para essas constatações, foram criados 3 testes com variações de parâmetros para cada curva (T9 e M4). O teste 1 visa o comportamento da curva quanto à seus limites superiores, o teste 2 quanto aos pontos medianos e o teste 3 quanto aos limites inferiores. Segue a Tabela 7, com os parâmetros adotados para cada um dos testes quanto à curva expressa pelas aferições do termopar T9 durante a queima I.

Variação dos Parâmetros do Modelo (Curva T9)

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3
β	0,08 Hz	0,4 Hz	0,03 Hz
Ts	800 °C	900 °C	800 °C
γ	0,18 Hz	0,11 Hz	2,7 Hz

Tabela 7 – Variação de parâmetros para modelagem (curva T9)

Fonte: Autor (2018)

Dessa forma, as curvas plotadas pelo modelo matemático foram refinadas de forma a melhor cobrir os valores da curva real, resultando no gráfico exposto pela Figura 55 a seguir.

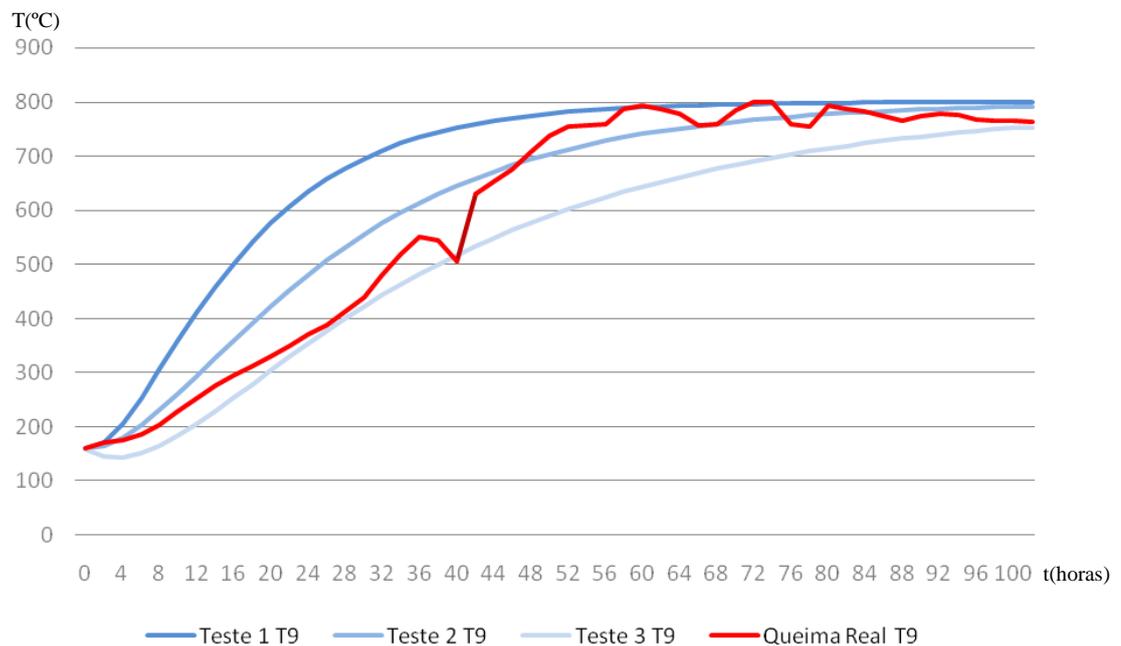


Figura 55 – Curvas do modelo matemático para T9

Fonte: Autor (2018)

Conforme demonstrado graficamente, o modelo descreve com fidelidade o comportamento expresso pela curva real, respondendo à todos os valores mínimos e máximos, de acordo com a variação dos valores de seus parâmetros. Da mesma forma, os parâmetros foram ajustados para acompanhar o comportamento da curva expressa pelas aferições do

termopar M4. A Tabela 8 mostra os parâmetros utilizados para cobrir os valores na curva real M4.

Variação dos Parâmetros do Modelo (Curva M4)			
Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3
β	0,04 Hz	0,03 Hz	0,02 Hz
T_s	580 °C	580 °C	580 °C
γ	0,07 Hz	0,06 Hz	0,06 Hz

Tabela 8 – Variação de parâmetros para modelagem (curva M4)

Fonte: Autor (2018)

As curvas plotadas pelo modelo matemático foram refinadas para cobrir os valores da curva real de M4, resultando no gráfico exposto pela Figura 56 a seguir.

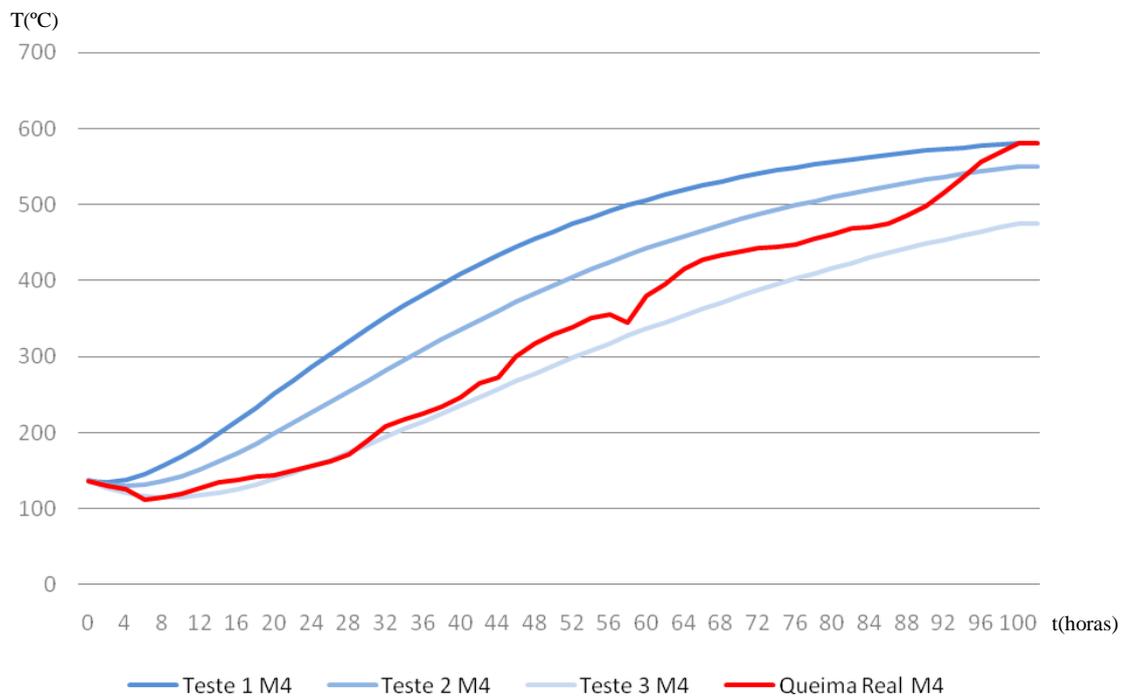


Figura 56 – Curvas do modelo matemático para M4

Fonte: Autor (2018)

Pode-se observar que mais uma vez, o modelo se mostrou fiel ao descrever o comportamento da curva real, de acordo com a variação dos valores dos seus parâmetros.

Dessa forma fica comprovada a validação do modelo matemático, não só por cálculos, mas também por variações de parâmetros e demonstrações gráficas. Percebe-se que no caso da curva T9, o melhor teste que a descreve foi o de número 2 e para a curva M4 o melhor teste de acordo com seus valores foi o de número 3. Ou seja, para o desenvolvimento do projeto, esses serão os parâmetros adotados como padrão dentro do modelo. A Figura 57 mostra as duas curvas e os testes do modelo realizado para cada uma delas em uma só disposição, permitindo uma melhor visualização.

