



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO**



ANTÔNIO EUDSON COSTA CABÓ

**SISTEMA MICROCONTROLADO INTELIGENTE DE BAIXO
CUSTO PARA O MONITORAMENTO DE ALTAS
TEMPERATURAS EM FORNOS DA INDÚSTRIA DE
CERÂMICA VERMELHA.**

MOSSORÓ – RN

2015

ANTÔNIO EUDSON COSTA CABÓ

**SISTEMA MICROCONTROLADO INTELIGENTE DE BAIXO
CUSTO PARA O MONITORAMENTO DE ALTAS
TEMPERATURAS EM FORNOS DA INDÚSTRIA DE
CERÂMICA VERMELHA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – associação ampla entre a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Rommel Wladimir de Lima, D.Sc. – UERN.

Coorientador: Prof. Dannel Cavalcante Lopes, D.Sc. – UFERSA.

MOSSORÓ – RN

2015

Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

Cabó, Antônio Eudson Costa

Sistema microcontrolado inteligente de baixo custo para o monitoramento de altas temperaturas em fornos da indústria de cerâmica vermelha. / Antônio Eudson Costa Cabó. – Mossoró, RN, 2015.

125 f.

Orientador: Prof. Rommel Wladimir de Lima, D.Sc.

Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

1. Ciência da Computação. 2. Sistema - Microcontrolador. 3. Inteligência – Arduino – Fuzzy. 4. Sinterização – Cerâmica - Forno. Sensores - Temperatura.
I. Lima, Rommel Wladimir de. II. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.
III. Título.

UERN/BC

CDD 004

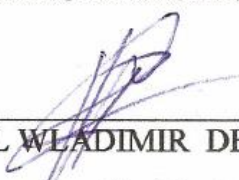
ANTÔNIO EUDSON COSTA CABÓ

**SISTEMA MICROCONTROLADO INTELIGENTE DE BAIXO
CUSTO PARA O MONITORAMENTO DE ALTAS
TEMPERATURAS EM FORNOS DA INDÚSTRIA DE
CERÂMICA VERMELHA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

APROVADA EM: 01 / 04 / 2015.

BANCA EXAMINADORA



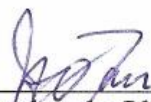
Prof. ROMMEL WLADIMIR DE LIMA, D.Sc. – UERN

Presidente



Prof. Marcos Eyandro Cintra, D. Sc. – UFRSA

Membro interno



Prof. Jose Alberto Nicolau de Oliveira, D.Sc. – UFRN

Membro externo

DEDICATÓRIA

A Deus, criador do céu, da terra, de seu vosso amado filho Jesus Cristo e de todos nós;

A minha família;

Ao meu Orientador Prof. Rommel Wladimir de Lima, D.Sc.;

Ao meu Coorientador: Prof. Danniel Cavalcante Lopes, D. Sc.;

A professora Angélica Félix de Castro, D. Sc.;

Aos demais professores;

Aos secretários Rosita Rodrigues Bezerra e Carlos Magno Bezerra;

E aos colegas de curso e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu saúde, proteção, paz e força para persistir;

Ao Professor Orientador Rommel Wladimir de Lima, D.Sc, pela orientação, dedicação, paciência, amizade e por ter acreditado em meu potencial;

Ao Professor Coorientador Dannel Cavalcante Lopes, D. Sc, que contribuiu com seu apoio, incentivo e positividade;

Aos Professores da banca;

Aos meus pais, que sempre me incentivaram;

À minha esposa, que esteve sempre ao meu lado me apoiando e cobrando a minha fé.

Aos meus colegas de turma que compartilharam comigo o esforço de vencer novos desafios.

EPÍGRAFE

*“Eu sou o caminho, a verdade
e a vida.”*

(Jesus Cristo)

RESUMO

Sistemas microcontrolados dotados de algum mecanismo inteligente podem usar as informações disponibilizadas para resolver problemas, tornando os processos industriais mais eficientes. Dentro do setor produtivo se encontram as indústrias de cerâmica vermelha. Este segmento contribui de forma significativa com o avanço socioeconômico do Brasil, mas ele enfrenta sérios problemas. Entre eles, está à ausência do monitoramento da temperatura na maioria dos fornos das microempresas deste setor, devido a questões financeiras e falta de mão de obra especializada. São nesses pontos que este trabalho de pesquisa atua, disponibilizando um sistema microcontrolado inteligente de baixo custo capaz de indicar as atitudes necessárias para conduzir de forma eficiente à produção de produtos cerâmicos. A primeira fase de desenvolvimento gerou um sistema com a habilidade de informar e traçar um perfil da temperatura no interior do forno durante alguns processos de fabricação através da visualização e registro dos valores da grandeza. Após testes, chegou-se a um modelo com rendimento de 82,81% de produtos com 1ª qualidade. O sistema recebeu novos *hardwares* e um *firmware* com técnicas de inteligência computacional que ampliou a sua capacidade e tornou possível, juntamente com os funcionários, alcançar uma eficiência de 93,97%.

Palavras-Chave: Sistema. Microcontrolador. Inteligência. Arduino. Fuzzy. Agentes. Sinterização. Cerâmica. Forno. Sensores. Temperatura.

ABSTRACT

Microcontroller systems with artificial intelligence can use the available information to solve problems, making the most efficient industrial processes. Within the productive sector are the red ceramic industries. This segment contributes significantly to the socioeconomic advancement of Brazil, but it faces serious problems. Among them is the lack of temperature monitoring in most ovens microenterprises in this sector due to financial issues and lack of skilled labor. These are points that this research intends to operate, providing an microcontrolled low cost intelligent system able to indicate the actions necessary to conduct efficiently the process of sintering ceramics. The first phase of development has generated a system with the ability to inform and draw a temperature profile in the oven during some sintering processes through visualization and recording of the greatness values. After some testing, it reached an efficiency of 82.81%. The system received new hardwares and a firmware of computational intelligence techniques that expanded its capacity and made it possible, together with the employees, achieve a yield 93.97%.

Keywords: System. Microcontroller. Intelligence. Arduino. Fuzzy. Agents. Sintering. Ceramics. Oven. Sensors. Temperature.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de Termopares.....	46
Tabela 2 – Leituras dos sistemas de medição.....	72
Tabela 3 – Leituras do SMMT após a correção.....	74
Tabela 4 – Linearização dos valores de aquecimento.....	80
Tabela 5 – Base de regras do agenteFuzzyCombustivel.....	91
Tabela 6 – Base de regras do agenteFuzzyExaustao.....	96
Tabela 7 – Componentes do sistema microcontrolado inteligente.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Valores fornecidos pelos sensores.....	23
Figura 2 – Monitoramento em forno tipo caieira.....	23
Figura 3 - Agente inteligente.....	28
Figura 4 - Funções de pertinência das variáveis linguísticas.....	31
Figura 5 - Operador MIN.....	33
Figura 6 - Operador MÁX.....	33
Figura 7 - Sistema Fuzzy.....	34
Figura 8 – Componentes de um microcontrolador.....	37
Figura 9 – Gráfico sinal analógico.....	38
Figura 10 – Sinal digital referente à posição de um objeto.....	39
Figura 11 – Atuador luminoso.....	39
Figura 12 – Princípio de funcionamento do amplificador operacional.....	40
Figura 13 – Conversor analógico-digital (AD).....	42
Figura 14 – Termômetro com lâminas bimetálicas.....	43
Figura 15 – Termistores.....	44
Figura 16 – Elementos do RTD.....	45
Figura 17 – RTD industrial.....	45
Figura 18 – Princípio de funcionamento do termopar.....	46
Figura 19 – Resposta dos termopares.....	47
Figura 20 – Junta de topo de um termopar.....	48
Figura 21 – Junta torcida de um termopar.....	48

Figura 22 – Elementos de proteção de um termopar.....	49
Figura 23 – Placas arduino.....	50
Figura 24 – Tijolos de cerâmica vermelha.....	51
Figura 25 – Telhas de cerâmica vermelha.....	51
Figura 26 – Fluxograma do processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha.....	52
Figura 27 – Extração de argilas.....	53
Figura 28 – Misturador.....	53
Figura 29 – Laminador.....	54
Figura 30 – Máquina extrusora (maromba).....	54
Figura 31 – Cortador automático.....	55
Figura 32 – Processo de secagem.....	55
Figura 33 – Processo de sinterização em forno a lenha.....	56
Figura 34 – Telhas 1ª qualidade.....	56
Figura 35 – Telha 2ª qualidade.....	57
Figura 36 – Estrutura interna do forno.....	57
Figura 37 – Curva de queima.....	58
Figura 38 – Diagrama de blocos do SMMT.....	62
Figura 39 – Termopar utilizado no SMMT.....	62
Figura 40 – Max31855K.....	64
Figura 41 – <i>Interface</i> para a leitura do termopar.....	64
Figura 42 – Comunicação serial.....	65
Figura 43 – Arduino Mega2560.....	66
Figura 44 – Módulo SD Card.....	67

Figura 45 – LCD	67
Figura 46 – Módulo de tempo real	68
Figura 47 – Método de calibração direta	69
Figura 48 – Método de calibração indireta	69
Figura 49 – Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura (SMMT)	70
Figura 50 – Sistema de referência padrão	71
Figura 51 – Estufa	72
Figura 52 – SMMT instalado no forno	75
Figura 53 – LEDs de alto brilho	77
Figura 54 – Esquema de ligação de um LED	78
Figura 55 – Sirene elétrica	78
Figura 56 – Curva de sinterização ou queima dos produtos cerâmicos	79
Figura 57 – Modelo interno do sistema	81
Figura 58 – Início do sistema	83
Figura 59 – Atuação do agenteTemperaturaInicial	85
Figura 60 – Condicional para a atuação dos agentes	85
Figura 61 – Atuação do agenteAquecimento	88
Figura 62 – Câmara de combustão	90
Figura 63 – Funções de pertinência da diferença de temperatura entre a referenciaPadrao e leituraSensorSuperior	90
Figura 64 – Funções de pertinência da quantidade de combustível	91
Figura 65 – Câmara de combustão	92
Figura 66 – Controlador fuzzy do agenteFuzzyCombustivel	93

Figura 67 – Simulação do agenteFuzzyCombustivel.....	94
Figura 68 – Funções de pertinência da diferença de temperatura entre os sensores.....	95
Figura 69 – Funções de pertinência da abertura da válvula do canal de exaustão.....	96
Figura 70 – Indicação do sistema microcontrolado inteligente de baixo custo.....	97
Figura 71 – Válvula do canal de exaustão.....	97
Figura 72 – Controlador fuzzy do agenteFuzzyExaustao.....	98
Figura 73 – Atuação do agenteFuzzyExaustao.....	99
Figura 74 – Atuação do agenteConstante.....	101
Figura 75 – Atuação do agenteTesteLcd.....	102
Figura 76 – Forno elétrico para simulação dos sistemas.....	103
Figura 77 – Janela do forno.....	105
Figura 78 – Emissão de fumaça através da janela do forno.....	105
Figura 79 – Porcentagem de telhas de 1ª qualidade.....	106
Figura 80 – Telhas deformadas.....	107
Figura 81 – Extremidade do forno com o sistema.....	108
Figura 82 – Extremidade do forno sem o sistema.....	108
Figura 83 – Análise comparativa das metodologias.....	109
Figura 84 – Início do forno com o sistema microcontrolado inteligente e funcionários atingindo 100% de telhas de 1ª qualidade.....	110
Figura 85 – Final do forno com o sistema microcontrolado inteligente e funcionários atingindo 87,94% de telhas de 1ª qualidade.....	110
Figura 86 – Análise comparativa entre os processos.....	111

LISTA DE SIGLAS

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica;

CI – Circuito integrado;

CPU – *Central Processing Unit*;

EEPROM – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*;

eFLL – *Embedded Fuzzy Logic Library*;

FEM – Força Eletromotriz;

IA – Inteligência Artificial;

ICSP – *In-circuit serial programming*;

ISP – Interface Serial Periférica;

LCD – *Liquid crystal display*;

LED – *Light Emitter Diode*;

PWM – *Pulse Width Modulation*;

RLS – Regressão Linear Simples;

RRG – *Robotic Research Group*,

SCCS – *Sustainable Carbon Climate Solutions*;

SE – Sistema Embarcado;

SI – Sistema Inteligente;

SM – Sistema de Medição;

SMP – Sistema de Medição Padrão;

SMMT – Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura

SRAM – *Static Random Access Memory*;

UESPI-Teresina – Universidade Estadual do Piauí.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 PROBLEMÁTICA	19
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVO GERAL	20
1.3.1 Objetivos específicos	21
1.4 METODOLOGIA	21
1.5 TRABALHOS RELACIONADOS	22
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	27
2.2 AGENTES	27
2.2.1 Estrutura dos agentes	28
2.3 LÓGICA FUZZY OU NEBULOSA	30
2.3.1 Relação de Pertinência	31
2.3.2 Variáveis linguísticas e conjuntos fuzzy	31
2.3.3 Regras Fuzzy	32
2.3.4 Métodos de inferência fuzzy	32
2.4 HARDWARE	35
2.4.1 Microcontroladores	36
2.4.2 Sensores	37
2.4.2.1 Sensores analógicos	37
2.4.2.2 Sensores digitais	38
2.4.3 Atuadores	39
2.5 CONDICIONAMENTO DE SINAIS	40
2.5.1 Amplificador operacional	40
2.5.2 Conversor analógico-digital (AD)	41
2.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	42
2.6.1 Sensor bimetálico	43
2.6.2 Termistor	43
2.6.3 Sensor de resistência RTD (<i>Resistance Temperature Detectors</i>)	44
2.6.3 Termopar	45

2.6.3.1	Compensação da junção fria.....	47
2.6.3.2	Tipos de junções.....	47
2.6.3.3	Elementos de proteção de um termopar industrial.....	48
2.7	PLATAFORMA ARDUINO.....	49
2.8	CERÂMICA.....	51
2.8.1	Indústria de cerâmica vermelha.....	52
2.8.1.1	Processos de fabricação.....	52
2.8.2	Forno.....	57
2.8.3	Processo de sinterização ou queima dos produtos cerâmicos.....	58
2.8.3.1	Etapa de aquecimento ou esquentar.....	59
2.8.3.2	Sinterização ou queima.....	59
2.8.3.3	Resfriamento do forno.....	59
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	60
3.	SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA (SMMT).....	61
3.1	ARQUITETURA DO SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA (SMMT).....	61
3.1.1	Sensores.....	62
3.1.2	Circuito integrado (CI) Max31855K.....	63
3.1.3	Placa arduino.....	66
3.1.4	Módulo cartão SD.....	66
3.1.5	Liquid crystal display (LCD).....	67
3.1.6	Módulo de tempo real DS1307.....	67
3.2	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS.....	68
3.2.1	Calibração direta.....	69
3.2.2	Calibração indireta.....	69
3.2.3	Seleção do tipo de calibração do sistema.....	69
3.2.4	Sistema de Medição Padrão (SMP).....	70
3.2.5	Procedimento de calibração.....	71
3.2.6	Resultados do procedimento de calibração.....	72
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	75
4	SISTEMA INTELIGENTE PARA A CONDUÇÃO DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO EM FORNOS DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA.....	76

4.1 SINALIZADORES VISUAIS (LEDs).....	77
4.2 SINALIZADOR SONORO (SIRENE).....	78
4.3 LINEARIZAÇÃO DA CURVA DE SINTERIZAÇÃO OU QUEIMA PARA COMPOR O MODELO INTERNO DO SISTEMA INTELIGENTE.....	79
4.4 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO INTELIGENTE PARA O SISTEMA (FIRMWARE).....	82
4.4.1 Agente temperatura inicial	84
4.4.2 Agente aquecimento	85
4.4.3 Agente Fuzzy Combustível	88
4.4.4 Agente Fuzzy Exaustão	94
4.4.5 Agente constante	99
4.4.6 Inspeção do sistema	101
4.4.7 Forno para simulação	103
5. RESULTADOS OBTIDOS	105
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICE A – COMPONENTES DO SISTEMA MICROCONTROLADO INTELIGENTE	125

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de informação deve ter a capacidade de obter informações no momento e formato correto. Esses sistemas são projetados para fornecer informações relevantes, que podem ser definidas por meio de conceitos inter-relacionados como: dados, informações e conhecimento. (RAINER; CEGIELSKI, 2012, p. 8).

O principal objetivo dos sistemas de informação é transformar dados em informação e conhecimento. Os dados estão associados à eventos, atividades e transações gravadas, mas que não transmitem um significado específico, entre eles estão: números, letras, figuras, sons e imagens. As informações referem-se aos dados que têm um significado para o usuário. Já o conhecimento é constituído de informações que tenham sido processadas para gerar aprendizado. (RAINER; CEGIELSKI, 2012, p. 8)

Os sistemas inteligentes são sistemas de informação que tem a capacidade de tomar decisões de forma autônoma. A Inteligência Artificial (IA) é considerada um subcampo da computação que tem a função de estudar os processos do pensamento humano e reproduzi-los através de máquinas e equipamentos. (RAINER; CEGIELSKI, 2012, p. 323).

Os sistemas de IA podem entender informações ambíguas ou contraditórias e até raciocinar para resolver problemas e tomar decisões de maneira eficaz para diminuir o consumo de matérias primas e energia elétrica. Eles podem aumentar a produtividade industrial através do monitoramento de equipamentos e sensores e agir no ambiente no qual ele está inserido através de atuadores. (BALTZAN; PHILLIPS, 2012, p. 39).

Dessa forma, esse trabalho de pesquisa desenvolveu um sistema microcontrolado inteligente de baixo custo para o monitoramento de altas temperaturas nos fornos das indústrias de cerâmica vermelha.

A indústria de cerâmica vermelha contribui de forma significativa com o avanço socioeconômico do país. De acordo os dados oficiais da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2015) existem aproximadamente 6.903 cerâmicas e olarias no Brasil, sendo responsáveis por 293 mil empregos diretos, 900 mil indiretos e gerando um faturamento anual de 18 bilhões de reais abrangendo cerca de 4,8% do faturamento da indústria da construção civil.

Mesmo com tantas contribuições, a maioria das microempresas do setor industrial de cerâmica vermelha enfrenta sérios problemas. Entre eles está a ausência do monitoramento da temperatura em seus fornos, nos quais é realizada a sinterização.

A cerâmica é produzida através da sinterização. Nesse processo as partículas formadoras da argila são misturadas, compactadas e aquecidas a uma temperatura próxima ao seu ponto de fusão. O material resultante é resfriado obtendo uma forte aderência entre si. (REZENDE, 2004, p. 18).

É na sinterização que está a maior importância, porque é onde o produto cerâmico recebe suas qualidades comerciais como: cor avermelhada uniforme, resistência mecânica e impermeabilidade. Em grande parte das microempresas, essa fase é realizada em fornos tipo abóboda, de baixa eficiência energética, constituídos de tijolos e argila onde o combustível utilizado é lenha. Na maioria desses fornos, não existe um sistema para monitorar e informar a temperatura interna, proporcionando grandes perdas com produtos de baixa qualidade e/ou alto consumo de combustível.

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é melhorar a qualidade dos produtos cerâmicos desenvolvendo um sistema inteligente capaz de monitorar e conduzir o processo de produção nos fornos das indústrias cerâmicas. O sistema se comunica com os funcionários, responsáveis pela sinterização ou queima, e informa quais ações devem ser realizadas.

Para verificar a eficiência da utilização do sistema no processo de fabricação foi analisado um produto de cerâmica vermelha, no caso, a telha colonial. Os parâmetros estudados foram: quantidade de telhas sinterizadas durante um processo, a fração de telhas de primeira, segunda e terceira qualidade.

1.1 PROBLEMÁTICA

De acordo com a J. Mendo Consultoria (2009, p. 4), o setor de cerâmica vermelha é uma atividade econômica localmente vinculada à indústria de transformação. Este segmento é constituído por um grande número de micro e pequenas empresas distribuídas em todos os estados brasileiros, atuando muitas vezes de maneira informal. O baixo valor agregado de seus produtos dificulta investimentos em equipamentos, tecnologia e qualificação de mão de obra, que são fundamentais para a obtenção de um produto de boa qualidade.

O baixo nível tecnológico de uma indústria em geral, de forma direta ou indireta, proporciona a origem das demais dificuldades. Para elevar o valor agregado dos produtos cerâmicos e se manter no mercado, as indústrias devem investir na modernização de seus processos e qualificar da sua mão de obra.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com os dados oficiais da ANICER(2013), a indústria de cerâmica vermelha contribui com a melhoria da qualidade de vida da população, de forma social e econômica, tanto em nível local como nacional, reduzindo os custos da construção civil e aumentando a arrecadação de impostos para municípios, estados e governo federal, o que pode proporcionar maiores investimentos em diversas áreas como saúde, educação, infraestrutura e outros.

Mas, os consumidores estão se tornando cada vez mais exigentes com a qualidade dos produtos. Para satisfazer essas exigências, os fornecedores de materiais para construção devem melhorar seus processos de fabricação para atender normas e especificações, buscando a satisfação do mercado consumidor.

Outro fator que tem aumentado à competição no mercado da construção civil nos últimos anos foi o uso de materiais alternativos. Bastos (2003, p. 4), afirma que a utilização de produtos como blocos para laje de isopor, paredes de gesso acartonado, telhas de concreto ou polipropileno tem absorvido um mercado que antes era de total fornecimento da indústria cerâmica.

Para sobreviver, o setor industrial cerâmico deve: *i)* se tornar mais competitivo, *ii)* melhorar a qualidade de seus produtos, *iii)* aumentar a sua eficiência utilizando uma menor quantidade de recursos naturais para atender a sua demanda produtiva e respeitar à integridade física de seus funcionários e *iv)* reduzir a insalubridade de seus processos. O sistema desenvolvido contribui com todos os itens citados.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é tornar o processo de sinterização das indústrias de cerâmica vermelha mais eficiente, por meio da utilização de um sistema microcontrolado inteligente de baixo custo, destinado ao monitoramento das altas temperaturas envolvidas na produção em seus fornos para o melhoramento da qualidade dos produtos cerâmicos.

1.3.1 Objetivos específicos

Têm-se como objetivos específicos:

- Elaborar um perfil térmico do processo de sinterização para a obtenção de uma maior quantidade de produtos de primeira quantidade;
- Aprender a conduzir o processo de sinterização de forma eficiente;
- Conhecer e utilizar novos componentes de *hardware*;
- Desenvolver um algoritmo inteligente.

1.4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, realizou-se um levantamento do referencial teórico com o objetivo de reunir fontes acessíveis sobre o tema, como: livros, teses, dissertações, revistas temáticas, artigos e sites. Após obter a literatura necessária, a próxima etapa foi visitar as empresas do setor de cerâmica vermelha, para a seleção de uma delas. Durante o processo de seleção, os proprietários e administradores das empresas foram entrevistados com o objetivo de descobrir se havia motivação para buscar a utilização de novos recursos para o aprimoramento do seu processo produtivo. Depois, eles foram esclarecidos sobre os riscos envolvidos durante os testes do sistema. Alguns empresários demonstraram receio em participar, mas com a exposição das possíveis vantagens do aumento produtivo e lucratividade, uma microempresa se mostrou disposta a aceitar.

A próxima etapa foi conhecer o funcionamento do forno e suas características como: quantidade de telhas, combustível necessário, tempo de sinterização, estado de sua estrutura e a identificação de possíveis fugas de calor.

Conhecendo o processo de sinterização, iniciou-se a pesquisa e seleção do *hardware*, para o início do desenvolvimento do protótipo.

Depois desta fase, o sistema foi instalado no forno para coleta de dados do processo, esse procedimento foi repetido até se obter a curva de temperatura ideal para o forno analisado.

Encontrada a faixa de temperatura ideal, foi realizada uma pesquisa sobre as possíveis técnicas de inteligência artificial para tornar o sistema inteligente, ou seja, torná-lo capaz de coletar os dados dos sensores, raciocinar e indicar as ações a serem realizadas pelos funcionários.

Elaborado e implementado o algoritmo, o sistema foi testado e avaliado através dos resultados obtidos. Os testes foram feitos de forma supervisionada para a verificação de sua eficiência.

1.5 TRABALHOS RELACIONADOS

No decorrer da pesquisa foi realizado um levantamento sobre trabalhos relacionados com o estudo proposto. Até o momento, foram encontrados os citados a seguir:

Trindade Filho et al. (2010), implantou um sistema para o monitoramento da temperatura em fornos tipo caieira, utilizando como parâmetro de sinterização a temperatura padrão de queima da argila na qual a fábrica já adotava para a confecção de seus produtos. Para implantar o sistema, eles fizeram medições da temperatura ao longo do forno com o objetivo de posicionar os sensores de temperatura de forma mais adequada.

O sistema usa seis sensores com 1,5m de comprimento, instalados nas partes superior e inferior do forno. Para converter os sinais analógicos emitidos pelos sensores em digitais foram usados três indicadores duplos, com o seguinte posicionamento: o primeiro na margem esquerda, o segundo no centro e o terceiro na margem direita do forno. (TRINDADE FILHO et al., 2010).

Foram realizados ensaios de queima em corpos de prova retangulares medindo 6,0x2,0x0,5cm prensados a 200Kg/cm² para a determinação da taxa de aquecimento e temperatura do patamar de queima. (TRINDADE FILHO et al., 2010).

Durante o monitoramento do processo de sinterização as temperaturas foram registradas a cada hora de forma manual. O resultado desse trabalho pode ser visto na Figura 1. (TRINDADE FILHO et al., 2010).

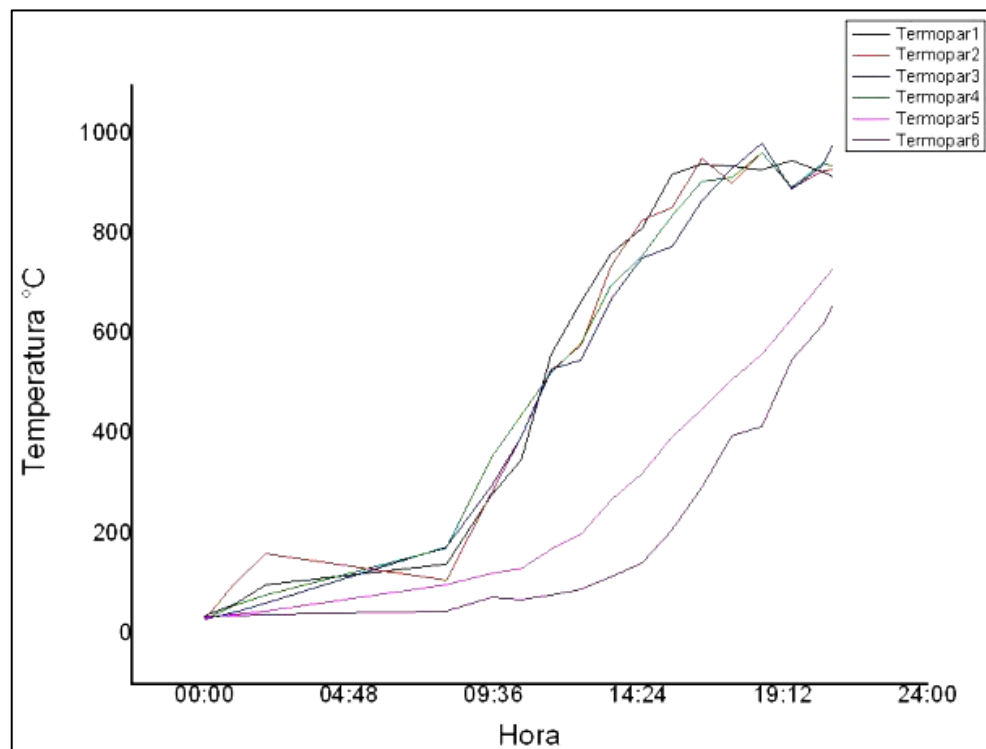
Figura 1 – Valores fornecidos pelos sensores.

HORA	T1	T2	T3	T4	T5	T6
00:00	38	31	32	32	34	36
01:00	60	101	45	58	40	37
02:00	100	162	62	79	48	40
08:00	140	110	176	173	100	48
09:30	278	284	298	354	122	74
10:30	350	395	396	438	132	71
11:30	560	529	530	523	170	78
12:30	666	578	548	584	200	90
13:30	763	736	670	698	270	115
14:30	812	829	753	758	322	143
15:30	921	855	777	837	396	209
16:30	942	953	868	907	451	295
17:30	937	901	931	914	511	398
18:30	929	964	982	963	560	417
19:30	948	893	890	895	632	549
20:30	925	927	938	944	708	620
20:52	916	929	981	937	732	658

Fonte: Trindade Filho et al. (2010).

Os valores da Figura 1 podem ser visualizados no gráfico da Figura 2.

Figura 2 – Monitoramento em forno tipo caieira.



Fonte: Trindade Filho et al. (2010).

O sistema apresentado por Trindade Filho et al. (2010), pode medir e dispor os valores das temperaturas em diferentes pontos do forno tipo caieira durante o processo de

sinterização, mas os autores não informam o que é feito com os dados e como eles são tratados para fornecer os resultados. Diferente do projeto de pesquisa deste trabalho, que recebe as leituras dos sensores, processa os dados e transforma-os em informações para a tomada de decisão. Depois de raciocinar e chegar a uma solução, o sistema informa os funcionários responsáveis pelo processo de sinterização a melhor ação a ser realizada. O sistema microcontrolado inteligente consegue reproduzir o comportamento de um ser humano especialista no processo de sinterização em fornos das indústrias cerâmicas.

Outro sistema com a função de monitorar a temperatura é anunciado pelo Sustainable Carbon Climate Solutions (SCCS, 2014), com o título de Sistema de Monitoramento Eletrônico da Curva de Queima.

O SCCS (2014) confirma a necessidade exposta por Trindade Filho et al. (2010), de monitorar a temperatura em fornos de cerâmica vermelha e apresenta um sistema constituído de sensores, que proporciona um acompanhamento digital através de gráficos.

Os sensores são instalados em cada forno e os dados são enviados a um computador, que possui um *software* capaz de convertê-los em gráficos, facilitando o acompanhamento da queima dentro de cada forno, individualmente ou em conjunto. (SCCS, 2014).

O gráfico fornecido é visualizado no monitor do computador que mostra o momento exato no qual o forno atinge a temperatura ideal. Dessa forma, o ceramista tem a possibilidade de decidir se os funcionários devem adicionar ou interromper o fornecimento de combustível. Esses dados possibilitam a redução do desperdício e diminui significativamente o consumo de lenha, conseqüentemente tem-se a redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa e a possibilidade de gerar créditos de carbono. (SCCS, 2014).

Conforme exposto no SCCS (2014), o sistema oferece inúmeras vantagens, apesar de possuir custo inicial elevado, mas o investimento é compensado através dos benefícios na melhora de desempenho do processo e economia de biomassa.

O sistema apresentado pelo SCCS (2014) mostra os valores da temperatura do processo de sinterização, mas esses dados devem ser acompanhadas por um especialista para tomar as decisões. Já o sistema microcontrolado inteligente, proposto por esse trabalho, além de realizar as leituras dos sensores e dispor os mesmos, ele é capaz de decidir e informar quando deve ser adicionado combustível, a sua quantidade exata e a porcentagem de abertura da válvula do canal de exaustão para a uniformidade térmica no interior do forno. Toda

decisão tomada pelo sistema inteligente é realizada de forma antecipada, identificando uma tendência de queda ou aumento da temperatura, através da utilização de tolerâncias estreitas¹.

Para conseguir mensurar a quantidade de combustível e a abertura do canal de exaustão o sistema usa dois controladores fuzzy, operados por programas denominados agentes. Durante a pesquisa bibliográfica foram encontrados trabalhos que usam controladores fuzzy, mas com aplicações em áreas distintas do setor cerâmico e com a medição de baixas temperaturas. Algumas bibliografias detectadas serão descritas a seguir.

Souza e Barboza (2014) mostram uma opção para o uso da lógica fuzzy em uma placa Arduino aplicada a processos de irrigação. O controlador possui duas variáveis linguísticas de entrada, temperatura e umidade, e uma de saída denominada irrigação. A viável irrigação representa a quantidade de água que deve ser liberada para o solo. A faixa de medição da variável temperatura é de 0 a 50°C.

Kridi et al., (2014) apresenta uma biblioteca denominada eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library), afirmando que ela é capaz de auxiliar no desenvolvimento de sistemas fuzzy para plataformas de sistemas embarcados, com a possibilidade de facilitar a criação de controladores fuzzy para robôs móveis e aplicações diversas. No artigo, os autores desenvolvem um controlador fuzzy para comandar um robô equipado com sensores capazes de perceber o ambiente ao seu redor medindo a distância e três servo-motores, dois para acionar as rodas, e o terceiro para movimentar um sonar.