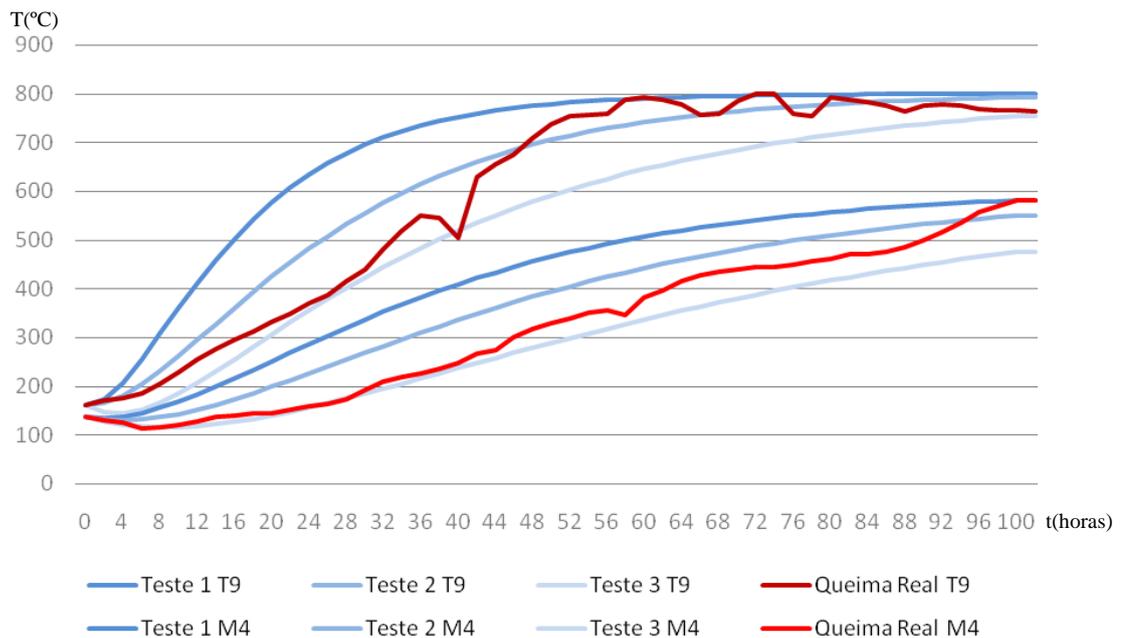


Figura 57 – Curvas do modelo matemático para T9 e M4

Fonte: Autor (2018)

4.4 Comportamento da Queima com Ação do Controle

Após construção de toda arquitetura de controle e de simulação demonstrada no capítulo 3, foram efetuadas simulações do controle sobre o processo com alterações dos parâmetros K_p , K_i e K_d da técnica PID. Esses parâmetros foram sendo ajustados, de forma a melhor descrever o comportamento de controle esperado para o sistema, dentro das condições de respostas conhecidas como ideais. Da primeira simulação até a última, os resultados foram se adequando até chegar ao melhor desempenho expresso pelo software de simulação. A simulação 3 é a que possui os parâmetros mais refinados, se comportando dentro das condições pré-estabelecidas, de acordo com o comportamento do forno descrito pelo modelo matemático e com menor *overshoot* (sobresinal) de resposta.

4.4.1 Simulação I

Escolhendo os parâmetros de controle conforme mostra a Tabela 9 abaixo, a simulação I foi iniciada segundo a técnica *Hardware-in-the-loop*, com o controle em modo automático e estabelecendo toda a comunicação *IHM – Simulink – CLP* previamente descrita no capítulo 3.

SIMULAÇÃO I (Parâmetros)		
Controle	T9	M4
Kp	5	5
Ki	5	30
Kd	0	3

Tabela 9 – Parâmetros utilizados na Simulação I

Fonte: Autor (2018)

A simulação I gerou o gráfico presente na Figura 58. Com curvas ainda não controladas dentro dos padrões pré-estabelecidos, o controle deixa claro que ainda precisa ser ajustado. Apesar de já demonstrar que a arquitetura de controle aponta para a direção correta, fica evidente por meio de análise gráfica, que esse refino necessário pode ser obtido mediante ajustes dos parâmetros Kp, Ki e Kd do controlador.

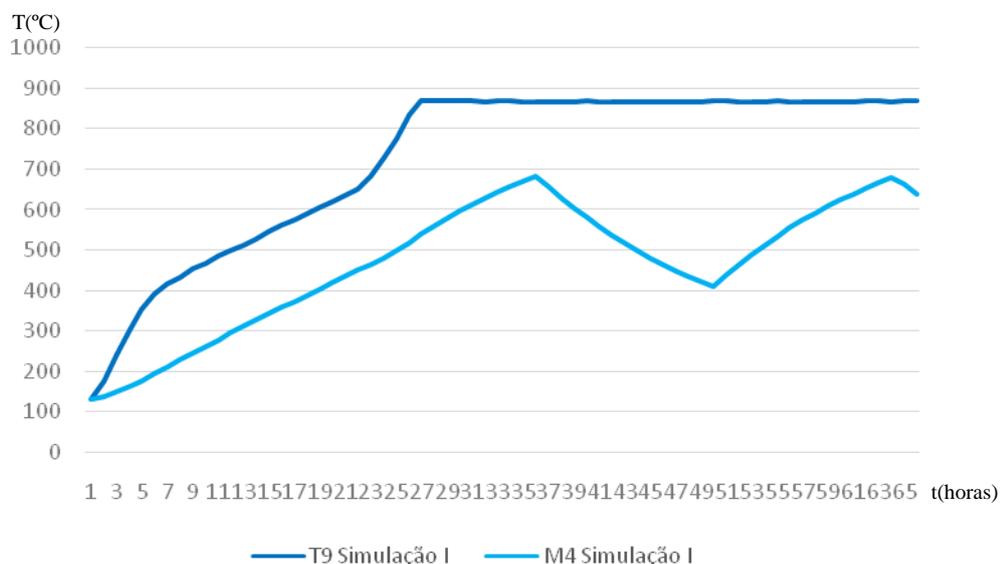


Figura 58 – Gráfico da Simulação I

Fonte: Autor (2018)

Os parâmetros utilizados na simulação são inseridos pelo operador via IHM. A Figura 59 mostra a telas de detalhes dos controles da alimentação e do comportamento do *damper*, onde são definidos os parâmetros e condições de controle.

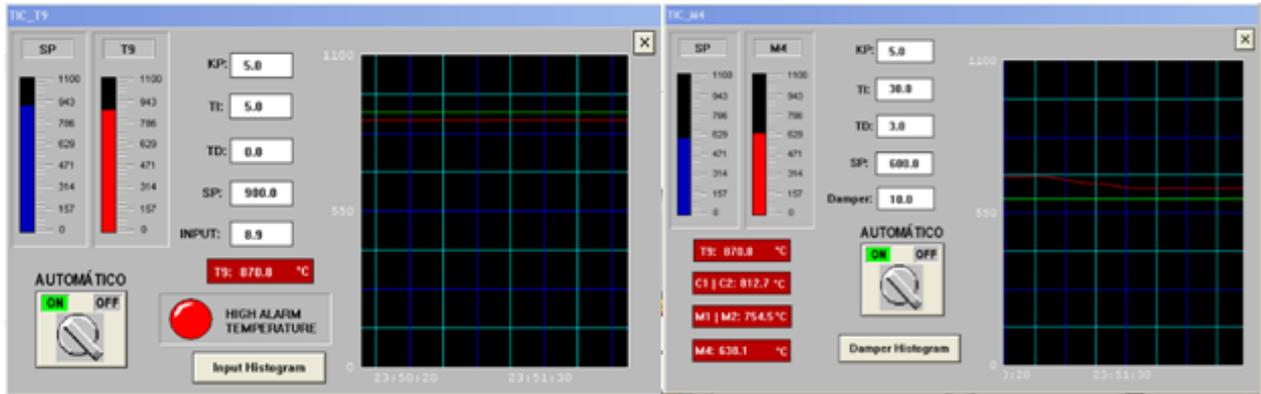


Figura 59 – Detalhes do controle de T9 e M4 para Simulação I

Fonte: Autor (2018)

4.4.2 Simulação II

Com base nos parâmetros escolhidos para a primeira simulação e em comparação com os resultados obtidos, esses parâmetros de controle são refinados para a segunda simulação. Com o objetivo de alcançar resultados em maior conformidade com as condições de controle arquitetadas previamente, esses parâmetros são redefinidos e dá-se início à simulação II. Utilizaram-se as mesmas técnicas da simulação I, por meio dos mesmos tipos de comunicação. A Tabela 10 a seguir traz os parâmetros de controle escolhidos para a segunda simulação.

SIMULAÇÃO II (Parâmetros)		
Controle	T9	M4
Kp	3	1
Ki	2	20
Kd	0	2

Tabela 10 – Parâmetros utilizados na Simulação II

Fonte: Autor (2018)

A simulação II gerou o gráfico presente na Figura 60, com curvas mais de acordo com os padrões estabelecidos para o controle. Nota-se ainda uma instabilidade quanto às curvas de subida, principalmente para a curva T9. Um *overshoot* de resposta significativo ainda é encontrado, principalmente na curva M4, o que não é desejado à resposta de controle. A segunda simulação confirma mais ainda que a arquitetura de controle se encontra na direção correta. Os problemas ainda encontrados na simulação II podem ser corrigidos mediante ajustes finos quanto aos parâmetros de controle, no entanto as curvas já se encontram bem mais ajustadas quanto ao que se espera como resposta da queima mediante o controle.