O sistema microcontrolado inteligente desenvolvido neste trabalho de dissertação utiliza a biblioteca eFLL e aborda a variável temperatura, mas se diferencia dos trabalhos citados porque usa a lógica fuzzy para compor um sistema com a possibilidade de trabalhar com altas temperaturas, aproximadamente entre 0 e 1200°C, e ter a capacidade de reproduzir o raciocínio de seres humanos com vários anos de experiência no processo de sinterização de produtos de cerâmica vermelha em fornos a lenha.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2 é discutida a teoria utilizada no desenvolvimento do *firmware* do sistema microcontrolado inteligente e o *hardware* usado na sua construção, como: inteligência artificial, agentes, lógica fuzzy, microcontroladores, condicionamento de sinais, sensores de medição de temperatura e arduino. Para conhecer a área de aplicação do sistema é feita a

¹ A seção 2.8.2 descreve as partes internas do forno e o seu princípio de funcionamento.

descrição sobre: cerâmica vermelha, sua importância no mercado brasileiro e seus processos de fabricação. No capítulo 3 é apresentado o primeiro módulo do sistema, com a função de medir a temperatura nas partes superior e inferior do forno da microempresa do setor de cerâmica vermelha. O capítulo 4 descreve o *hardware* adicionado ao sistema e as técnicas de inteligência computacional, incorporadas ao equipamento, para torná-lo capaz de compreender o processo de sinterização e tomar as decisões corretas na indicação das ações a serem realizadas pelos funcionários. No capítulo 5 estão os resultados obtidos. No capítulo 6 estão as considerações finais e os trabalhos futuros onde é feita uma avaliação e discussão sobre as principais dificuldades, os objetivos alcançados e as modificações futuras do projeto deste trabalho de pesquisa e nas referências bibliográficas esta a base de pesquisa do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos para o entendimento do trabalho e assuntos motivadores para buscar e construir uma ferramenta capaz de melhorar a qualidade dos produtos cerâmicos e reduzir a insalubridade nas indústrias deste setor. Para o entendimento são discutidos os conceitos de inteligência artificial ou computacional com suas técnicas e metodologias utilizadas no sistema, como: agentes, multiagentes e lógica fuzzy. Para a construção e montagem da arquitetura do sistema abordamos a teoria sobre: microcontroladores, sensores e condicionamento de sinais, analógicos e digitais. Também discutimos os conceitos necessários para realizar a análise de requisitos para o desenvolvimento do *firmware* do sistema, que são: o produto de cerâmica vermelha, a indústria de cerâmica vermelha e seus processos de fabricação.

2.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A nossa espécie é denominada *Homo Sapiens*, que significa homem sábio, porque temos a capacidade de perceber, compreender, prever e agir significativamente no meio no qual estamos inseridos. Durante milhares de anos, procuramos entender como funciona o nosso pensamento e como desenvolvemos nossas habilidades. O campo da inteligência artificial, ou IA, além de tentar descobrir como funciona o pensamento humano, tenta copiar essas capacidades e construir entidades inteligentes com características semelhantes. Ela teve seu início após a Segunda Guerra Mundial, com o seu nome cunhado em 1956. (RUSSELL; NORVIG, 2010, p. 1).

Os autores Russell e Norvig materializaram o conhecimento atual sobre IA em uma estrutura comum possuidora de características semelhantes em todas as áreas. Essa estrutura recebeu o nome de agente, dessa forma, eles definiram a IA como o estudo de agentes que coletam informações do meio no qual estão inseridos e executam uma ação ou uma sequência de ações sobre esse meio para modificá-lo de tal maneira que ele assuma a forma desejada atingindo o seu objetivo.

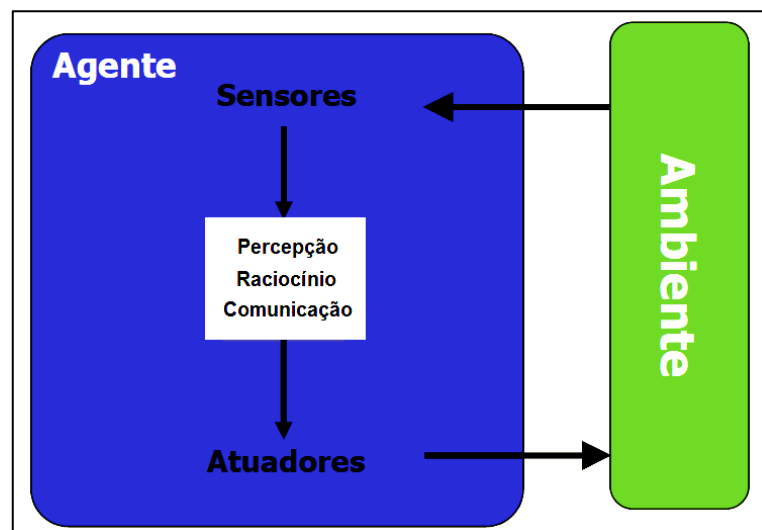
2.2. AGENTES

Um agente é uma entidade lógica ou física capaz de perceber o ambiente e agir sobre ele.

Segundo Russell e Norvig (2010, p. 4), um agente é algo que age (a palavra agente vem do latino agere, que significa fazer). Mas para um agente computacional além de agir espera-se que ele tenha a capacidade de operar de forma autônoma, perceber seu ambiente através de sensores e agir sobre ele por meio de atuadores durante um período prolongado. Um agente computacional é considerado inteligente quando ele age para alcançar o melhor resultado possível.

Um agente, Figura 3, é um sistema computacional formado por um programa que implementa as suas funções e uma arquitetura computacional física dotada de sensores e atuadores para coletar dados necessários e convertê-los em ações. (RUSSELL; NORVIG, 2010, p. 46).

Figura 3 – Agente inteligente.



Fonte: Russell e Norvig (2010, p. 4).

De uma forma geral, os agentes podem armazenar uma grande quantidade de conhecimento e experiências profissionais de seus programadores e construtores para realizar suas tarefas. A estrutura desses agentes será discutida nas seções seguintes.

2.2.1 Estrutura dos agentes

Um agente possui uma estrutura constituída por um programa que implementa a sua função, e uma arquitetura física na qual esse programa é executado, dotada de sensores e atuadores. Para um agente alcançar os seus objetivos, o seu programa deve ser apropriado à sua arquitetura, de forma que ele seja capaz de perceber o ambiente no qual ele está inserido com precisão. Um agente situado em um meio físico precisa de sensores capazes de captar grandezas físicas como: umidade, luz, pressão, temperatura, imagem e som para obter as

percepções necessárias para a tomada de decisão. Já um agente virtual, chamado de agente de *software* ou *softbot*, recebe informações através do teclado, mouse, webcam, conteúdo de arquivos como entradas sensoriais e atua sobre o ambiente exibindo informações na tela, gravando e enviando arquivos através da internet. (RUSSELL; NORVIG, 2010).

Independente da arquitetura do agente, este deve ser capaz de reconhecer todas as informações importantes, processá-las e escolher a melhor ação possível com o objetivo de executar a sua função de agente, maximizando o seu desempenho. Para isso, deve-se escolher o tipo de programa mais adequado para sua aplicação, seja ela simples ou complexa. (RUSSELL; NORVIG, 2010).

De acordo com Russell e Norvig (2010, p. 46) os agentes possuem quatro tipos básicos de programas que formam a base da maioria dos sistemas inteligentes, que são:

- **Agente reativo simples**

É o programa mais simples, ele seleciona suas ações com base na percepção atual, ignorando qualquer histórico de percepções formado pelas leituras dos sensores. Esse tipo de agente possui sensores e atuadores que observam o ambiente. Quando é detectado algo importante por meio dos sensores é verificada a aparência atual do mundo e uma ação é selecionada para ser executada no ambiente utilizando os atuadores.

- **Agente reativo baseado em modelo**

Esse agente controla a parte desconhecida do ambiente mantendo um estado interno formado por um histórico de percepções. Com o estado interno o agente sabe como o mundo evolui e por meio de seus sensores percebe como suas ações o modificam. Combinando essas informações o agente se torna mais eficiente na busca de seu objetivo. Este conhecimento do mundo é chamado de modelo do mundo. Um agente que usa tal modelo é chamado de agente baseado em modelo.

- **Agente baseado em objetivo**

Além do estado interno, esse agente possui conhecimento a respeito de seus objetivos, para decidir qual ação deve ser executada. Dessa forma, ele pode combinar as informações do resultado de suas ações e verificar se elas atingem os seus objetivos, tornando-se capaz de fazer considerações acerca do futuro (predições) e decidir melhor suas ações. Para atingir o seu objetivo o agente poderá realizar apenas uma ação ou longas sequências de ações encadeadas.

- **Agente baseado em utilidade**

Existem vários caminhos para se atingir o mesmo objetivo, podendo um deles ser melhor ou pior. Para resolver essa questão foi desenvolvida a função de utilidade. Esta função mapeia um estado (ou sequência de estados) que descreve o grau de utilidade ou felicidade associado ao estado. Esse programa é utilizado para realizar decisões racionais quando há:

1. Objetivos que estão em conflito (velocidade x segurança): neste caso a função de utilidade define a prioridade entre eles;
2. Quando vários objetivos devem ser alcançados e não há possibilidade de se alcançar a todos em suas totalidades.

2.3 LÓGICA FUZZY OU NEBULOSA

Os seres humanos tem a capacidade de lidar com processos complexos baseados em informações aproximadas. A Teoria de Conjuntos Fuzzy e os Conceitos de Lógica Fuzzy são utilizados para traduzir em termos matemáticos essas informações imprecisas e expressá-las em um conjunto de regras linguísticas. Um exemplo dessa tradução é analisar um processo realizado por um ser humano e verificar se o mesmo pode ser descrito por um conjunto de regras, *se...então*, dessa forma pode-se construir um algoritmo para ser implementado em um sistema computacional. O resultado desse trabalho é um sistema fuzzy baseado em regras, no qual a Teoria de Conjuntos Fuzzy e Lógica Fuzzy fornecem o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas. (CALDEIRA et al., 2007, p. 229)

De acordo com Faria (2012, p. 58),

“A lógica fuzzy também denominada lógica nebulosa ou lógica difusa é uma teoria que incorpora a experiência, a intuição, o conhecimento especialista e a natureza imprecisa do processo decisório humano através de um conjunto de regras ou heurísticas simples.”

“Dentre as vantagens da utilização da lógica fuzzy destacam-se: mecanismo de raciocínio similar ao do ser humano, por meio do uso de termos linguísticos; modelagem de conhecimento de senso comum; conhecimento ambíguo e conhecimento impreciso, mas racional; técnica de aproximação universal; robustez e tolerância à falha; além do baixo custo de desenvolvimento e de manutenção. As limitações estão relacionadas à geração das regras fuzzy e à definição das funções de pertinência; ambas, baseadas em uma avaliação subjetiva do conhecimento do especialista.” Adiciona-se a isso a inexistência de técnicas de aprendizado.”(FARIA, 2012, p. 58)

2.3.1 Relação de Pertinência

De acordo com a teoria clássica dos conjuntos um elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto, esse conceito é classificado como relação de pertinência. Se o elemento pertence ao conjunto, ele possui grau de pertinência 1 ou 100%, senão 0 ou 0%. (ARTERO, 2008, p. 107)

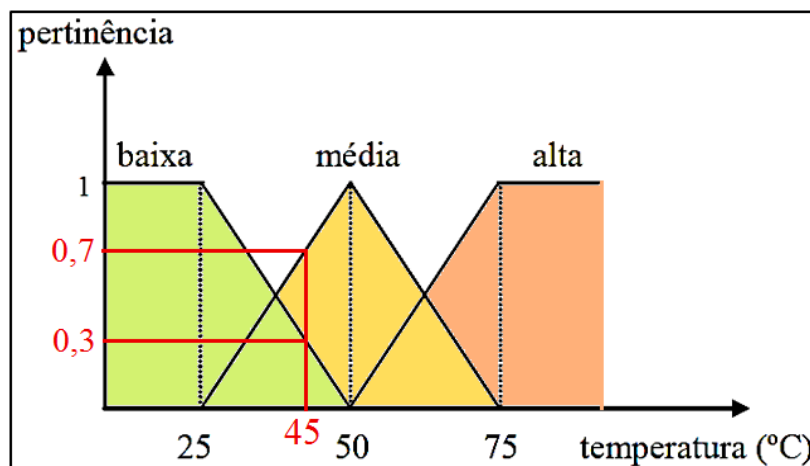
Já na lógica Fuzzy, a relação entre um conjunto universo U e um subconjunto nebuloso A é definida por uma função de pertinência que associa a cada elemento de A um grau de pertinência entre 0 e 1. Dessa forma, podem ser atribuídos infinitos valores ao subconjunto ao invés de pertence ou não. Sendo a função $f(x) = 0.7$, significa que x pertence a A com 70% de confiança. (ARTERO, 2008, p. 108)

2.3.2 Variáveis linguísticas e conjuntos fuzzy

As variáveis linguísticas são termos utilizados para representar de forma imprecisa ou linguística uma grandeza a ser mensurada. Os valores que as constituem são nomes de conjuntos fuzzy, por exemplo, a variável temperatura, que geralmente tem o seu valor fornecido em graus Celsius, pode assumir termos linguísticos (conjuntos fuzzy ou funções de pertinência) **baixa**, **média** e **alta**. (WEBER; KLEIN, 2003, p. 33).

Usando as funções de pertinência, conforme a Figura 4, uma temperatura de 45°C apresenta diferentes graus de pertinência nos três conjuntos fuzzy: $\mu_{baixa}(45^\circ\text{C}) = 0,3$; $\mu_{média}(45^\circ\text{C}) = 0,7$ e $\mu_{alta}(45^\circ\text{C}) = 0$.

Figura 4 – Funções de pertinência das variáveis linguísticas.



Fonte: Caldeira et al (2007, p. 232)

2.3.3 Regras Fuzzy

As regras fuzzy descrevem o processo analisado de uma forma qualitativa. O conhecimento é armazenado na forma de regras compostas por termos antecedentes e consequentes da seguinte forma, **SE** <antecedente> **ENTÃO** <consequente>. (FARIA, 2012, p. 61).

Os termos antecedentes são constituídos de um conjunto de condições envolvendo variáveis e expressões fuzzy. Essas informações quando são satisfeitas, determinam o processamento da parte consequente da regra através de um mecanismo de inferência fuzzy. A parte consequente é formada por um conjunto de ações que são geradas com o disparo da regra. Para se tornar eficiente o sistema fuzzy deve possuir regras que mapeiam todas as entradas em saídas. (FARIA, 2012, p. 61).

2.3.4 Métodos de inferência fuzzy

- Modelo de Mamdani

Segundo Weber e Klein (2003, p. 41) o método de inferência de Mamdani é baseado em operadores MAX-MIN.

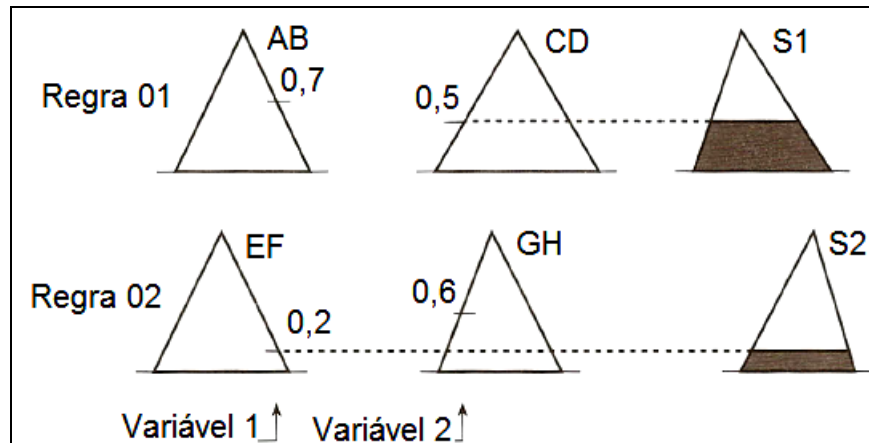
Para um melhor entendimento será descrito o funcionamento de um controlador fuzzy baseado no modelo de Mamdani. Considerando um controlador fuzzy com duas entradas e uma saída, contendo duas regras:

Regra 01: **Se** AB = (0,7) **E** CD = (0,5) **Então** variável_saída = S1(0,5)

Regra 02: **Se** EF = (0,2) **E** GH = (0,6) **Então** variável_saída = S2(0,2)

As entradas fuzzy AB e CD são combinadas usando o operador MIN, que corresponde ao conectivo **E**, de acordo com as regras da intersecção. As duas entradas discretas do sistema são plotadas no eixo horizontal. Usando o **E** obtemos o menor valor, projetando uma linha horizontal sobre o conjunto fuzzy consequente S1, que é truncado em $w_{s1} = 0,5$. Esse procedimento é ilustrado na Figura 5. (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 59)

Figura 5 – Operador MIN.

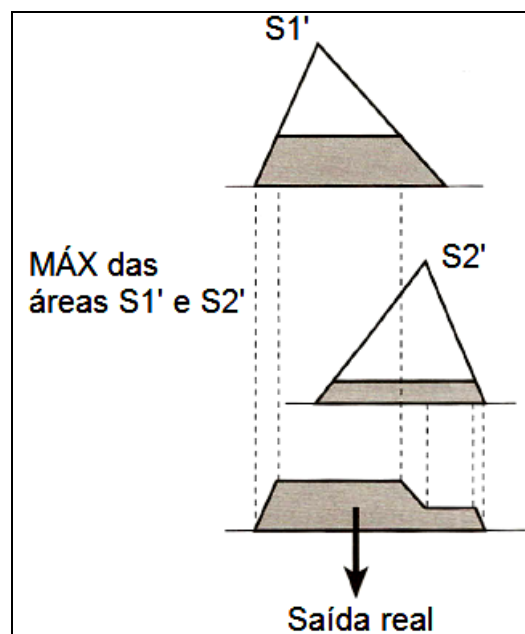


Fonte: Simões e Shaw (2007, p. 60).

O conjunto fuzzy $S1'$ é a versão truncada do conjunto $S1$, que representa a saída da Regra 01. A Regra 02 funciona da mesma forma. Novamente utilizando o menor valor, o conjunto consequente é truncado em $w_{s2} = 0,2$. (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 60)

Na operação seguinte os conjuntos fuzzy correspondentes a $S1'$ e $S2'$ são combinados usando o operador MÁX, este operador cria um contorno comum aos dois conjuntos fuzzy, conforme a Figura 6. A próxima etapa é a conversão do resultado do processo de inferência fuzzy em um único valor numérico ou preciso por meio da defuzzificação por centro de área. (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 60)

Figura 6 – Operador MÁX.



Fonte: Simões e Shaw (2007, p. 61).

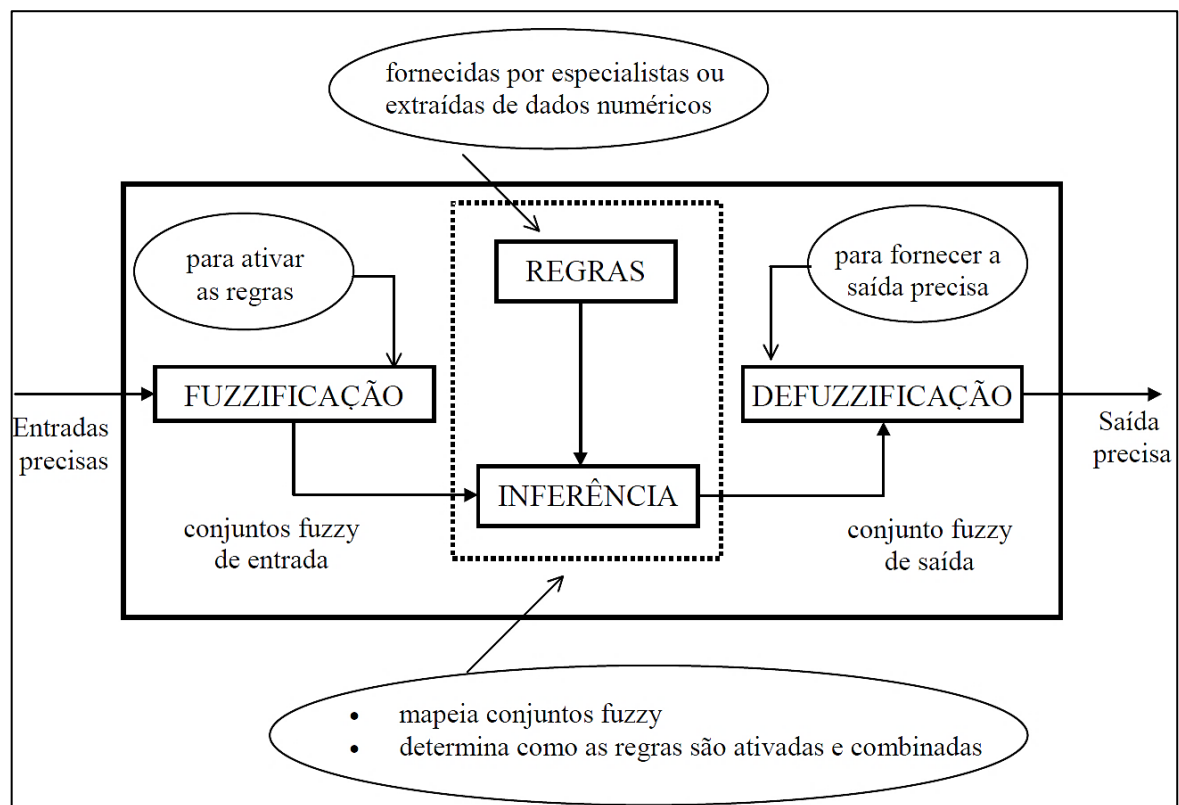
- Modelo de Takagi-Sugeno (TSK)

O controlador TSK é uma simplificação do modelo Mamdani, onde o consequente de cada regra é definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada. Essa metodologia usa a seguinte regra: “Se x é A e y é B , então, $z = f(x,y)$ ” onde A e B são conjuntos fuzzy e f é uma função real de x e y . (ANDRADE; JACQUES, 2008)

No modelo TSK o resultado de cada regra é um valor numérico e não um conjunto fuzzy, que assume o valor da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra. A resposta final do controlador é obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais, dessa forma, o controlador não usa o processo de defuzzificação. (ANDRADE; JACQUES, 2008)

Na Figura 7 é mostrado um sistema fuzzy segundo o modelo de Mamdani, no qual as funções de cada componente estão identificadas.

Figura 7 – Sistema Fuzzy.



Fonte: Caldeira et al. (2007, p. 254).

No sistema fuzzy, os valores das grandezas coletadas pelos sensores são considerados as entradas não-fuzzy ou precisas. Para esses valores serem processados em um sistema fuzzy, é necessário convertê-los em valores fuzzy. Este procedimento de transformar

um valor real e preciso em uma representação fuzzy ou medida imprecisa é chamada de fuzzificação. (ARTERO, 2008, p. 108)

Depois da etapa de fuzzificação o sistema fuzzy (ou controlador fuzzy), mapeia a entrada e fornece uma saída. Uma vez obtido o conjunto fuzzy de saída, é realizada a defuzzificação. (CALDEIRA et al., 2007, p. 254)

No processo de defuzzificação o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras fuzzy é convertida em um valor discreto. Com isso é obtido um único valor preciso que melhor represente os valores fuzzy inferidos nas variáveis linguísticas de saída. Na defuzzificação a conversão ocorre de forma inversa a fuzzificação, transformando uma saída do domínio fuzzy em um valor discreto. (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 52)

Segundo Caldeira et al (2007, p. 38) a técnica mais empregada na defuzzificação dos dados é o centro de área. Também denominado de centro de gravidade, ele é encontrado através da área total do conjunto. O ponto encontrado divide a área em duas partes iguais. Entre as outras metodologias estão:

- A **média dos máximos** usa a média dos máximos de pertinência do conjunto a ser defuzzificado.
- O **menor dos máximos** entre os valores máximos de pertinência é utilizado o de menor valor.
- O **maior dos máximos** usa o maior valor de pertinência dentre os valores máximos de pertinência do conjunto.

As regras utilizadas pelo sistema de inferência fuzzy (ou controlador fuzzy) são fornecidas por especialistas na forma de sentenças linguísticas, por isso os sistemas que usam lógica fuzzy são definidos como sistemas especialistas. O funcionamento do controlador fuzzy, dependerá do bom desempenho das regras que definem a sua estratégia de controle. Durante a inferência ocorre às operações com conjuntos fuzzy combinando os antecedentes das regras, de entrada, e saída, referente ao consequente, que podem ser definidas previamente ou, alternativamente, gerados a partir dos dados. (CALDEIRA et al., 2007, p. 255)

2.4 HARDWARE

O *hardware* é toda a parte física de um sistema computacional, os seus componentes podem ser classificados como entrada e saída de dados, armazenamento e processamento de dados. Os dispositivos de entrada são aqueles que têm a função de fornecer os dados para o armazenamento e processamento. Os dispositivos de saída são usados para

transmitir as informações resultantes do processamento para gerar conhecimento. (SILVA, 2008)

2.4.1 Microcontroladores

Um microcontrolador é um sistema com várias funções em um único chip, entre elas estão: gerador interno de *clock*, memórias SRAM (*Static Random Access Memory*), EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) e flash, conversores analógicos-digitais, conversores digitais-analógicos, temporizadores, contadores, comparadores analógicos, saídas PWM (*Pulse Width Modulation*), interfaces de comunicação e periféricos especializados de acordo com cada fabricante. A vantagem de se ter vários componentes em um único elemento é o desenvolvimento rápido de sistemas com a utilização de uma pequena quantidade de componentes eletrônicos. (LIMA; VILLAÇA, 2012, p. 9)

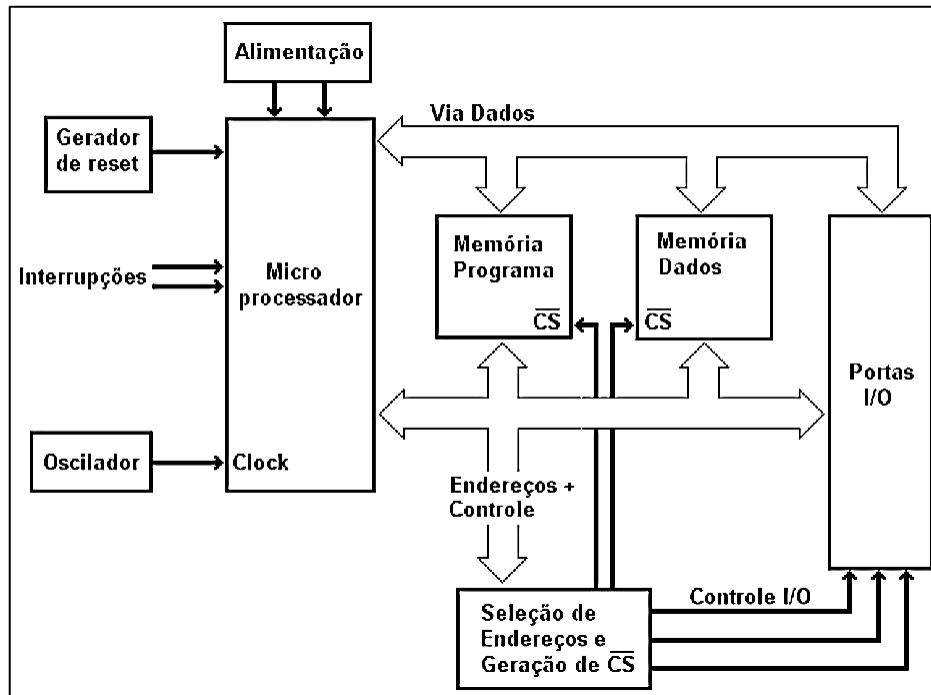
Além do já citado, os microcontroladores possuem uma CPU (*Central Processing Unit*), que tem a função de executar o programa armazenado na memória EEPROM e controlar todos os componentes do *chip*. A memória de dados (SRAM) é utilizada para armazenar de forma dinâmica as configurações e os valores das variáveis que são utilizados na execução do programa. A memória EEPROM é usada para armazenar o programa e os dados permanentes transferidos, geralmente através de uma comunicação com um computador, que não são apagados após o desligamento do sistema que contém o microcontrolador. O programa ou *software* gravado de forma permanente na memória EEPROM são conhecidos como *firmware*. (ALCIATORE; HISTAND, 2014, p. 264)

Os fabricantes de microcontroladores têm tornando os seus produtos cada vez mais rápidos, com maior quantidade de memória e funcionalidades. Algumas características têm motivado o seu desenvolvimento, como: baixo custo, versatilidade, facilidade de programação e o seu tamanho reduzido. Cada vez mais o microcontrolador tem se tornado um atrativo no desenvolvimento de sistemas eletrônicos devido as suas dimensões reduzidas, capacidade de controlar e de processamento de dados. Devido essas vantagens, eles estão sendo utilizados em aplicações industriais, domésticas, de entretenimento, de telecomunicações, automotivas e aeroespaciais. (ALCIATORE; HISTAND, 2014, p. 263)

O seu uso é destinado a dispositivos que exigem algum tipo de controle inteligente baseado em entradas e saídas. Um exemplo desse controle dinâmico é o sistema automotivo, nele existem vários microcontroladores que controlam o não travamento das rodas na frenagem, estabilidade, ignição do automóvel sem chave, controle da temperatura do

ambiente interno, sistema de ar e controle do fluxo de combustível. A Figura 8 mostra os principais componentes presentes em um microcontrolador, independente do seu fabricante. (ALCIATORE; HISTAND, 2014, p. 263)

Figura 8 – Componentes de um microcontrolador.



Fonte: Montebelle (2014).

2.4.2 Sensores

Os sensores são dispositivos capazes de gerar sinais que podem ser usados como entrada para circuitos eletrônicos com o objetivo de medir uma determinada grandeza. Parâmetros físicos como temperatura, pressão, luminosidade, umidade, vazão e distância são exemplos do que se pode medir. A possibilidade de produzir um sinal elétrico que represente de forma precisa uma grandeza é o primeiro passo para tentar controlá-la. Os sensores são divididos em dois grupos os analógicos e os digitais, cada um deles destinado a fornecer um determinado tipo de sinal. (TOOLEY, 2007, p. 288)

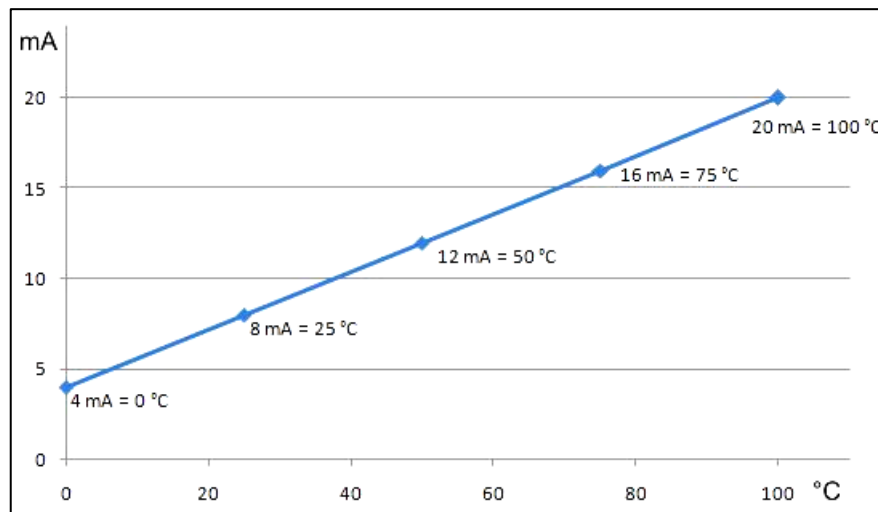
2.4.2.1 Sensores analógicos

Os sensores analógicos podem fornecer qualquer valor de saída de seu sinal ao longo do tempo, desde que ele esteja dentro de um certo intervalo. Algumas grandezas físicas

como: temperatura, pressão, distância, umidade e pressão, podem assumir qualquer valor, ou seja, são grandezas analógicas. (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011, p. 16)

O gráfico da Figura 9 mostra a variação do sinal de saída de um sensor analógico de temperatura em função da variação da grandeza, dessa forma ele pode medir qualquer valor dentro de uma determina faixa de medição.

Figura 9 – Gráfico sinal analógico.



Fonte: PCE (2012).