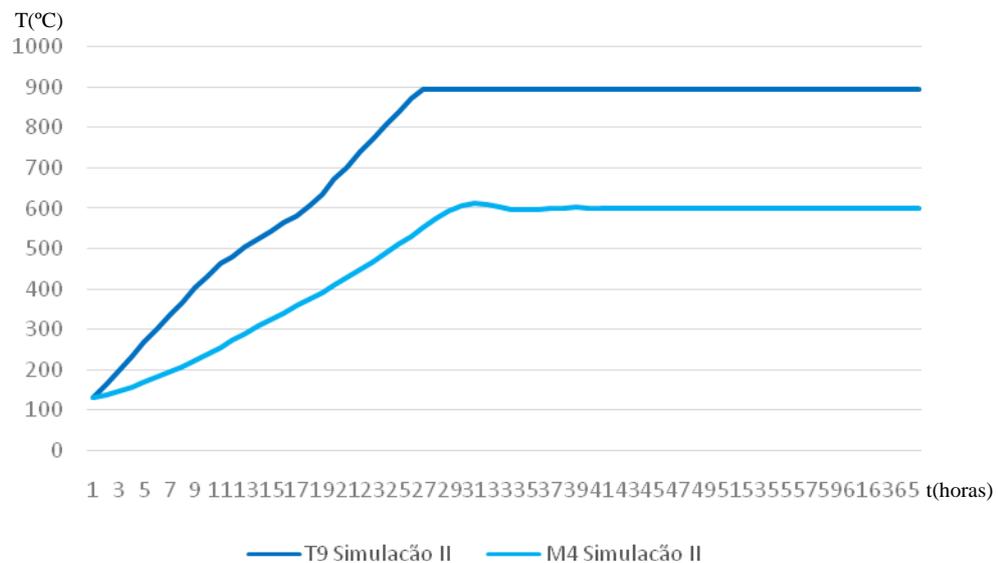


Figura 60 – Gráfico da Simulação II

Fonte: Autor (2018)

A Figura 61 mostra a telas da IHM onde são inseridos os parâmetros utilizados na Simulação II e onde pode-se acompanhar o processo de queima sob ações do controle em simulação.

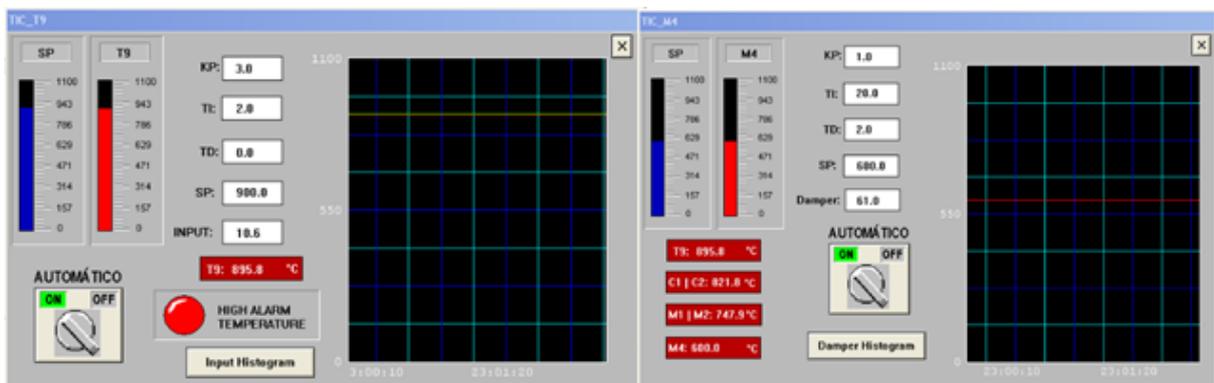


Figura 61 - Detalhes do controle de T9 e M4 para Simulação II

Fonte: Autor (2018)

4.4.3 Simulação III

Da mesma forma, os parâmetros K_p , K_i e K_d foram melhor ajustados para a simulação III. Findando um resultado mais apropriado para o controle, foram utilizadas as mesmas técnicas e comunicações, com foco na alteração dos parâmetros. Essa alteração pode ser verificada na Tabela 11 abaixo.

SIMULAÇÃO III (Parâmetros)		
Controle	T9	M4
K_p	1	2
K_i	1	50
K_d	0	1

Tabela 11 – Parâmetros utilizados na Simulação III

Fonte: Autor (2018)

A simulação III foi a melhor resposta constatada no software de simulação diante das alterações de parâmetros. Nota-se que a ascensão da curva T9 ocorreu segundo a condição pré-estabelecida de 30 °C à cada 2 horas, a curva M4 subiu conforme a ascensão de T9, os valores se estabilizaram nos *setpoints* definidos para cada curva com *overshoot* de resposta desprezível e seguiram dessa forma até o final da queima. A terceira simulação confirma a arquitetura de controle desenvolvida, confirma a modelagem considerada e chega aos parâmetros de controle ideais conectando todos os pontos teóricos e práticos do projeto.

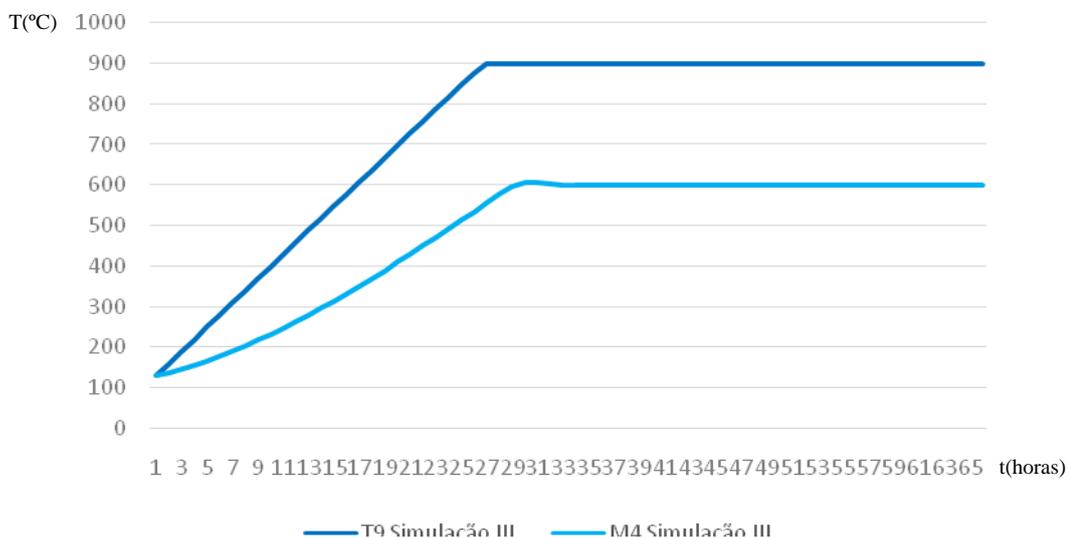


Figura 62 – Gráfico da Simulação III

Fonte: Autor (2018)

A Figura 63 mostra a tela geral da IHM evidenciando a ação de controle mantendo a aferição do termopar T9 em 900 °C e a do termopar M4 em 600 °C. A máquina de pó de serra recebe sinal de controle 11.0 (unidades de engenharia), suficiente para manter a temperatura constante e o *dampner* se encontra aberto em 61% (ponto de equilíbrio).

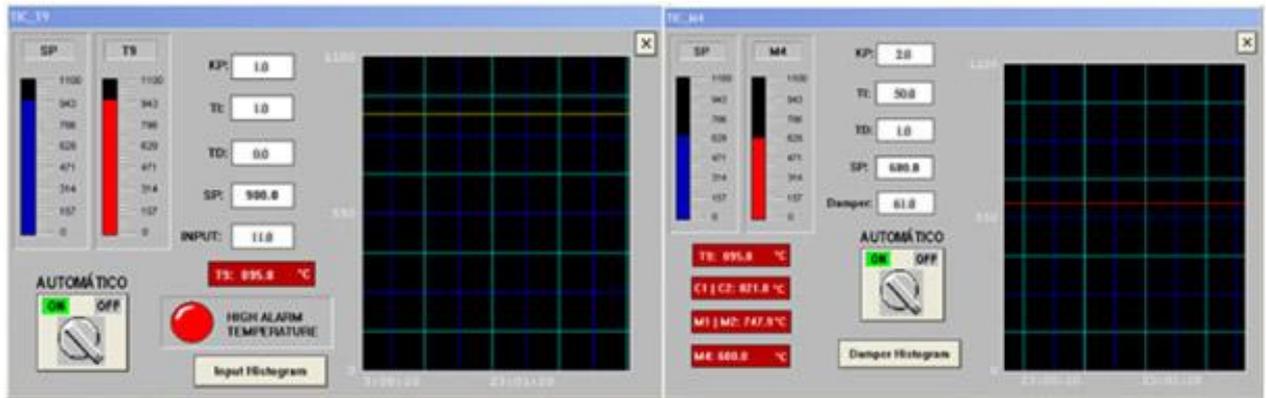


Figura 63 – IHM mostrando a atuação durante patamar da simulação III

Fonte: Autor (2018)

4.5 Resultados com Base na Avaliação Gráfica e Ciclo de Queima

Em posse dos dados referentes às simulações e às queimas reais parametrizadas, as comparações entre as queimas naturais e às queimas controladas podem ser feitas para maiores análises e obtenção de conclusões técnicas. A simulação considerada para comparação foi a terceira, que possui melhor resposta, diante de parâmetros de controle mais refinados. Os dados dessa simulação foram comparados com os dados das 3 queimas reais obtidos antes mesmo do desenvolvimento do controle. As Figuras 64, 65 e 66 a seguir mostram a comparação do comportamento das curvas de queima sob ação do controle em simulação e o comportamento das curvas das queimas reais I, II e III.