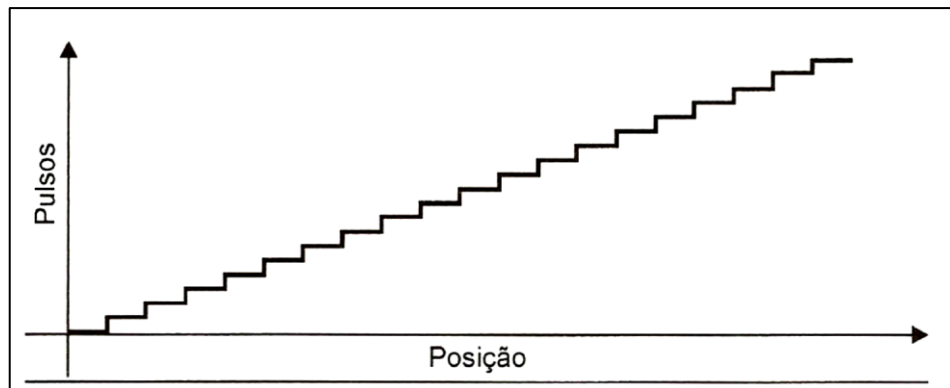
2.4.2.2 Sensores digitais

Um sinal digital pode assumir um de um conjunto finito de valores discretos dentro de uma determinada faixa. Já o sinal analógico pode assumir qualquer valor de um conjunto infinito de valores possíveis, ou seja, é um sinal contínuo. Como exemplo de um sinal analógico é a temperatura, porque ela pode assumir um valor como 33,57846... graus Celsius. Um exemplo de sinal digital é o número de dedos que você conta em uma mão, como: 0, 1, 2, 3, 4 ou 5, ou seja um conjunto finito de valores. (VAHID, 2008, p. 20)

Os sensores digitais fornecem um sinal de natureza digital, por meio de uma sequência de sinais *on/off* que fornece um número referente à amplitude da variável medida. (BOLTON, 2010, p. 77).

A Figura 10 ilustra a variação da posição de um objeto obtida por um sensor digital que produz pulsos elétricos a partir do movimento rotacional de seu eixo.

Figura 10 – Sinal digital referente à posição de um objeto.



Fonte: Thomazini e Albuquerque (2011, p. 16).

2.4.3 Atuadores

Os atuadores são dispositivos de saída que tem a capacidade de modificar uma variável controlada. Estes dispositivos recebem um sinal elétrico de um microcontrolador e atua sobre o ambiente executando alguma tarefa. A maioria de todas as ações físicas é realizada através dos atuadores. (WENDLING, 2010, p. 3).

Exemplos de atuadores:

- ✓ Luminosos (visor de *led*, Figura 11, ou cristal líquido, *led*, monitores, lâmpada);
- ✓ Sonoros (Sirene, *buzzer*);
- ✓ Válvulas (pneumáticas, hidráulicas);
- ✓ Relés;
- ✓ Cilindros (pneumáticos, hidráulicos);
- ✓ Motores;
- ✓ Solenóides.

Figura 11 – Atuador luminoso.



Fonte: Ribeiro Comércio e Representações Ltda (2014).

2.5 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

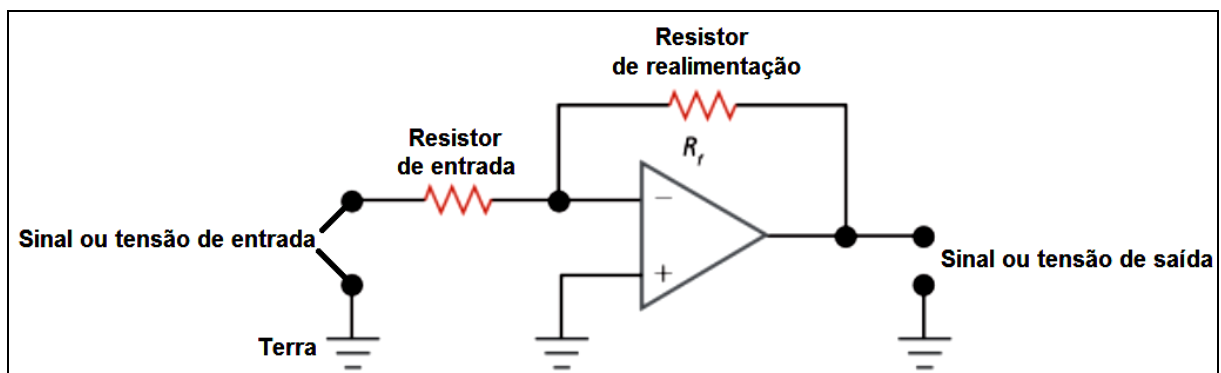
Geralmente, antes de ser usado por um sistema microcontrolado, o sinal fornecido por um sensor deve ser processado e modificado. Ele pode apresentar algumas divergências como baixa amplitude, precisando ser amplificado, conter ruído, que deve ser retirado, não ser linear então linearizado e ainda ser analógico com a necessidade de ser convertido em digital ou vice-versa. Todas essas modificações são classificadas como condicionamento de sinal. Esse procedimento se torna essencial quando componentes eletroeletrônicos são necessários para coletar dados do meio externo. (BOLTON, 2010, p. 77).

2.5.1 Amplificador operacional

Um amplificador é um componente eletrônico que proporciona um ganho de sinal que é a razão entre o sinal de saída e entrada, em relação ao Terra (GND). Esse chip de silício é a base de muitos condicionadores de sinal, amplificando um sinal, que antes não podia ser medido ou interpretado devido sua baixa intensidade, e tornando possível a sua utilização. (BOLTON, 2010, p. 77).

O ganho de sinal pode ser ajustado por meio de resistores externos, os resistores são componentes eletrônicos capazes de limitar a passagem do fluxo de elétrons (corrente elétrica). O amplificador operacional juntamente com os dois resistores utilizados para ajustar o ganho de sinal do amplificador são mostrados na Figura 12. (TOKHEIM, 2013, p. 460)

Figura 12 – Princípio de funcionamento do amplificador operacional.



Fonte: Tokheim (2013, p.460)

Segundo Tokheim (2013, p.460) o ganho de sinal do amplificador operacional ilustrado na Figura 12 pode ser realizado pelas equações (1) e (2):

$$G_s = \frac{R_f}{R_{in}} \quad (1)$$

G_s = Ganho de sinal;

R_f = Resistência do resistor de realimentação;

R_{in} = Resistência do resistor de entrada;

$$G_s = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2)$$

G_s = Ganho de sinal;

V_{out} = Tensão ou sinal de entrada;

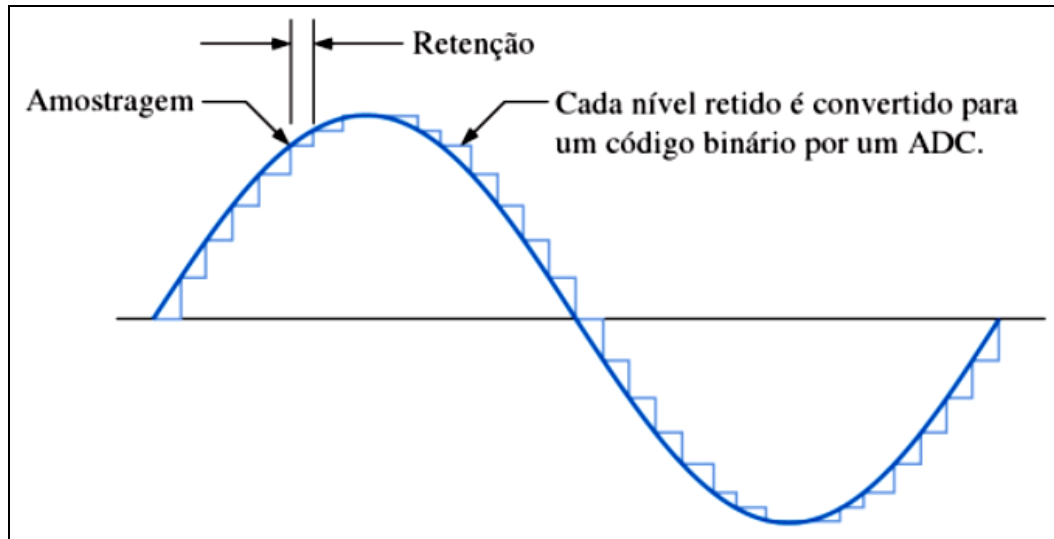
V_{in} = Tensão ou sinal de saída;

2.5.2 Conversor analógico-digital (AD)

A maioria dos sensores fornece um sinal analógico. Quando um microcontrolador é utilizado como parte de um sistema de medição e/ou controle, o sinal analógico deve ser convertido em digital para ser interpretado. Da mesma forma, a maioria dos atuadores funciona com entradas analógicas, portanto, o sinal digital produzido pelo microcontrolador deve ser convertido em analógico para comandar o atuador. (BOLTON, 2010, p. 101).

A conversão do sinal analógico em digital é denominada de processamento de sinais. O processamento do sinal traduz o sinal analógico, que varia continuamente em função do tempo, em um conjunto de valores discretos. Estes valores seguem a variação do sinal analógico segundo um formato de escada, incrementando ou decrementando, conforme ilustrado na Figura 13. Esse processo é realizado por um circuito de amostragem e retenção dos valores. O próximo passo é converter os valores discretos em códigos binários que representam cada degrau da escada pelo processo de conversão analógico-digital. O circuito que realiza essa conversão é nomeado de conversor analógico-digital (AD). (FLOYD, 2007, p. 760).

Figura 13 – Conversor analógico-digital (AD).



Fonte: Floyd (2007, p. 760).

2.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A medição é um conjunto de ações realizadas com o fim de determinar uma grandeza. Para isso, é necessário comparar o que se deseja medir com um padrão de mesma natureza. O padrão simboliza a unidade de medida, ele pode ser um objeto físico ou um valor obtido através de uma experiência realizada em um laboratório.

A grandeza abordada nesta pesquisa é a temperatura. Segundo Bega et al. (2011, p. 207), a temperatura é uma das principais variáveis de processos. Para se alcançar determinados parâmetros físicos e reações químicas é necessário conhecer e controlar o valor dessa variável. As escalas de medição de temperatura são: Kelvin (K), Celsius (C) e Fahrenheit (F).

Para conhecer o valor da temperatura em um determinado processo de fabricação é necessário utilizar um sistema de medição adequado. Bega et al. (2011, p. 209), afirma que a parte crítica da especificação do sistema é a escolha do sensor mais apropriado, levando em consideração alguns critérios como: faixa de medição, precisão, repetibilidade, proteção do sensor e seu tempo de resposta.

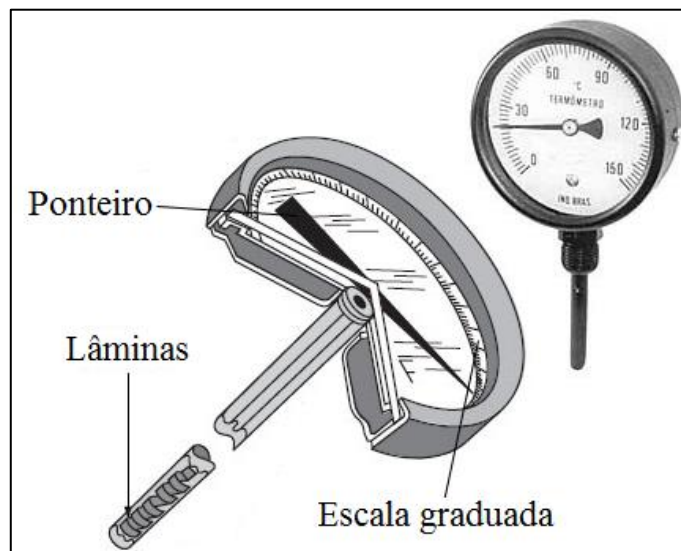
Além do que foi citado anteriormente é preciso conhecer o sinal de saída do sensor, dessa forma será avaliada a necessidade do condicionamento do sinal para converter sua natureza em uma possível de ser interpretada pelo sistema inteligente.

Para escolher o sensor de temperatura mais apropriado, devemos conhecer os tipos utilizados na indústria e disponíveis no mercado consumidor. De acordo com os autores que serão citados a seguir vamos ver a descrição desses sensores.

2.6.1 Sensor bimetálico

São sensores formados por duas lâminas de metais ou ligas metálicas com coeficiente de dilatação ou expansão linear diferente, como na Figura 14. As lâminas são enroladas na forma de espiral e acomodadas em um tubo protetor. O deslocamento relativo proporcionado pelo aquecimento e dilatação das lâminas é transferido a um ponteiro localizado sobre uma escala graduada que juntos informam o valor da temperatura. (BEGA et al., 2011, p. 212).

Figura 14 – Termômetro com lâminas bimetálicas.



Fonte: Instrumentación: Equipos y Principios (2013).

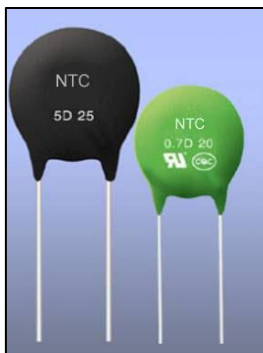
Esse tipo de sensor fornece apenas indicações locais, não sendo possível transmitir os dados coletados por ele. O sensor bimetálico possui baixo custo, é muito utilizado na medição de temperatura em campo e é fabricado abrangendo faixas de temperaturas que vão de -50 a 500°C. (BEGA et al., 2011, p. 213).

2.6.2 Termistor

São sensores fabricados a partir de materiais semicondutores que variam sua resistência elétrica em função da temperatura. Sua utilização está compreendida entre -100°C

e 300°C. A maioria dos termistores é confeccionada com coeficiente térmico negativo (NTC – *Negative Thermal Coefficient*), isto significa que a sua resistência decresce com o aumento da temperatura. Existe também o PTC – *Positive Thermal Coefficient*, com característica oposta. Alguns termistores são vistos na Figura 15. (BEGA et al., 2011, p. 220).

Figura 15 – Termistores.



Fonte: Teketecno (2012).

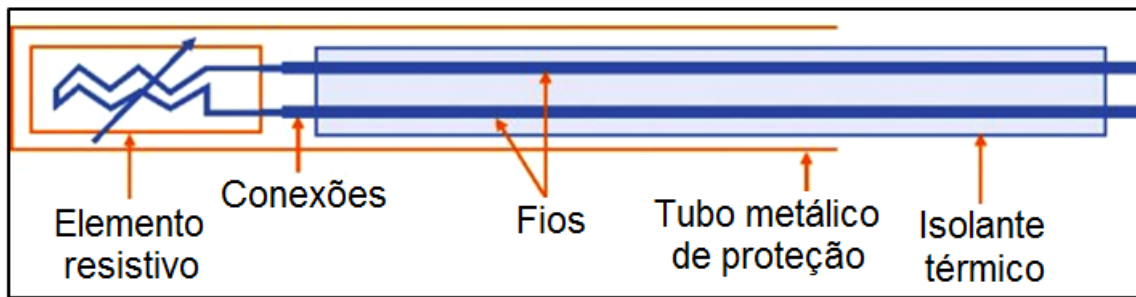
2.6.3 Sensor de resistência RTD – *Resistance Temperature Detectors*

O princípio de funcionamento dos RTDs é o aumento da resistência elétrica com a temperatura. Eles podem proporcionar medições com erros equivalentes a $\pm 0,1^\circ\text{C}$. O material mais utilizado na sua fabricação é a platina devido as seguintes características: linearidade do sinal e estabilidade. Assim, esses sensores são considerados de alta precisão e ótima repetitividade de leitura. (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2012, p. 282)

As faixas de utilização dos RTDs são especificadas de acordo com cada fabricante. Um sensor com filme de platina pode atuar geralmente entre -50°C e 260°C , com fio de platina ele pode medir de -200°C a 648°C . A faixa de temperatura mais comum no meio industrial esta localizada entre -200°C e 500°C . Existe um sensor especial chamado de resistor de platina padrão que pode ser utilizado de -200 a 1000°C , mas ele é frágil e possui custo elevado, sendo destinado apenas para aferir outros RTDs. (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2012, p. 282)

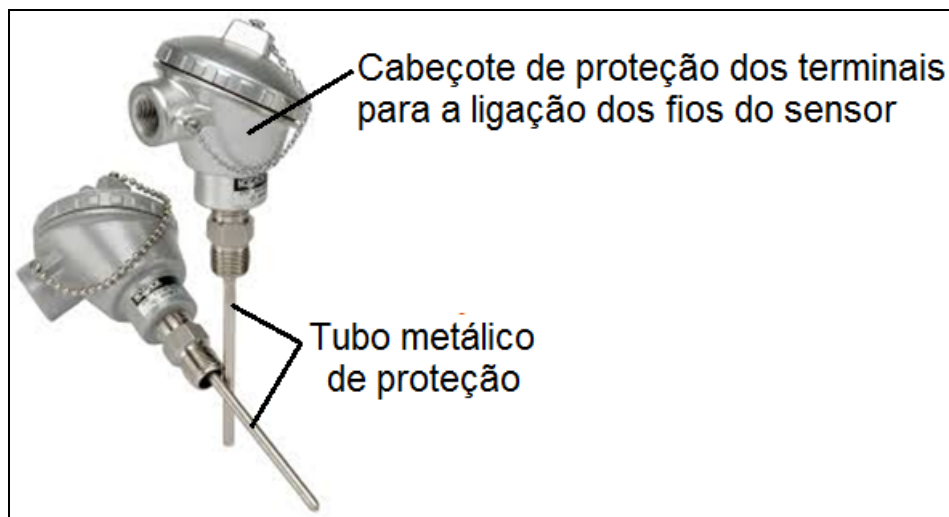
A Figura 16 ilustrados os detalhes construtivos do RTD. O elemento resistivo é conectado a dois fios que são protegidos por isolantes térmicos, tudo o conjunto é encapsulado em um tubo metálico fechado para a proteção mecânica do sensor. A Figura 17 mostra como é o RTD comercial.

Figura 16 – Elementos do RTD.



Fonte: Mecatrônica Atual (2014).

Figura 17 –RTD industrial.



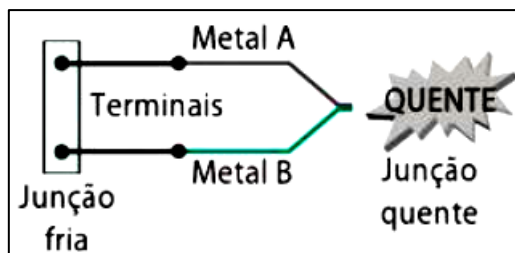
Fonte: Noshok (2014).

2.6.3 Termopar

Os termopares são os sensores mais empregados na medição de temperatura em aplicações industriais. Esta preferência é devido aos seguintes fatores: baixo custo, precisão, repetibilidade de resposta e por abranger uma ampla faixa de temperaturas. (BEGA et al., 2011, p. 222)

O seu princípio de funcionamento é baseado na soldagem de dois fios de materiais diferentes, onde é gerada uma tensão contínua previsível, que esta relacionada à diferença de temperatura entre a junção quente e a junção fria, chamado de efeito Seebeck. De acordo com a Figura 18, a junção quente é a extremidade do termopar que deve ser exposta ao processo que se deseja medir a temperatura. A junção fria é mantida a uma temperatura constante para fornecer a temperatura de referência. (PETRUZELLA, 2013, p. 100)

Figura 18 – Princípio de funcionamento do termopar.



Fonte: Petruzella (2013, p. 100)

Os termopares são classificados por letras, em função de sua composição, faixa de medição e coeficiente de Seebeck. Os valores de tensão de saída são disponibilizados de acordo com cada fabricante. A Tabela 1, mostra as faixas de operação de alguns termopares.

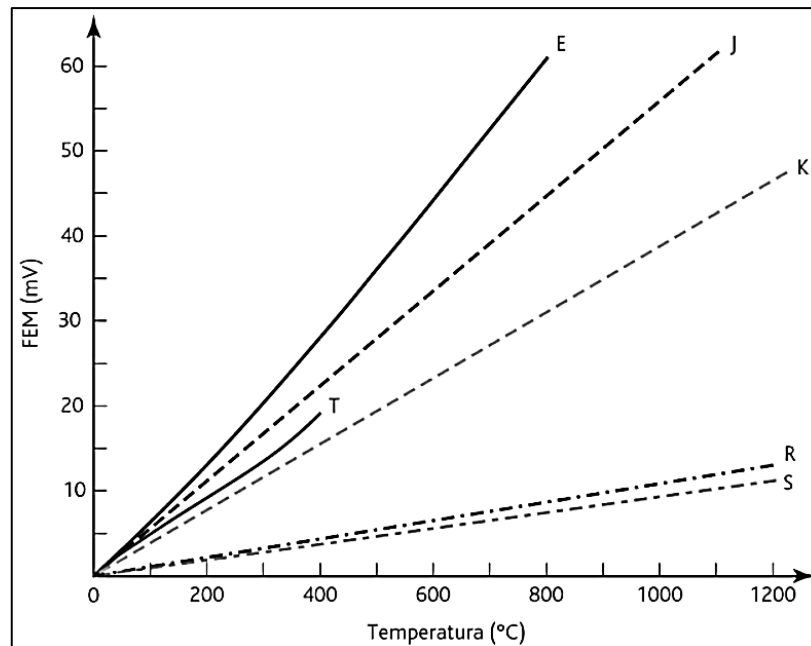
Tabela 1 - Características de Termopares.

Ref.	Materiais	Faixa de temperatura (°C)	Coeficiente de Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
B	Platina 30%, Ródio/platina 6% ródio	0 a 1800	3
E	Cromel/Constantan	-200 a 1000	63
J	Ferro/Constantan	-200 a 900	53
K	Cromel/Alumel	-200 a 1300	41
N	Nirosil-Nisil	-200 a 1300	28
R	Platina/Platina 13% de ródio	0 a 1400	6
S	Platina/Platina 10% de ródio	0 a 1400	6
T	Cobre/Constantan	-200 a 400	43

Fonte: Bolton (2010, p. 67).

A Figura 19 mostra um gráfico da Força Eletromotriz (FEM) versus temperatura para os vários tipos de termopar. Como pode ser visto na ilustração, alguns sensores fornecem um sinal de resposta segundo uma função linear, o que proporciona maior precisão, enquanto outros não, para compensar a não linearidade do sinal de alguns termopares é necessário um circuito eletrônico para a reduzir os erros. Segundo Petruzella (2014), a força externa que provoca o fluxo de elétrons é chamada de Força Eletromotriz (FEM) ou tensão elétrica.

Figura 19 – Resposta dos termopares.



Fonte: Bolton (2010, p. 66).

2.6.3.1 Compensação da junção fria

Para reduzir os erros com a utilização do termopar é necessário manter a junção fria ou de referência a uma temperatura constante. Dessa forma o efeito Seebeck será aplicado corretamente na medição da temperatura. Uma possível solução para a resolução desse problema é inserir a junção fria em um recipiente com água e gelo, mas esta atitude exige uma manutenção frequente, o que pode se tornar inviável ou possuir alto custo. (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2012, p. 296)

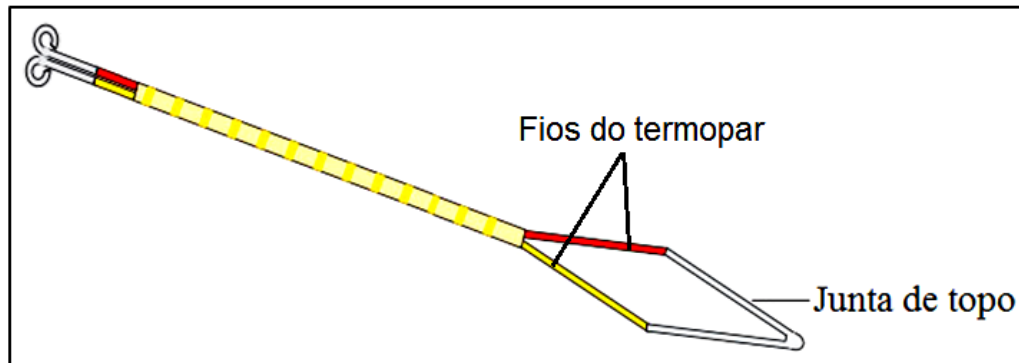
Outra solução é buscar um sistema eletrônico que possa somar ou subtrair a tensão de saída do termopar para compensar a variação da temperatura ambiente ao longo do dia e estabelecer um 0°C virtual flutuante.

2.6.3.2 Tipos de junções

Para a formação da junção quente do termopar, os dois fios que os compõe devem ser unidos. A forma dessa união caracteriza o tipo de junção. Segundo Bega et al. (2011, p. 231) a soldagem dos fios pode ser feita por solda a prata ou a plasma, em função da temperatura de trabalho. Para um melhor entendimento a Figura 20 mostra um termopar com a junção de topo, onde os dois fios que o constituem são soldados em suas extremidades, este

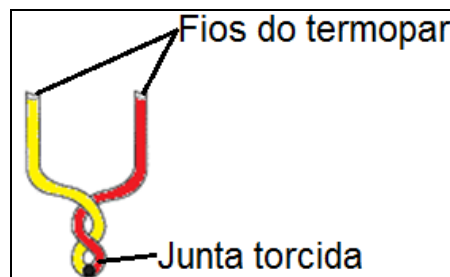
tipo de junção assegura maior precisão na resposta do termopar. Outro tipo de junção é a união por torção, onde os fios são torcidos e depois soldados, conforme a Figura 21, o que proporciona alta resistência mecânica, mas gera mais erros e uma indefinição do ponto de medição.

Figura 20 – Junta de topo de um termopar.



Fonte: ITALTERM (2014).

Figura 21 – Junta torcida de um termopar.



Fonte: IOPE (2015).

2.6.3.3 Elementos de proteção de um termopar industrial

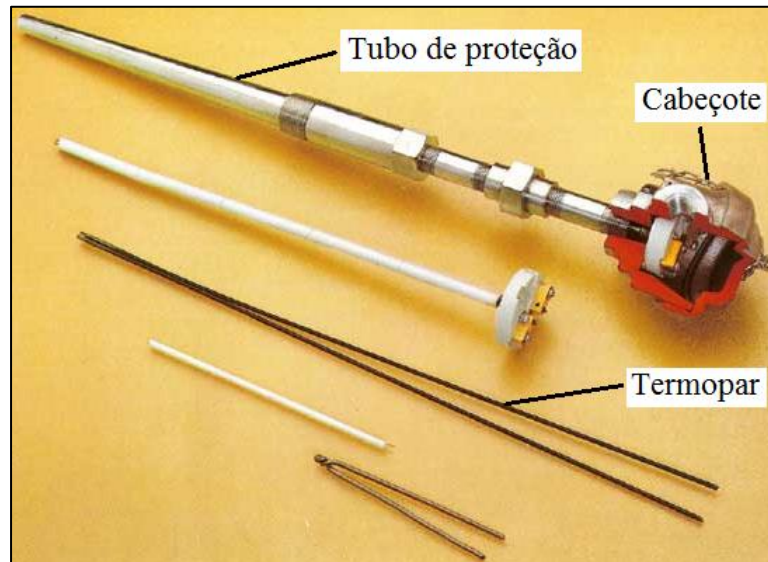
Quando possível, a junta quente do termopar pode ficar exposta, o que reduz o tempo de resposta, mas devido à hostilidade de alguns processos industriais ela deve ser montada em tubo de proteção. Esses tubos podem ser de aço carbono resistentes até 500°C, em atmosferas não corrosivas, e aço cromo que suporta temperaturas em torno de 1100°C. Para temperaturas acima de 1000°C, as proteções de cerâmica são mais utilizadas, sendo apropriadas até 1700°C, mas com os inconvenientes de aumentar o tempo de resposta e apresentar baixa resistência a erosão. (BEGA et al., 2011, p. 232)

Outro elemento protetor é o cabeçote. Esse componente mecânico externo protege os terminais de ligação dos fios que ligam o instrumento ou sistema de medição ao termopar.

Ele é formado por uma base e uma tampa rosca, ambos geralmente fabricados em materiais resistentes ao tempo, atmosferas corrosivas e até a explosão. (BEGA et al., 2011, p. 233)

A Figura 22 mostra os elementos internos e externos de um termopar industrial.

Figura 22 – Elementos de proteção de um termopar.



Fonte: Soluções Industriais (2014).

2.7 PLATAFORMA ARDUINO

Arduino é uma plataforma livre de prototipagem eletrônica baseada em *software* (programa) e *hardware* (arquitetura), além de estar aberto ao uso e contribuição de toda sociedade. Essa plataforma pode perceber o ambiente ao seu redor através de sensores e atuar sobre ele por meio de atuadores. (ARDUINO, 2013, tradução nossa).

O conceito do arduino surgiu na Itália, em 2005, com o objetivo de criar um dispositivo para controlar projetos/protótipos construídos de uma forma menos onerosa do que outros sistemas disponíveis no mercado. (FONSECA; LA VEGA, 2011).

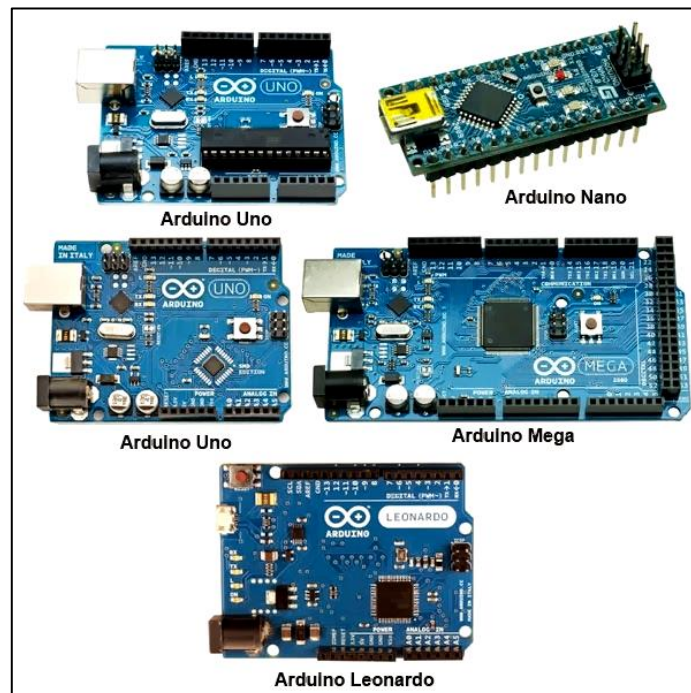
Segundo Souza et al. (2011), o arduino é ideal para o desenvolvimento de dispositivos capazes de interagir com o ambiente, através da utilização de sensores e atuadores. Os sensores podem medir valores de grandezas como: temperatura, luminosidade, chuva, distância, pressão, umidade etc. Já os atuadores podem agir sobre o meio no qual está inserido e modificá-lo. São exemplos de atuadores: *leds*, *displays*, motores, servomotores e outros.

O arduino é disponibilizado na forma de placas para o desenvolvimento de dispositivos diversos, Figura 23, constituindo uma plataforma de computação física, onde

sistemas digitais, ligados a sensores e atuadores, por meio de trilhas de cobre, formam uma placa de circuito impresso, podendo medir grandezas do meio físico, realizar cálculos numéricos e tomar decisões lógicas no ambiente computacional. (FONSECA; LA VEGA, 2011).

A placa do arduino possui na sua parte central um microcontrolador, esse microchip possui um gerador de *clock*, memória SRAM, EEPROM e FLASH; conversores A/D, D/A; temporizadores, contadores, interface de comunicação e outros. Além disso, o arduino pode ser complementado por módulos de expansão denominados *shields*, os quais possuem funções especializadas. A linguagem de programação desse *hardware* é de alto nível sendo similar às linguagens C e C++, preservando muitas características dessas linguagens. (FONSECA; LA VEGA, 2011).

Figura 23 – Placas arduino.



Fonte: Ferramentas PC (2014).

Para desenvolver o *software* que vai comandar o *hardware*, o fabricante disponibiliza um ambiente de desenvolvimento integrado IDE (*Integrated Development Environment*), no qual é possível escrever e editar o programa, compilar e transferir o código para a memória do microcontrolador. Essa IDE pode ser acessada gratuitamente no endereço [<http://arduino.cc/en/Main/Software>]. Outra característica importante da IDE é ser multiplataforma, podendo ser instalado em diversos sistemas operacionais como: *Windows*, *GNU/Linux* e *MacOS*. (FONSECA; LA VEGA, 2011).

2.8 CERÂMICA

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica – ABC (2013), materiais cerâmicos são constituídos, em sua grande maioria, de argilas que possuem grande emprego em engenharia, principalmente na construção civil. Materiais cerâmicos são todos os materiais inorgânicos não metálicos de emprego em engenharia (materiais de construção) ou produtos químicos inorgânicos (excetuados os metais e suas ligas) que são utilizáveis geralmente após tratamento em temperaturas elevadas.

Esses materiais possuem aplicações em diversas áreas em função das suas propriedades físicas e químicas. De acordo com a ABC (2013), os materiais cerâmicos podem ser subdivididos e classificados em diversos produtos como: cerâmica vermelha, revestimento, cerâmica branca, refratários, isolantes térmicos, abrasivos e cerâmica de alta tecnologia ou cerâmica avançada.

A cerâmica vermelha obtém a coloração avermelhada após o processo de sinterização. Entre seus principais produtos, estão: tijolos, blocos cerâmicos, lajotas e telhas que são destinados à indústria da construção civil. As Figuras 24 e 25 mostram alguns desses produtos. ABC (2013)

Figura 24 – Tijolos de cerâmica vermelha.



Fonte: Cerâmica Milenium - Telhas e Tijolos (2014).

Figura 25 – Telhas de cerâmica vermelha.



Fonte: Telhão - Telhados e Coberturas (2014).