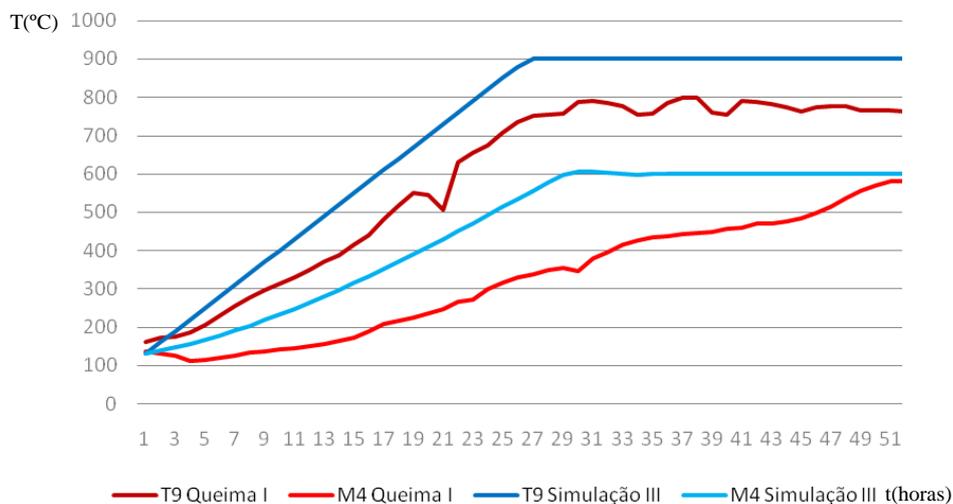


Figura 64 – Simulação III X Queima I

Fonte: Autor (2018)

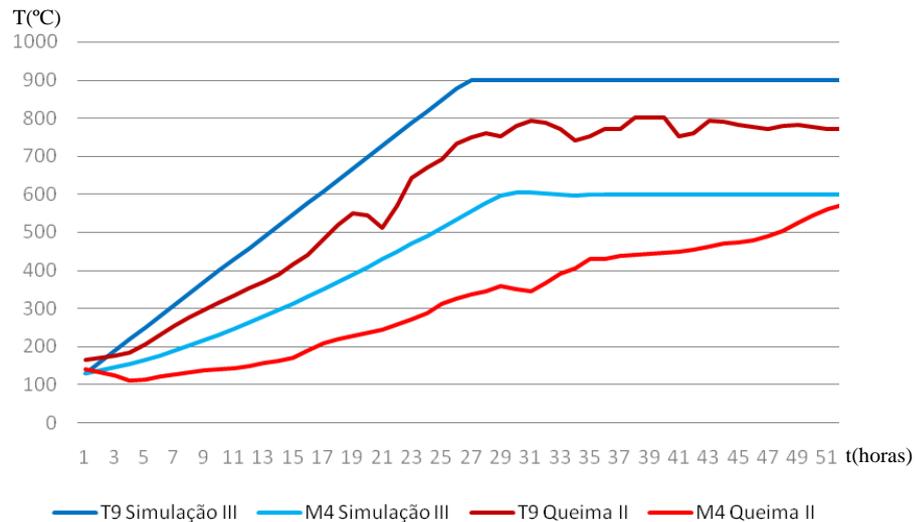


Figura 65 – Simulação III X Queima II

Fonte: Autor (2018)

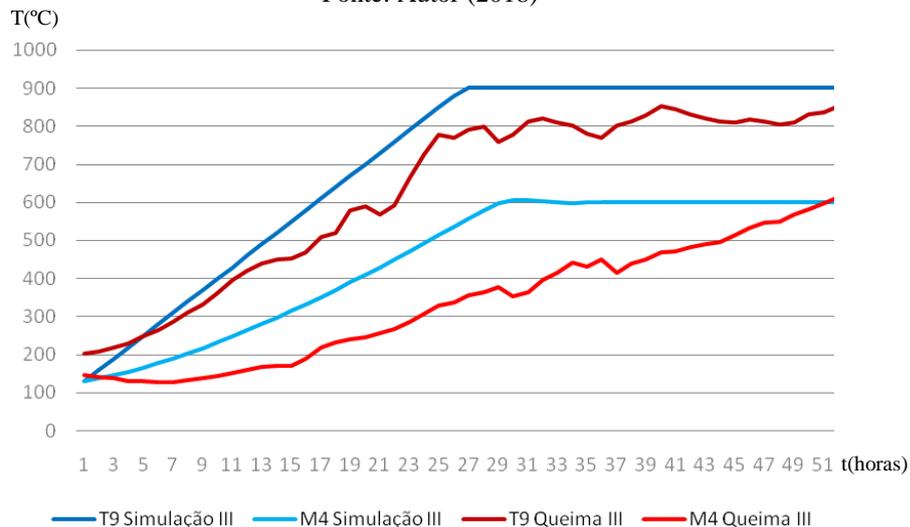


Figura 66 – Simulação III X Queima III

Fonte: Autor (2018)

As queimas reais são claramente muito instáveis, apresentam aumento de temperatura desordenado e praticamente nenhuma estabilidade. Suas curvas apresentam valores muito altos e muito baixos em sequência, comportamento prejudicial ao material no interior do forno. Apesar de seguirem todas um mesmo padrão, o que ocorre nessas queimas acaba impactando o processo de forma negativa. O controle apresentou correção justamente para essas questões, trazendo consequentes melhorias que podem ser constatadas mediante análise gráfica e comparações com dados retirados da literatura e do próprio objeto de estudo.

Com base nos gráficos expostos, verifica-se que o comportamento da queima mediante ação do controle é muito mais satisfatório do que o comportamento das 3 queimas reais em comparação. Com ação do controle, as temperaturas de referência foram alcançadas de forma

gradual, seguindo a regra de aumento de temperatura que garante as características técnicas das peças cerâmicas, em acordo com as normas. O comportamento do controle fica definido basicamente em duas fases, a fase do aquecimento gradativo e a fase do patamar onde a queima é estabilizada. Fica evidenciado graficamente que a arquitetura de controle desenvolvida é bem precisa e leva às curvas de queima aos seus devidos valores de referência (*setpoints*) considerando as intempéries descritas pela simulação. Uma vez em seus *setpoints*, as curvas são mantidas estáveis e sem erros.

Durante análise das queimas reais, verifica-se um padrão quanto às temperaturas em cada nível de aferição. O controle foi construído levando esse padrão em consideração, considerando as temperaturas de referência para as curvas de T9 e M4. Os últimos gráficos deixam claro que devido à ação do controle, essas curvas conseguiram ser mantidas de forma estável por volta das 50 horas iniciais de queima. Essa estabilidade no valor das curvas visa garantir um fluxo de calor uniforme e contínuo desde a entrada de calor (parte superior) até a saída de ar (base da abóbada), controlando o resultado da queima quanto à carga intermediária que por muitas vezes apresenta o maior problema. Com um fluxo de calor incidindo de forma contínua sobre a carga, os gases provenientes da queima podem ser melhor distribuídos. Tudo isso garante a atuação da queima de forma mais uniforme, tanto na carga superior e inferior em seus valores de referência, quanto na carga entre esses valores de controle.