De acordo com o J. Mendo Consultoria (2009, p. 4),

“O Brasil possui grandes reservas de argilas para cerâmica vermelha. Analisando os dados de reservas do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, nota-se que houve um aumento significativo nos valores a partir do ano 2000. Em 1996 as reservas medidas de argilas comuns e plásticas eram de aproximadamente 1,4 bilhões t. Já em 2001 os valores de reserva de argilas comuns chegaram a cerca de 2,2 bilhões t, e em 2005 as reservas atingiram 3,6 bilhões t.”

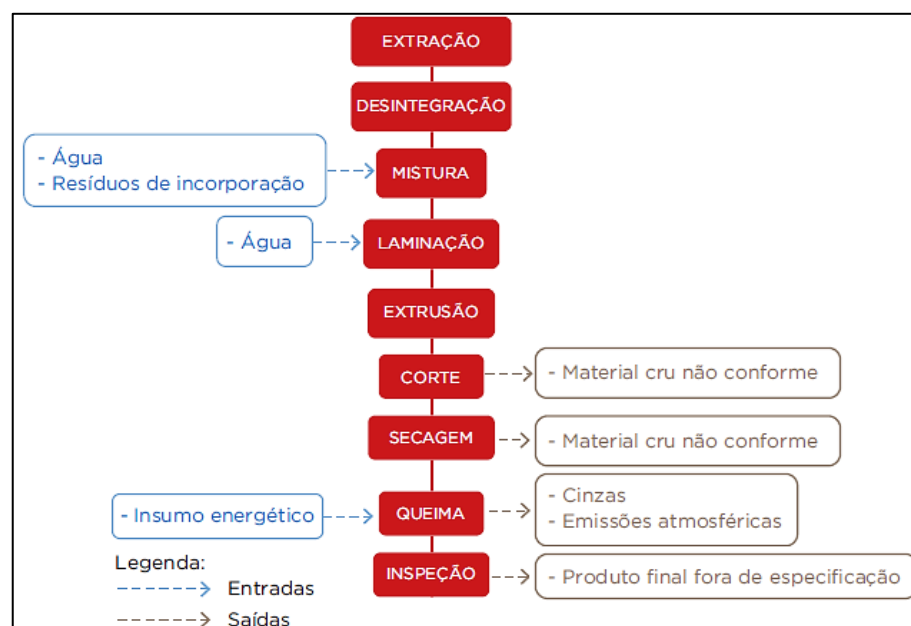
2.8.1 Indústria de cerâmica vermelha

Segundo Reinaldo Filho e Bezerra (2010, p.3), a indústria de cerâmica vermelha é uma indústria de transformação de minerais não-metálicos. Essa está inserida no grupo das principais indústrias tradicionais da região Nordeste, seguida das indústrias de alimentos, bebidas, vestuário e calçados. Sendo caracterizada como uma indústria “nativa” da região, tendo uma estrutura administrativa geralmente familiar, onde a presença das micro e pequenas empresas ainda é importante.

2.8.1.1 Processos de fabricação

Os processos de fabricação dos vários artefatos cerâmicos geralmente são semelhantes, neste trabalho será apresentado um fluxograma, Figura 26, e descritas as principais etapas do processo de fabricação de telhas coloniais.

Figura 26 – Fluxograma do processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha.



Fonte: FIEMG E FEAM (2013, p. 12).

- **Extração** – Esse procedimento é geralmente realizado com a ajuda de máquinas de médio porte como: enchedeira pá carregadeira, escavadeira e caminhões com caçamba basculante. Geralmente são utilizadas argilas de composições diferentes, essas argilas são transportadas das jazidas para os galpões de estocagem, onde são adicionada uma a outra utilizando água em função da umidade e a plasticidade desejada, Figura 27.

Figura 27 - Extração de argilas.



Fonte: Bela Vista Tijolos (2014).

- **Desintegração** - A Primeira redução das dimensões dos pedaços ou torrões de argila é realizada no misturador, Figura 28. As argilas são transportadas do galpão de armazenamento, sobre uma correia transportadora, até um equipamento chamado misturador, este quebra os pedaços de argila em partes menores devido o movimento rotativo de dois eixos com lâminas cortantes.

Figura 28 - Misturador.

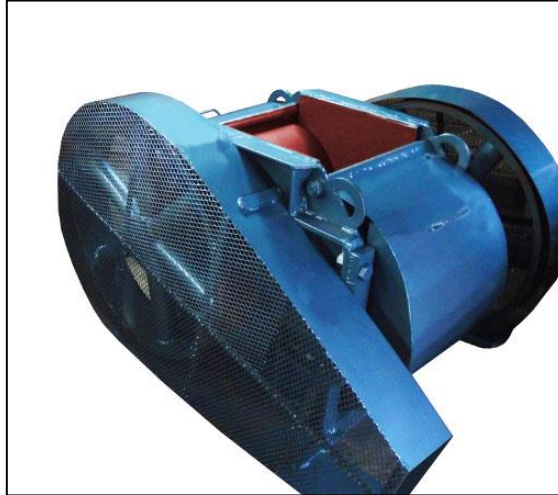


Fonte: NATREB(2014).

- **Laminação** - A segunda redução das dimensões dos pedaços ou torrões de argila ocorrem no laminador, Figura 29. O laminador é uma máquina constituída de dois cilindros metálicos que giram com velocidades periféricas diferentes. Conforme o próprio nome diz, ele tem a função de laminar a argila

deixando-a mais uniforme na forma de uma pasta para facilitar o trabalho das máquinas seguintes.

Figura 29 - Laminador.



Fonte: VARLE - Máquinas Para Cerâmicas e Olarias (2014).

- **Extrusão** - Ao entrar na máquina extrusora (maromba), Figura 30, a massa de argila é submetida a um vácuo, depois ela sofre à ação de um fuso bihelicoidal que desloca a massa de argila, forçando-a a passar através de uma matriz metálica chamada boquilha, onde a massa assume a forma desejada da telha colonial.

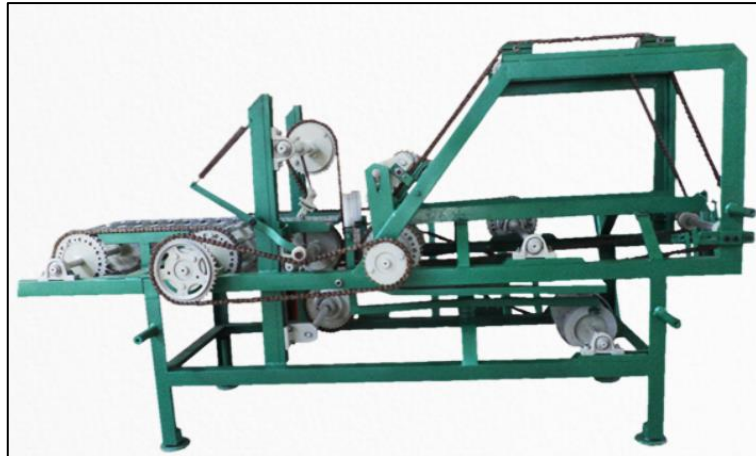
Figura 30 – Máquina extrusora (maromba).



Fonte: Gelenski - Máquinas Para Cerâmica (2014).

- **Corte** - Após o processo de extrusão o perfil desejado sai continuamente da boquilha e deve ser cortado com um formato específico de cada fabricante. Essa etapa do processo é realizada por um cortador automático, o tipo mais utilizado é semelhante o da Figura 31.

Figura 31 – Cortador automático.



Fonte: Casa da Cerâmica (2014).

- **Secagem** – Depois que a telha assume a forma esperada, ela é estocada sobre grades de madeira em um galpão onde deve descansar por vinte e quatro horas. Depois é encaminhada para o processo de secagem final podendo ser realizado ao sol, Figura 32, ou em estufas. Nas indústrias de cerâmica vermelha do Vale do Jaguaribe – CE esse processo é realizado geralmente ao sol, devido ao baixo poder aquisitivo da maioria dos empresários.

Figura 32 – Processo de secagem.



Fonte: Regional - Diário do Nordeste (2012).

- **Queima ou sinterização** – Essa etapa é considerada fundamental, nela o produto cerâmico sofre alterações e transformações em sua estrutura interna, que determinam sua qualidade e capacidade de atendimento do mercado consumidor, como: cor avermelhada, resistência mecânica, capacidade de reter água e isolamento térmico. Os percentuais de produtos de primeira qualidade e defeituosos dependem da eficiência desse processo. Se o rendimento for baixo,

a empresa necessitará de uma quantidade maior de recursos naturais para atingir a produção planejada. A queima é realizada em fornos à lenha, conforme a Figura 33. (FARIAS et al., 2012)

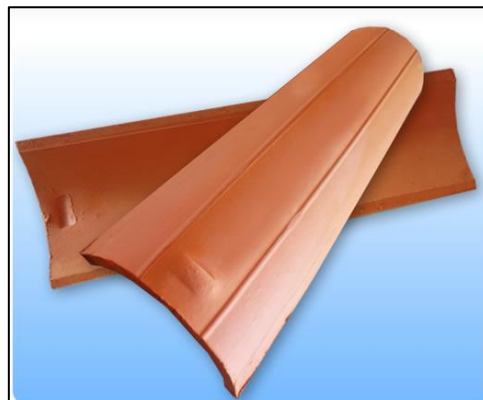
Figura 33 – Processo de sinterização em forno a lenha.



Fonte: Revistada FIEC (2009).

- **Inspeção** - Essa etapa do processo é feita na saída do forno, rejeitando-se o material quebrado, trincado, sinterizado parcialmente ou em excesso. As telhas são classificadas em três grupos: 1ª qualidade, ilustrada na Figura 34, 2ª qualidade, ilustrada na Figura 35, e 3ª qualidade. As telhas classificadas como primeira possuem melhor qualidade como: cor avermelhada uniforme, integridade e resistência. O grupo da segunda possui aproximadamente as mesmas características mecânicas do grupo de 1ª, mas apresenta cor disforme com uma parte do seu corpo escurecido. Já o grupo da terceira constituem as telhas escuras, trincadas e com a ausência de pequenas partes. Para o mercado consumidor o grupo 1ª possui maior valor agregado.

Figura 34 – Telhas 1ª qualidade.



Fonte: Cerâmica Mundial (2014).

Figura 35 – Telha 2ª qualidade.

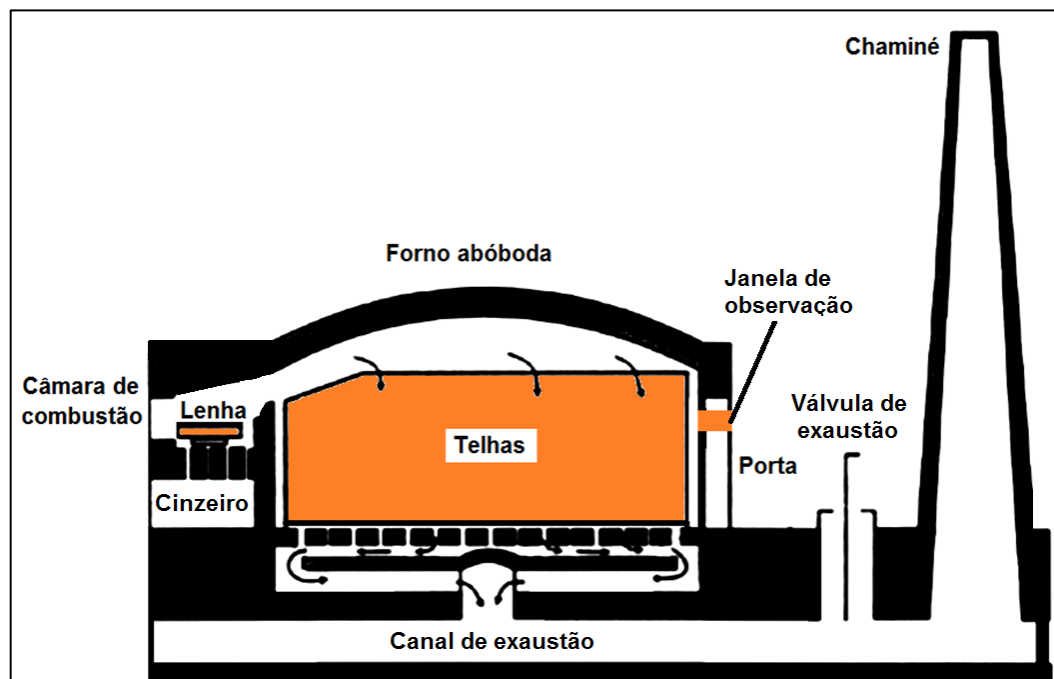


Fonte: Telha Jundiaí Grill (2014).

2.8.2 Forno

O forno utilizado na indústria de cerâmica vermelha é do tipo abóbada com chama invertida. Ele é constituído basicamente por uma câmara retangular e teto em forma de arco, construído com tijolos e argila. As câmaras de combustão ficam dispostas duas a duas, totalizando quatro por forno, separadas por uma parede divisória comum, paralelas umas às outras ao longo da parede lateral do forno com o seu início nas paredes frontais onde ficam as portas do forno. A Figura 36 mostra as partes internas do forno. Todo o conjunto é construído com tijolos e argila que durante a primeira queima ou sinterização das telhas adquirem a resistência mecânica necessária. (MESSIAS, 1996).

Figura 36 – Estrutura interna do forno.



Fonte: Messias(1996).

Os pisos internos das câmaras de combustão e do forno são construídos com tijolos específicos com aberturas ou furos para interligar o forno ao canal de exaustão, e posteriormente a chaminé. Esta, também construída em alvenaria, pode succionar o ar superaquecido de um ou mais fornos. (MESSIAS, 1996).

As telhas a serem sinterizadas são carregadas com o uso de carros de mão para o interior do forno através das portas laterais, e empilhadas sobre o piso, até preencherem todo o espaço disponível. Após esse procedimento, as portas são preenchidas com tijolos e argila para o isolamento térmico. (MESSIAS, 1996).

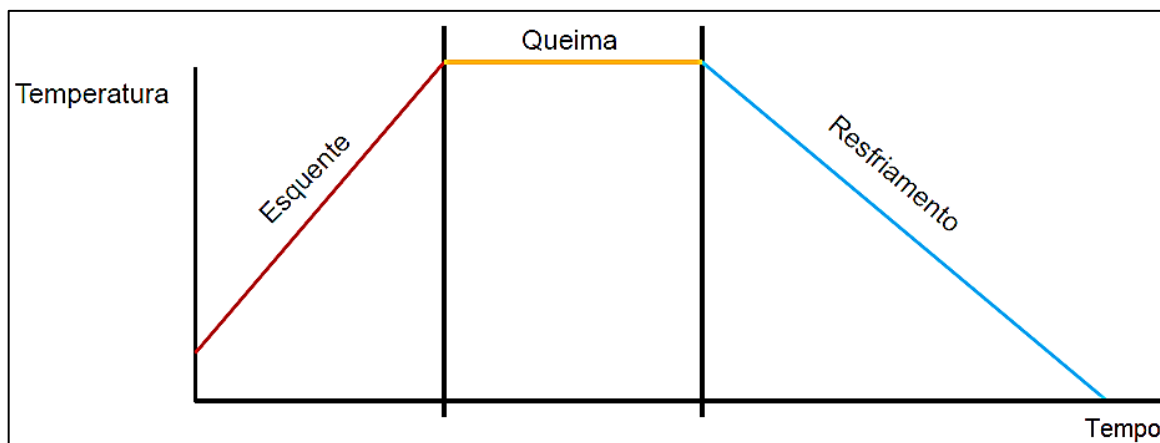
O calor gerado pela queima do combustível nas câmaras de combustão é direcionado para o interior do forno através de aberturas entre as paredes laterais e a abóbada. As chamas transpassam a câmara interna no sentido descendente, passando pelos furos do piso e seguindo para a chaminé através do canal de exaustão. (MESSIAS, 1996).

2.8.3 Processo de sinterização ou queima dos produtos cerâmicos

Nessa operação as peças adquirem suas propriedades finais, através de uma sequência de modificações físico-químicas como: redução de massa, surgimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem (sinterização) dos grãos. Esse procedimento submete os produtos a temperaturas elevadas, geralmente situadas entre 800 e 1.000°C, em três fases: aquecimento, temperatura constante e resfriamento. (FIEMG; FEAM, 2013, p. 22)

A Figura 37 mostra um gráfico da temperatura em função do tempo correspondente à curva de queima teórica para os fornos. Cada etapa será descrita a seguir.

Figura 37 – Curva de queima.



Fonte: FIEMG e FEAM (2013, p. 12).