Quanto ao gasto com combustível, sabe-se que uma queima real atualmente gasta em torno de 13.000 Kg de pó de serra, considerando a vazão mássica total dos 4 alimentadores envolvidos no sistema. Levando em conta que as curvas T9 e M4 alcançam sua estabilidade quanto ao *setpoint* em torno de 50 horas e precisam teoricamente manter-se estáveis em seus valores de referência por mais 50 horas (informação constatada experimentalmente), o tempo total de queima pode ser reduzido das habituais 130 horas para cerca de 100 horas apenas. Essa redução no tempo de queima acarreta uma série de ganhos ao processo, seja em relação ao tempo de produção e entrega do produto, seja quanto ao gasto energético ou à emissão de gases poluentes. Com essa redução no tempo de queima, economiza-se cerca de R\$550,00 com combustível por queima (levando em consideração os valores assumidos nesta pesquisa para o preço do saco de pó de serra e para o consumo de combustível por queima na cerâmica em estudo). Levando em consideração o valor de R\$2.380,00 para o gasto de combustível por queima, a quantia de R\$550,00 representa 23% de economia quanto ao gasto com combustível. Considerando ainda que o gasto com combustível representa 30% do custo total do produto final cerâmico e que em uma queima produz-se cerca de 50.000 unidades de peça

cerâmica, essa economia diminuiria o custo final dos tijolos em 20%. Esses valores isoladamente não parecem ser expressivos quando analisados em pequena escala, mas levando em consideração o baixo valor agregado ao produto final e que o mesmo é vendido por milheiro, essa economia em cima de cada unidade faz considerável diferença no lucro de produção final. É importante ressaltar que esses são cálculos de economia baseados apenas na redução do tempo total da queima. O sistema de controle traz benefícios tais como dosagem na ingestão de combustível, melhor aproveitamento do poder calorífico do sistema, dentre outros que garantem ainda mais economia no âmbito geral. Os valores aqui estimados são apenas uma visão geral dos benefícios do controle quanto ao gasto energético.

Devido à redução no tempo de queima, a redução do tempo de emissão de gases poluentes ocorre por consequência. Reduzindo o tempo total de queima para cerca de 100 horas segundo a ação do controle, ocorre uma redução aproximada de 6.120 mg/Nm^3 na emissão de monóxido de carbono para a atmosfera, praticamente 23% da emissão total (sendo 3.250 mg/Nm^3 o limite de emissão de CO definido pela CONAMA e 24.478 mg/Nm^3 a emissão real dos fornos cerâmicos para queimas de 120 horas).

4.6 Resultados com Base na Eficiência Térmica

A eficiência térmica leva em conta a quantidade de calor que entra e que sai do sistema. Como visto na Seção 3.2.3.2 – “Eficiência”, os mesmos cálculos podem ser feitos com base nas temperaturas de entrada e saída do objeto de estudo. Sendo assim, analisando o forno em questão, verifica-se que o termopar T9 leva em conta a temperatura fora da carga e no topo da abóbada. Já o termopar M4 leva em conta a temperatura na carga, localizada na base do forno. Por conta disso, a eficiência do forno só pode ser calculada em relação à carga localizada no nível de aferição M4. Isso quer dizer que o valor retornado pelo termopar M4 aponta para a temperatura que está sendo retida na carga e não a temperatura que está sendo jogada à atmosfera através da chaminé. Logo, o cálculo de eficiência que levar em conta as aferições de M4, resultará em valores baixos caso a eficiência seja alta (tendo em vista que se uma queima foi eficiente o calor ficou retido na carga). Para que a eficiência seja aferida da maneira convencional, é necessário instalar um sétimo termopar após a medição de M4, no duto subterrâneo que conduz o calor para a atmosfera. Dessa forma, tomando o novo termopar como referência, ele iria aferir de fato a quantidade de calor que sai do sistema e não o calor retido na carga. A Figura 67 mostra a proposta de adição do sétimo termopar (B0) para cálculo padrão da eficiência térmica do sistema.

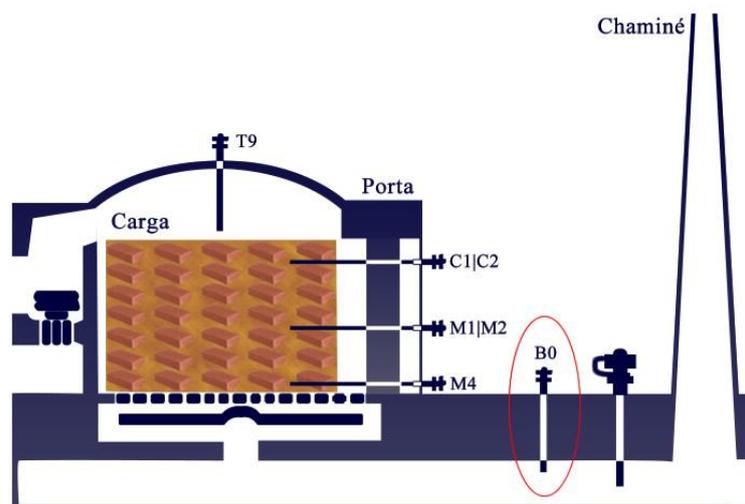


Figura 67 – Proposta de adição do sétimo termopar

Fonte: Autor (2018)

Considerando então a temperatura de entrada no sistema como sendo as aferições do termopar T9 e a temperatura de saída do sistema como sendo a temperatura da carga em M4, a queima I apresentou eficiência máxima de 59%, a queima II 59% e a queima III 59,6%. Como pode ser observado, os valores de eficiência são bem semelhantes entre as 3 queimas reais, evidenciando que sem a ação de um controle mais rebuscado e seguindo os mesmos padrões de monitoria não se alcançam resultados diferenciados. Realizando os mesmos cálculos para o comportamento do sistema sob a ação do controle (simulação III), o maior valor de eficiência encontrado foi 42,9% deixando claro que o calor proveniente da queima ficou retido no interior do forno, sendo menos desperdiçado à atmosfera. Esses dados comprovam, diante da estrutura e das limitações físicas do forno em estudo, que através das ações de controle a eficiência da queima foi aumentada em média 16%. Essa melhoria na eficiência térmica em combinação com as demais condições de trabalho que o controle garante, resultam em uma queima bem mais adequada aos padrões necessários à um cenário ideal.

Além das melhorias destacadas mediante os dados pesquisados e gerados por esta pesquisa, existem muitos outros aspectos que podem ser considerados. Porém, muitas comprovações só poderiam mesmo ser feitas caso o projeto fosse implementado fisicamente em campo. De qualquer forma, o controle desenvolvido já garante algum nível de melhoria ao processo de queima, mesmo que suas condições reais sofram modificações significativas. A lógica de controle visa reagir de forma proporcional às intempéries que o sistema possa sofrer, garantindo o mínimo de correção ao processo real de acordo com as condições pré-estabelecidas no modelo lógico.

4.7 Custo de Implementação do Projeto

Para implementação física do projeto em questão, um instrumental extra deve ser considerado. Este levantamento leva em consideração apenas o custo dos instrumentos principais e auxiliares exigidos pelo projeto, lembrando que essa implementação deve possuir foco no baixo preço, permitindo que as melhorias sejam atribuídas ao processo de forma gradativa. Caso contrário, o investimento não se justificaria, por não fornecer um retorno significativo quanto à lucratividade.

O projeto conta principalmente com um controlador lógico programável “Phoenix Contact ILC 131 Eth”; que necessita ter acoplado o “Módulo Mini MCR-SL-RPS-I-I Phoenix Contact”, um mini conversor de sinais. Para administrar o sinal de controle quanto aos atuadores, deve-se utilizar um “inversor de Frequência WEG CFW 10”. Os atuadores do processo são um “alimentador de serragem BUDNY modelo OFZ04” e um “*damper* tipo guilhotina”. Os “termopares tipo K” são essenciais para controle e aferição de variáveis, podem ser considerados os termopares do topo (T9), os da parte superior da carga (C1 e C2), os da parte do meio da carga (M1 e M2), o da parte inferior da carga (M4) e o do duto subterrâneo para controle da eficiência (B0). A Tabela 12, mostra os equipamentos considerados para implementação do projeto de controle com seus respectivos preços estimados de mercado. Os valores levantados foram consultados com base em fornecedores independentes que disponibilizam esse tipo de instrumental industrial no mercado, sempre visando o menor preço.

Custo para Implementação	
Equipamento	Valor de Mercado
C.L.P Phoenix Contact ILC 131 Eth	R\$1.062,07
Módulo Mini MCR-SL-RPS-I-I Phoenix Contact	R\$603,28
Inversor de Frequência WEG CFW 10	R\$467,06
Alimentador de Serragem LZT Mod. OFZ04	R\$1.545,00

Damper	R\$19.890,00
Termopar tipo K	R\$46,90

Tabela 12 – Custo de implementação do projeto

Fonte: Autor (2018)

Em posse desses valores, para implementação completa da solução de engenharia proposta, deve-se considerar as unidades específicas para cada instrumento de acordo com a arquitetura do projeto. A solução conta com 2 inversores de frequência para os atuadores, 4 alimentadores de serragem e 6 termopares. Levando tudo isso em conta, a implementação física completa do projeto em cima do objeto de estudo ficaria em torno de R\$29.000,00 quanto ao custo instrumental. Levando em conta que o objeto de estudo em questão já possui os 4 alimentadores de serragem e 5 termopares, essa implementação sairia por apenas R\$22.500,00. Esses custos são relativamente baratos se comparados às implementações de engenharia de forma geral, podendo ser gradativamente aplicados, de forma a receber reembolso mediante o próprio retorno financeiro gerado pela melhoria dos resultados.

4.8 Benefícios à Sociedade

A problemática assumida pela pesquisa abrange o setor cerâmico não só no âmbito regional. Sua resolução é de grande interesse por parte da sociedade, devido também aos benefícios em que resulta relativo à diversas áreas.

Inicialmente, o estudo visava atender as necessidades específicas do setor cerâmico, o foco estava nas cerâmicas regionais e no constante desenvolvimento do polo cerâmico de Campos. O investimento em tecnologia para melhoria da qualidade do processo envolve uma série de questões, inclusive relacionadas à quebra de paradigmas e adaptação cultural. Para que ocorram mudanças significativas em relação ao nível de qualidade do setor, a consciências de processo e de função devem sofrer alterações. Essas mudanças culturais, quando implantadas, trazem maior segurança econômica para o setor, maior satisfação dos colaboradores envolvidos no processo de produção e maior satisfação quanto aos consumidores que diretamente avaliam a qualidade do produto final. Essa consciência de função e de valor, afeta sobremaneira na produtividade do setor, promovendo um processo de melhoria em cascata relacionado à vários quesitos.

Espera-se que os investimentos, junto à nova cultura da qualidade, estimulem cada vez mais as boas condições de trabalho e capacitação da mão de obra empregue. Por meio dos lucros provenientes de diversos pontos otimizados no processo de produção, os investimentos em melhores condições de trabalho e remuneração podem ser considerados. A evolução do setor produtivo de cerâmica vermelha pode ocorrer de forma gradual, até que o tome por completo. As soluções de engenharia focadas no baixo custo, como é o caso desta pesquisa, podem ser o ponto de ignição para o aprimoramento do setor como um todo.

Quanto à um último aspecto, as contribuições à academia estão ligadas ao estudo das interseções entre os temas-chave definidos na Seção 3.2.1.3 – “Definição dos Temas-chave”. As maiores contribuições para a ciência foram encontradas nas interseções das áreas do conhecimento que ainda não haviam sido exploradas de fato. Esta pesquisa busca solucionar um problema frequente ao meio cerâmico, porém não amplamente explorado até o presente momento.

Através do desenvolvimento desse projeto, obteve-se um sistema de controle que contribui diretamente para a redução do consumo de combustível, distribuição calorífica mais uniforme e diminuição da emissão de gases poluentes. Mais especificamente, obteve-se um processo de queima otimizado em vários aspectos, aproveitando melhor seu potencial calorífico e controlando a queima dentro de cenários esperados. Tendo em vista a diferença entre o ideal e o real, o controle desenvolvido visa a máxima eficiência térmica proveniente do mínimo possível de combustível. O processo de queima otimizado, por sua vez, é aquele que resulta no máximo de peças cerâmicas cozidas de maneira uniforme, que apresentam características bem semelhantes e em conformidade com as especificações técnicas exigidas em cada região.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve por objetivo projetar, desenvolver e simular um sistema de controle capaz de otimizar o processo de queima em fornos intermitentes de cerâmica vermelha. Seguindo essa linha de raciocínio, o controle desenvolvido assume uma lógica proporcional de abertura do *damper* (saída de ar) baseada no aumento gradativo da temperatura de entrada mediante controle da alimentação. Por meio desse controle, algumas condições necessárias para um fluxo de calor constante são garantidas, outras melhorias também podem ser evidenciadas mediante análise das curvas de queima geradas graficamente e redução do tempo total da etapa da queima.

Foram acompanhadas 3 queimas reais em campo. Seus comportamentos apresentam picos e ínfimos de temperatura prejudiciais às peças cerâmicas, além de uma instabilidade constante quanto à essas aferições. Essas queimas foram padronizadas e suas aferições reorganizadas em um intervalo padrão (de 2 em 2 horas), com a finalidade de permitir que seus dados fossem manipulados e comparados com outros, provenientes das simulações e da modelagem matemática. Com base na lógica de controle que descreve o comportamento ideal para o processo de queima, simulações de controle utilizando a técnica *Hardware-in-the-loop* foram repetidas mediante variação dos parâmetros do PID, procurando obter a melhor resposta. A simulação do processo de queima sob a ação do controle resulta em curvas de queima controladas, sem variações abruptas, erros ou sinais significativos de *overshoot* para a resposta.

O comportamento da simulação foi comparado graficamente ao comportamento das queimas reais. Tanto para a simulação do processo de queima quanto para o desenvolvimento do controle, foi desenvolvido um modelo matemático que melhor descreve o comportamento que a temperatura do processo deve assumir, para proporcionar um fluxo de calor mais uniforme e uma queima em maior conformidade com os parâmetros e padrões desejados. Essa modelagem matemática serve também para a melhor compreensão da dinâmica do sistema e comprovação da arquitetura de controle desenvolvida. Todos os resultados cumprem a prova real entre si e demonstram fidelidade quanto ao comportamento físico real, conhecido para o processo. Para validação da modelagem foram efetuados 3 testes, com variação dos parâmetros do modelo, em comparação à uma das queimas reais consideradas na pesquisa. Dentre os testes, foi verificado que quanto à curva gerada pelas aferições do termopar T9, o teste que melhor descreveu o comportamento real foi o de número 2 e que abrange os parâmetros $\beta = 0,04$ Hz, $T_s = 900$ °C e $\gamma = 0,11$ Hz. Quanto à curva gerada pelo termopar M4,

o teste mais fiel foi o de número 3 e que contou com os parâmetros $\beta = 0,02$ Hz, $T_s = 580$ °C e $\gamma = 0,06$ Hz. Onde “ β ” representa a constante de condução térmica, “ T_s ” a temperatura final do forno e “ γ ” a taxa de decréscimo da umidade. Mediante a alteração desses parâmetros dentro da equação que descreve o modelo, ficou comprovado que o mesmo descreve o comportamento otimizado da queima real (de forma mais linear).

Foram realizadas 3 simulações, com alteração dos parâmetros proporcionais, integrais e derivativos, com o objetivo de levar o comportamento da queima para os parâmetros desejados e descritos ao controle. A simulação que obteve o melhor resultado possível na ferramenta e que contempla os parâmetros $K_p = 1$, $K_i = 1$ e $K_d = 0$ para T9 e $K_p = 2$, $K_i = 50$ e $K_d = 1$ para M4, foi comparada com as 3 queimas reais anteriormente apresentadas. O comportamento da queima com a ação do controle seguiu o aumento gradativo de 30 °C à cada 2 horas para a curva de T9 e abertura do *damp*er proporcional ao comportamento de T9. O controle manipulou as curvas em duas fases, a do aquecimento (elevação da temperatura até o patamar) e a do patamar onde as curvas foram mantidas estáveis em seus respectivos *setpoints*.

Os resultados das simulações evidenciam melhorias em diversos quesitos no processo de queima. Alguns pontos só podem mesmo ser comprovados mediante implementação prática e testes reais no processo de queima, mas as análises gráficas com base nos dados consolidados da literatura levam a pesquisa à algumas conclusões de impactos significativos. Controlando as curvas de queima numa ascensão gradativa e depois estabilizadas em valores padrão de acordo com as características físicas do processo, fica garantido que a incidência do calor sobre as peças cerâmicas ocorre de maneira mais uniforme. Seguindo essas variações de temperatura de forma a respeitar as propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos na massa cerâmica, garante-se um resultado final em conformidade com as normas que especificam as características técnicas aceitáveis, para que o produto final possua valor de mercado. Outro ponto de extrema importância é que a temperatura de referência é atingida da maneira mais rápida possível. Sendo assim, considerando que o poder calorífico do forno foi melhor aproveitado e que o processo de elevação de temperatura foi adiantado, é possível reduzir o tempo total de queima. Essa redução de tempo impacta sobremaneira diversos valores inerentes à queima.

Com redução no tempo total da etapa da queima, a economia com combustível fica em torno de R\$550,00 por queima, representando 23% de economia quanto ao gasto com combustível e impactando numa redução de 20% quanto ao custo do produto final. De igual

forma, a redução de emissão de gases poluentes também ocorre, uma vez que o processo de queima é encurtado. Ocorre uma redução aproximada de 6.120 Mg/Nm³ na emissão de monóxido de carbono para a atmosfera, praticamente 23% da emissão total para uma queima de 120 horas. Vale ressaltar que o controle traz outros benefícios ao processo que não podem ser verificados sem a implementação real do sistema. As melhorias apontadas na pesquisa levam em consideração apenas a redução do tempo total da etapa de queima.

Do ponto de vista da eficiência térmica, foi verificado que as queimas reais sem controle mostram uma eficiência relativamente parecida e com a ação de controle essa eficiência pode ser melhorada em cerca de 16%. Com o controle do processo, o poder calorífico da queima é melhor aproveitado no interior do forno, sendo retido pela carga ao invés de ser desperdiçado à atmosfera como ocorre no processo natural.

O custo para implementação física do projeto se mostrou viável. Com foco no baixo custo de investimento em um processo que resulta em um produto final de baixo valor agregado, a solução conta com 1 C.L.P Phoenix *Contact* ILC 131 Eth, 1 Módulo Mini MCR-SL-RPS-I-I Phoenix *Contact*, 2 inversores de frequência WEG CFW 10, 4 alimentadores de serragem BUDNY Modelo OFZ04, 1 *damper* tipo guilhotina e 6 Termopares tipo K. A implementação física completa do projeto em campo ficaria em torno de R\$29.000,00. Levando em conta os elementos que o objeto de estudo em questão já possui, essa implementação ficaria em torno de R\$22.500,00.

Após todas as análises, verifica-se que o modelo matemático descreve o comportamento da queima real, contribuindo para a melhor compreensão da dinâmica do sistema, sendo peça importante para o controle e para a simulação da atuação do controle e comprovando os resultados e análises finais. O controle desenvolvido com foco na abertura / fechamento do *damper* por sua vez, confere à queima resultados melhores dos que os atuais, quanto à eficiência, fluxo de calor incidente, redução do tempo de queima, redução do custo do produto final, redução de emissão de poluentes, dentre outros.

Para pesquisas futuras, ficam as sugestões da implementação do controle, para atuação nas curvas de queima geradas pelas aferições dos termopares intermediários. Dessa forma poderá ser implementado um controle ainda mais refinado e preciso quanto à todos os níveis de aferição de temperatura. Outro passo importante seria também a implementação real desta proposta de controle, chegando às conclusões e constatações que só as aplicações práticas podem demonstrar. O processo de queima acaba sendo algo complexo, que envolve muitas

questões de diferentes vertentes. A presente pesquisa abre caminho para uma série de estudos paralelos que juntos comporiam a grande resposta final quanto à etapa da queima cerâmica. Estudos mais específicos quanto à propriedade dos materiais envolvidos na produção cerâmica e quanto à disposição física dos diferentes tipos de peças dentro de um mesmo forno e de uma mesma queima, podem também entrar como boas sugestões para futuras pesquisas. Todos esses estudos quando agregados, tratam do problema central da inconstância do processo de queima que envolve “n” fatores. Afinal, a pesquisa é viva e existem sempre novas possibilidades de colaborações.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. (2016). *Estudo técnico setorial da cerâmica vermelha*. Recuperado em 10 janeiro, 2018, https://old.abdi.com.br/Estudo/05prova_p%C3%A1gina%20%C3%BAnica%20-%20Cer%C3%A2mica%20Vermelha.pdf

Associação Brasileira de Cerâmica. (2002). *Introdução*. Recuperado em 17 janeiro, 2018, de http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp

Associação Brasileira de Cerâmica. (2018). *Informações Técnicas - Processo de Fabricação*. ABCERAM. Recuperado em 15 de fevereiro, 2018, de <http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>

Associação Brasileira de Cerâmica. (2018) *Informações técnicas – definição e classificação*. Recuperado em 17 janeiro, 2018, de <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/?fbclid=IwAR0IVcyQ0-nmqDope0qPcenHUtNKgJLso5s1WYp7WJqVquXWb3zfqz9Bf0>

Associação Nacional da Indústria Cerâmica. (2018). *Dados do Setor*. Recuperado em 10 janeiro, 2018, <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback Systems - An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton: Princeton University Press.

Azevedo, N. T. (2017). *Reaproveitamento Energético em Forno Intermitente na Indústria Cerâmica Vermelha*. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal Fluminense, Macaé, RJ, Brasil.

Banco do Nordeste do Brasil. (2010) *Informe Setorial Cerâmica Vermelha*. ETENE – Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, BNB. Recuperado em 17 janeiro, 2018, de http://www.banconordeste.gov.br/documents/88765/89729/ano4_n21_informe_setorial_ceramica_vermelha.pdf/66eb35dc-dd49-420d-a921-26e9efc320d9

Bega, E. A., Delmée, G. J., Cohn, P. E., Bulgarelli, R., Koch, R., & Finkel, V. S. (2011). *Instrumentação Industrial* (3a ed.). Rio de Janeiro: Interciência.

Bin Lu, Monti, A., & Dougal, R. A. (2003). Real-time hardware-in-the-loop testing during design of power electronics controls. *IEEE*, vol. 2, 1840–1845.

Boyer, S. A. (1993). *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. Instrument Society of America.

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.

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.

Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução (5a ed.)*. Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora.

Cava, S. S. (2015). *Otimização do Processo de Queima de Revestimentos Cerâmicos por meio do Controle da Atmosfera do Forno*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

Choi, D., Kim, H., Won, D., & Kim, S. (2009). Advanced Key-Management Architecture for Secure SCADA Communications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), 1154–1163.

Coelho, J. M. (2009). *Projeto de assistência técnica ao setor de energia: perfil de argilas para cerâmica vermelha* (Relatório Técnico, 32), Brasília, Ministério de Minas e Energia.

Coelho, J., Pinho, T. (2018). *Introdução ao Simulink® Aplicações na engenharia*. Recuperado em 15 abril, 2019, de <http://www.ipb.pt/~jpcoelho/CCD/documento.pdf>

Costa, H., (2009). *A modelagem Matemática Através de Conceitos Científicos*. *Ciência e Cognição*, v. 14, n. 3. Rio de Janeiro.

Coutinho, J. C. S. (2006). *Indústria Cerâmica de Campos: um retrato em preto e branco*. Dissertação de mestrado, Universidade Cândido Mendes, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

CRANFOS Soluções Ambientais. (2016). *Equipamentos: Damper para Ar e Gases*. Recuperado em 22 abril, 2019, de <https://cranfos.com.br/equipamentos/dampers.html>

Cruz, J. J. (2004). *Entendendo e Ajustando Malhas De Controle*. Escola Politécnica da USP - EPUSP.

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (1998). *Modern control systems* (8th ed.). Menlo Park: Addison-Wesley.

Dutra, R. P.S. (2007). *Efeito da Velocidade de Aquecimento nas Propriedades de Produtos da Cerâmica Estrutural*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil.

Edwards, A. W. (2004). *Cogwheels of the Mind: The Story of Venn Diagrams*. London: The Johns Hopkins University Press.

Eletrobras, 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. (2009). *Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos*. São Paulo: Érica.

GALP, (2017). *Metodologia e Procedimentos de Testes – Versão 4.1*. Recuperado em 22 abril, 2019, de <http://www.galpenenergia.com/PT/DSI/Documents/Metodologia-e-Procedimentos-de-Testes.pdf>

- Gao, J., Liu, J., Rajan, B., Nori, R., Fu, B., Xiao, Y., Liang, W., & Chen, C. L. P. (2014). SCADA communication and security issues. *Security and Communication Networks*, 7(1), 175-194.
- Gasch, J. (2007). Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Evolução e Perspectivas. *Cerâmica Industrial*, 12(3), 15-26.
- Grim, R. E. (1968). *Clay Mineralogy* (2nd ed. ed.). New York: McGraw-Hill.
- Hayden, E., Assante, M., Conway T. (2014). An Abbreviated History of Automation and Industrial Control Systems and Cybersecurity. SANS Analyst Program.
- Incropera, F., De Witt, D., (2017). *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 7ª Edição*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- 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.
- Kokot, C. (1998). *Jahrbuch für die Ziegel Baukeramik und Steinzeugröhren Industrie*. Berlin,
- Lima, Y. (2018). *Sistema de Controle de Alimentação para Fornos Intermitentes em Indústria de Cerâmica Vermelha*. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- Lu, B., Monti, A., & Dougal, R. A. (2003). Real-time hardware-in-the-loop testing during design of power electronics controls. *IEEE*, vol. 2, 1840–1845.
- Menezes, R. R., Neves, G. A., & Ferreira, H. C. (2001). Mapeamento de argilas do Estado da Paraíba. *Cerâmica*, vol.47, n.302, pp.77-81 (2001)77.
- 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.
- Mergel, G. D. (2014). *Método para apoio à construção de strings de busca em revisões sistemáticas por meio de mineração visual de texto*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Messias, L. S., (1996). Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes: Aplicação na Indústria de Cerâmica Estrutural. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 2, p 31 – 37.
- Ministério de Minas e Energia (2017). *Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não metálicos / Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral*. Brasília, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral. Recuperado em 20 de Janeiro, 2018, de http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2017_27.07.2017.pdf/8a777f0f-3f3c-4f03-85de-8fa783f2813c
- Moraes, C. C., & Castrucci, P. (2007). *Engenharia de automação industrial* (2a ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Moreira, L. (2002). Medição de Temperatura Usando-se Termopar. *Cerâmica Industrial*, 7(5), 51-53.

Nascimento, C. A., Pavanello, G., Wojciechowski, E., Rodrigues, P. R., Muniz, G. I., (2016). *Reengenharia de Fornos Cerâmicos Visando o Aperfeiçoamento da Convecção Térmica*. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 1, n. 2, p. 111-122, mai/ago. Panamá.

Nassetti, G. (2010). Como melhorar a eficiência energética na indústria de revestimentos. *Cerâmica Industrial*, 15 (1), 7-12.

Ogata, K. (2007). *Engenharia de controle moderno* (5a ed.). São Paulo: Pearson Prentice Hall.

Oliveira, F. E. M. (2011). *Acompanhamento da Produção Industrial em Cerâmica da Microrregião do Vale do Assu: Estudo de Caso*. Universidade Federal Rural do Semi-árido. Angicos, RN, Brasil.

Paiva Filho, E. C., Agostinho, R. L., Júnior, J. L., Bezerra, F. C., & Aquino, P. L. (2004). Cooperação Internacional E Desenvolvimento Tecnológico: Controle Do Processo De Queima Em Fornos Hoffmann Para Cerâmica Vermelha. *COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*. Brasília, DF, Brasil.

Pereira, J., (2018). *Apostila de Termodinâmica I – Capítulo 5: A Segunda Lei da Termodinâmica*. Recuperado em 22 abril, 2019, de <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/textos/apostila5.htm>

Pinheiro, B. C., & Holanda, J. N. (2010). Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 56(339), 237–243.

Ramos, I. S. Alves, M. G. Alexandre. J. (2006). Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes - RJ. *Cerâmica Industrial*, 11 (1), 28-32. Recuperado em 17 de Abril, 2019, de <http://s3.amazonaws.com/host-article-assets/ci/587657277f8c9d6e028b46ea/fulltext.pdf>

Rede Campos Cerâmica. (2018) *Histórico*. Recuperado em 17 janeiro, 2018, de <http://www.redecamposceramica.com.br/>

Reis, A. S., Della-Sagrillo, V. P., Valenzuela-Diaz, F. R. (2016, Agosto). Caracterização de Resíduo de Massa Cerâmica Crua para Aproveitamento em Cerâmica Vermelha. *Anais do 70º Congresso Anual da ABM – Internacional*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 21.

Ribeiro, L. S. (2008). *Os empreendimentos e estratégias para o desenvolvimento da cerâmica vermelha no Brasil: estudo de caso de Campos dos Goytacazes*. IV CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO - Responsabilidade Socioambiental das Organizações Brasileiras. Niterói, RJ, Brasil. Recuperado em 17 de Abril, 2019, de <http://www.inovarse.org/filebrowser/download/8894>

Robert, E., (2001). *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2ª Edición. Nova Iorque: McGraw-Hill.

Rocha, A. F., & Palma, M. A. (2012) Gestão da inovação e capacidade competitiva: uma análise não paramétrica no setor cerâmico de Campos dos Goytacazes, RJ. *Cerâmica*, 58 (2012), 244-252.

Sampaio, R. F., Mancini, M. C. (2007) Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, v. 11, n. 1, p. 83-89.

Santos, H. S., Kiyohara, P., Coelho, A. C. V., Santos, P. S. (2006). Estudo por Microscopia Eletrônica das Transformações Durante a Queima de Argilas Altamente Aluminosas Brasileiras. *Cerâmica*, 52(2006), 125-137.

Santos, P. S., "Argilas", In: Santos, H. S, Ciência e Tecnologia de Argilas, 2 ed., Capítulo 1, São Paulo-BR, Editora Edgard Blucher LTDA, 1989.

Savi, A. A., Colucci, C. C., (2010). *Termodinâmica*. Recuperado em 22 abril, 2019, de http://nead.uesc.br/arquivos/Fisica/termodinamica/modulo_termodinamica.pdf

Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas & Escola Superior de Propaganda e Marketing. (2008) *Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos* (Relatório Completo/ setembro de 2008), São Paulo, SP, Série Mercado, SEBRAE.

Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. (2012) *Ideias de negócios sustentáveis: Indústria de Cerâmica*. Recuperado em 17 janeiro, 2018, de <http://extranet2.pr.sebrae.com.br/portal/sustentabilidade/Ind%C3%BAstria%20de%20Cer%C3%A2mica.pdf>

Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (2015). *Boletim de inteligência*. Recuperado em 12 de Janeiro, 2018, 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)

Silva, E. L., Menezes, E. M. (2001) *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação* (2a Ed.). Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC.

Silva, R. M. (2011). *Análise Comparativa Entre Propriedades Mecânicas, Termofísicas e Geométricas De Tijolos Produzidos Pelos Fornos Caieira e Abóbada*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

Silva, V. P. (2008). Impactos ambientais da expansão da cerâmica vermelha em Carnaúba dos Dantas-RN. *HOLOS*, 3, pp. 96-112.

Thomazini, D., & Albuquerque, P. (2005). *Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações* (1o ed). São Paulo, SP: Érica.

Tubino, L. C., & Borba, P. (2006). *Etapas do Processo Cerâmico e sua Influência no Produto Final – Massa, Extrusão, Secagem*. Centro de Educação Profissional SENAI Nilo. Rio Grande do Sul: SENAI-RS.

Vieira, C. M. F., Teixeira, S.S., Monteiro S.N., (2009). *Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote*. Campos dos Goytacazes.

Welty, J. R., Wicks, C.E., Rorrer, Wilson, R.E., (2014). *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. 6th Edition*. New York: John Wiley & Son Inc.

Apêndice A – Resolvendo a Equação da Umidade

Partindo da constante de acoplamento que relaciona a temperatura e a umidade, adota-se a seguinte resolução quanto à equação da umidade:

$$\frac{\partial U}{U} = -\gamma \partial t ; \quad (28)$$

$$\ln \frac{U}{U_0} = -\gamma t ; \quad (29)$$

$$\boxed{U = U_0 \cdot e^{-\gamma t}} .$$

Apêndice B – Resolvendo a Equação da Temperatura

A solução para a equação da temperatura fornece:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\beta(T - T_s) - \gamma U . \quad (30)$$

Como foi calculado $U = U_0 \cdot e^{-\gamma t}$, Chama-se $T - T_s = T'$ e tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T'}{\partial t} , \quad (31)$$

então:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = -\beta T' - \gamma U_0 \cdot e^{-\gamma t} \cdot e^{\gamma t} ; \quad (32)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} \cdot e^{\gamma t} = -\beta T' \cdot e^{\gamma t} - \gamma U_0 . \quad (33)$$

Sabe-se que:

$$\frac{\partial [T' \cdot e^{\gamma t}]}{\partial t} = \frac{\partial T'}{\partial t} \cdot e^{\gamma t} + \gamma T' \cdot e^{\gamma t} , \quad (34)$$

então:

$$\frac{\partial [T' \cdot e^{\gamma t}]}{\partial t} - \gamma T' \cdot e^{\gamma t} = -\beta T' \cdot e^{\gamma t} - \gamma U_0 ; \quad (35)$$

$$\frac{\partial [T' \cdot e^{\gamma t}]}{\partial t} = -(\beta - \gamma) T' \cdot e^{\gamma t} - \gamma U_0 . \quad (36)$$

Chamando $u \cdot e^{\gamma t} = x$ e $x_0 = \gamma U_0 / \beta - \gamma$ tem-se:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -(\beta - \gamma)x - \gamma U_0 = -(\beta - \gamma)(x + x_0) . \quad (37)$$

Chamando $x' = x + x_0$, com x_0 sendo uma constante, tem-se:

$$\frac{\partial x'}{\partial t} = -(\beta - \gamma)x', \quad x(t=0) = \mu_0 = T_0 - T_s. \quad (38)$$

Então, resolvendo têm-se:

$$\ln \frac{x'}{x'_{(t=0)}} = -(\beta - \gamma)t, \quad x' = x'_{(t=0)} \cdot e^{-(\beta - \gamma)t}. \quad (39)$$

Dessa forma, retomando os cálculos para a temperatura:

$$x + x_0 = (T_0 - T_s + x_0) \cdot e^{-(\beta - \gamma)t}, \quad (40)$$

$$x'_{(t=0)} = x_{(t=0)} + x_0 = T_0 - T_s + x_0;$$

$$u \cdot e^{\gamma t} + x_0 = (T_0 - T_s + x_0) e^{-(\beta - \gamma)t}; \quad (41)$$

$$(T - T_s) e^{\gamma t} + x_0 = (T_0 - T_s + x_0) e^{-(\beta - \gamma)t}; \quad (42)$$

$$T = T_s - x_0 \cdot e^{-\gamma t} + (T_0 - T_s + x_0) e^{-\beta t}; \quad (43)$$

$$\boxed{T = T_s - \{x_0(e^{-\gamma t} - e^{-\beta t}) + (T_s - T_0)e^{-\beta t}\}}.$$