2.8.3.1 Etapa de aquecimento ou esquento

No início, o aquecimento do forno deve ser realizado de forma lenta para retirar gradativamente a umidade das telhas, atualmente à medição desta pode ser feita com auxílio de uma barra metálica, introduzindo-a na parte inferior do forno por 30 segundos, e observando a presença ou não de umidade na barra (gotículas). (FIEMG; FEAM, 2013, p. 22)

A maior parte do aquecimento ou esquento deve ser feito com as portas das câmaras de combustão e cinzeiros do forno fechados (após a queima da lenha) para evitar o excesso de oxigênio, que prejudica a velocidade de aquecimento. As válvulas de exaustão devem ficar abertas em 100% até atingir 300° C, após esta temperatura os mesmos deverão ser fechados gradualmente. (FIEMG; FEAM, 2013, p. 26)

A velocidade de aquecimento depende do tipo de lenha, da quantidade e da frequência com a qual ela é inserida. O controle de queima pode ser realizado pela válvula do canal de exaustão que se dirige à chaminé do forno. Geralmente, os funcionários deixam esse registro totalmente aberto do início ao fim da queima, aumentando o consumo de combustível e os problemas de homogeneização de queima. Outro fator importante é o aumento da temperatura que não deve ser maior que 40°C por hora, principalmente nas temperaturas de riscos (375° e 575° C). (FIEMG; FEAM, 2013, p. 26)

2.8.3.2 Sinterização ou queima

Durante o período em que as telhas ficam a temperatura de sinterização, quanto mais tempo o produto permanecer nessa temperatura melhor será a qualidade do mesmo. O recomendável é o mínimo de 6 horas de patamar de queima para produtos vazados e 10 horas para telhas e produtos maciços. (FIEMG; FEAM, 2013, p. 26)

Para melhorar o processo de sinterização na microempresa selecionada para a realização do trabalho de pesquisa foi adotado um período de 12 a 15 horas.

2.8.3.3 Resfriamento do forno

O resfriamento pode ser acelerado na faixa de temperatura de 850 a 650°C, abrindo as câmaras de queima e cinzeiros e retirando as brasas e cinzas retidas no cinzeiro durante o processo de queima. O intervalo de temperatura de 650 a 450°C é crítico. Nesta faixa, a velocidade de resfriamento deve ser reduzida, fechando as câmaras de combustão. Os

cinzeiros poderão ficar abertos para manter o resfriamento em andamento, mas se a velocidade de resfriamento for elevada os produtos cerâmicos poderão quebrar ou trincar. (FIEMG; FEAM, 2013, p. 27)

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas de inteligência artificial e componentes de *hardware* utilizados no sistema microcontrolado inteligente de baixo custo para o monitoramento da temperatura em fornos das indústrias cerâmicas. Também foram expostos os conceitos básicos referentes à indústria de cerâmica vermelha e seus processos de fabricação.

3. SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA (SMMT)

Para sinterizar o produto de cerâmica vermelha de forma eficiente é necessário, de alguma maneira: conhecer, controlar e estabelecer a temperatura ideal durante todo o processo. Esse controle é relativamente complexo devido a diversas variáveis envolvidas.

Para isso, foi necessário desenvolver um módulo capaz de fornecer ao sistema inteligente os valores das altas temperaturas presentes na sinterização. Nessa etapa, realizou-se uma pesquisa sobre os componentes existentes que pudessem fazer parte do módulo.

Para reduzir os custos de produção, foi utilizada como ponto de partida a plataforma arduino. Essa plataforma disponibiliza um conjunto de ferramentas capazes de reduzir o tempo de desenvolvimento de protótipos.

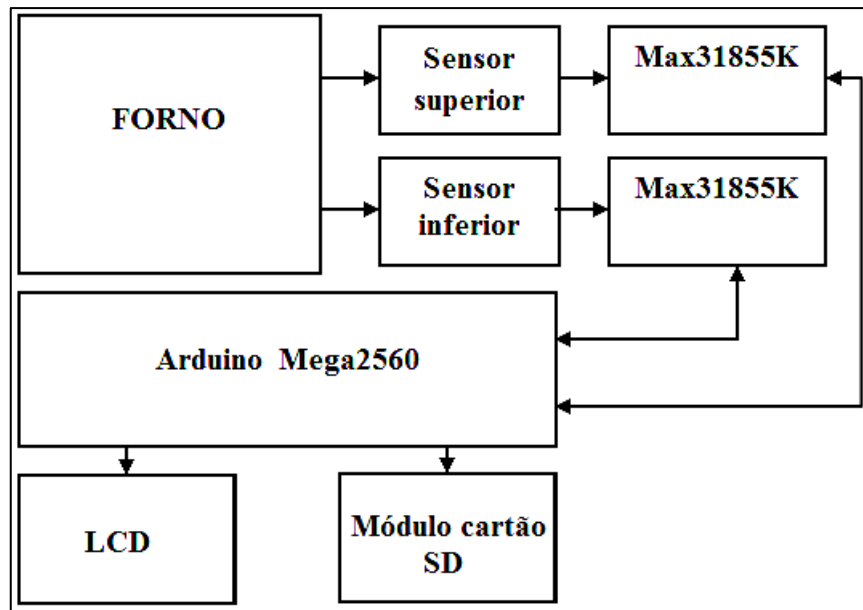
Segundo Jobstraibizer (2010), um sistema embarcado (SE) é um computador com baixa capacidade computacional encapsulado em um dispositivo, capaz de realizar um conjunto de tarefas predefinidas com fins específicos. De acordo Schuler (2013, p. 290), o funcionamento do SE é controlado por um programa armazenado em sua memória.

Na seção seguinte é apresentado o módulo do sistema utilizado para medir a temperatura no interior dos fornos das indústrias de cerâmica vermelha.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA (SMMT)

O SMMT é composto por dois sensores de temperatura, para medir a temperatura nas partes superior e inferior do interior do forno, dois Circuitos Integrados (CI) Max31855K, com a função de fazer a interface entre os sensores e o microcontrolador do arduino, uma placa Arduino Mega 2560, responsável por processar os dados e convertê-los em informações, uma placa com cartão SD para armazenar os valores das temperaturas coletadas pelos sensores e um visor de LCD (*liquid crystal display*) para informar os valores. A Figura 38 mostra o diagrama de blocos do módulo.

Figura 38 – Diagrama de blocos do SMMT.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 Sensores

Após avaliar os diversos tipos sensores, chegou-se a conclusão, que até o momento apenas dois podem atender os critérios e serem utilizados no sistema microcontrolado: os termômetros de resistência e o termopar. Entre os dois, o que oferece maior simplicidade de montagem, baixo custo, e faixa de medição de temperatura, aproximadamente entre 30 e 1100°C é o termopar tipo K.

O termopar selecionado possui um comprimento total de 1100mm, protegido por um tubo confeccionado em aço inoxidável resistente a temperaturas superior a 900°C e um cabeçote de proteção. A Figura 39, mostra o termopar.

Figura 39 – Termopar utilizado no SMMT.



Fonte: Alutal Controles Industriais (2014).

A sua utilização em sistemas microcontrolados oferece alguns obstáculos, como:

- Segundo Adafruit (2014), a tensão gerada pelo sensor para a determinação da temperatura é baixa, variando aproximadamente 0,05mV/C°. Essa

característica dificulta a utilização direta dos termopares em placas arduino com microcontroladores, porque eles possuem conversores analógicos digitais de 8, 10 ou no máximo 12 bits. A resolução alcançada com um conversor de 12 bits é 1,22mV;

- A tensão gerada pelo termopar em função da temperatura não é linear, podendo variar para mais ou menos o valor de 0,05mV/C°, sendo necessária uma compensação de temperatura, entre a junção quente e a junção fria; (ADAFRUIT, 2014)

Por esses motivos é fundamental a utilização de uma interface entre os termopares e a placa de aquisição de dados Arduino Mega 2560, como o Circuito Integrado (CI) Max31855K.

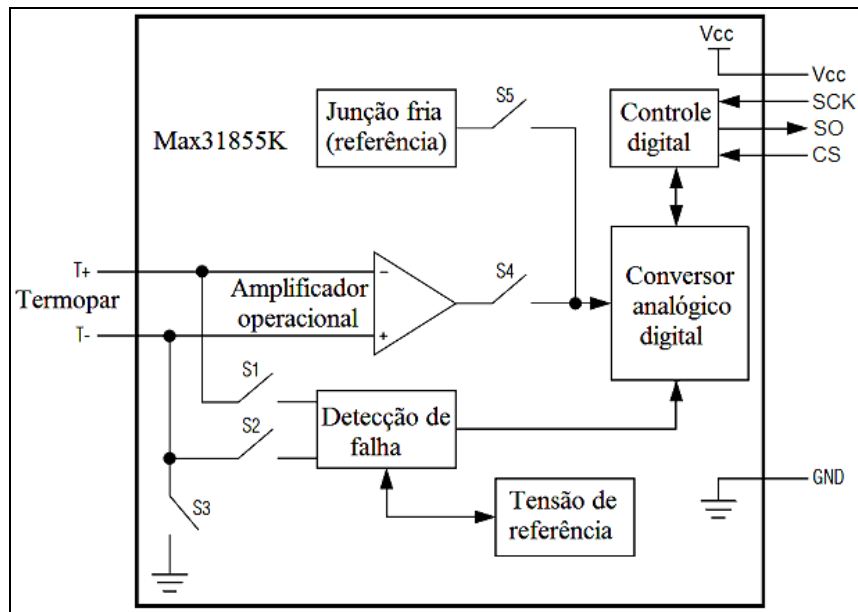
3.1.2 Circuito Integrado (CI) Max31855K

Como interface são utilizados dois módulos *nanoshield thermocouple* tipo K da Circuitar Eletrônicos com CI Max31855K fabricado pela *Maxim Semiconductor*. (CIRCUITAR ELETRÔNICOS, 2015)

O Max31855K é um micro chip constituído de vários componentes internos que facilita o uso de termopares em sistemas microcontrolados. Ele possui um amplificador operacional que amplifica o sinal baixo emitido pelo termopar, um conversor analógico digital (A/D) de 14 bits que converte o sinal analógico do sensor em um sinal digital capaz de ser interpretado pelo microcontrolador do arduino com uma resolução de 0.25°C. Possui uma faixa de operação, juntamente com o termopar, entre -270°C e 1372°C. (CIRCUITAR ELETRÔNICOS, 2015) e (MAXIM INTEGRATED, 2012)

O dispositivo contém uma junção fria (temperatura de referência) formada por um sensor interno de temperatura para a medição, compensação e correção do sinal emitido pela junção quente do termopar. Ele também possui um controlador digital, com interface de comunicação serial ISP (Interface Serial Periférica) associada a um controle lógico de comunicação. Os seus componentes internos são mostrados na Figura 40. (MAXIM INTEGRATED, 2012)

Figura 40 – Max31855K.

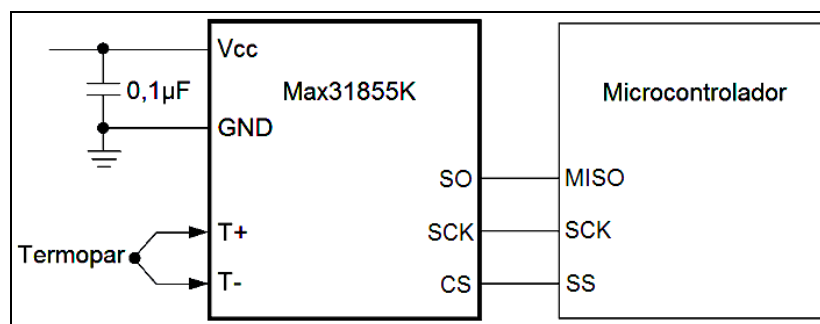


Fonte: Maxim Integrated (2012).

O CI foi projetado para trabalhar em conjunto com um microcontrolador em sistemas destinados ao monitoramento e controle de temperatura de processos. Ele está disponível em versões especializadas para cada tipo de termopar (K, J, N, T, S, R, ou E.). O tipo de termopar é indicado no sufixo do número do CI. Exemplo: Max31855K. (MAXIM INTEGRATED, 2012)

A Figura 41 mostra o circuito integrado do Max31855K conectado ao microcontrolador ATmega2560 do arduino. O CI recebe o sinal elétrico do termopar e transmite os dados através de uma ISP. Para a sua utilização é fundamental estabelecer as portas SS (Seleção do dispositivo) e SCK (*Clock*) como saídas e o MISO (Recepção dos dados) como entrada digital, tomando como referência o microcontrolador. A porta SO é utilizada pelo CI para transmitir os dados.

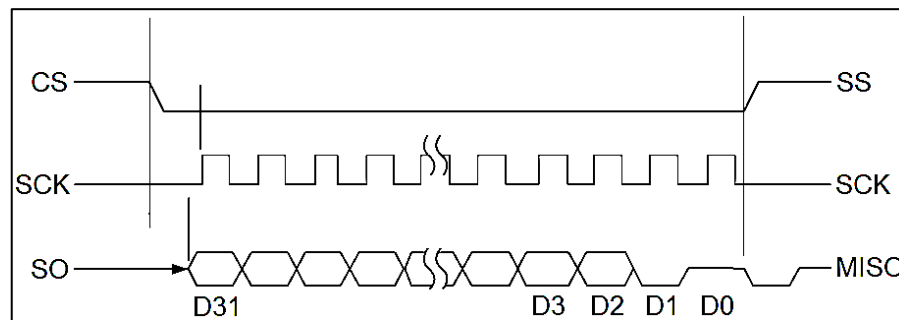
Figura 41 – Interface para a leitura do termopar.



Fonte: Maxim Integrated (2012).

Após a especificação das portas digitais é preciso atribuir o valor baixo, nível lógico 0, ao SS e fornece um sinal de *clock* ao SCK para receber os dados através do MISO. Para fazer a leitura do termopar, são necessários trinta e dois ciclos de *clock*. Onde, em cada ciclo de clock se transmite um dado de largura de bit, representado na Figura 42 pela letra D. (MAXIM INTEGRATED, 2012)

Figura 42 – Comunicação serial.



Fonte: Maxim Integrated (2012).

Os dados devem ser interpretados da seguinte forma: o primeiro bit, D31, é o sinal + ou - da temperatura. Os bits D30 a D18 contêm a temperatura convertida da junção quente. O bit D16 é normalmente nível baixo quando os dados estão corretos e nível alto quando o termopar está danificado ou em curto com GND (Terra) ou Vcc. Os dados da temperatura da junção de referência começam no bit D15. (MAXIM INTEGRATED, 2012).

Antes de se conhecer o valor da grandeza no interior do forno, deve ser feita uma compensação entre a temperatura da junção quente e a junção fria, estabelecendo um valor de referência virtual flutuante (0°C) com o objetivo de reduzir os erros de medição. Para o termopar tipo K, a variação de tensão é em torno de 41µV/°C, que se aproxima da característica do termopar com a equação linear (3), Maxim Integrated (2012):

$$V_s = (41.276\mu V/^{\circ}C) \times (T_q - T_f) \quad (3)$$

V_s = Tensão de saída do termopar em µV

T_q = Temperatura da junção quente (medição) em °C

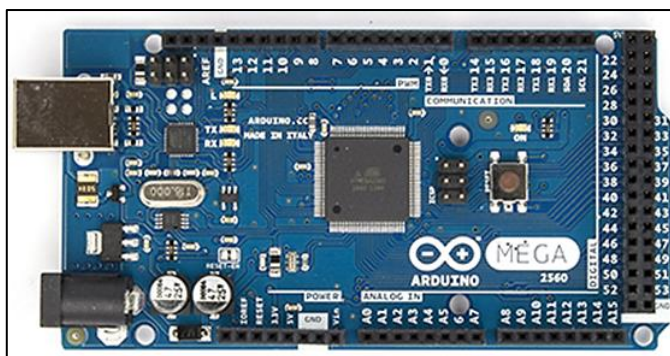
T_f = Temperatura da junção fria (referência) em °C

Existem algumas bibliotecas com código-fonte aberto para a utilização do Max31855K no arduino. A usada neste trabalho de pesquisa é a Adafruit MAX31855. Um link para a página de *download* da biblioteca esta disponível no site da Adafruit (2014): **Using a Thermocouple**. Os links para baixar a biblioteca e as informações para a sua utilização e distribuição estão disponíveis na página da GitHub (2015): **Adafruit/Adafruit-MAX31855-library**.

3.1.3 Placa arduino

O modelo de placa selecionada para compor o sistema é a Arduino Mega2560, ilustrada na Figura 43, devido seu baixo custo e possibilidade de atender as necessidades do projeto. Esse modelo de placa possui um microcontrolador ATmega2560, 54 pinos de entradas/saídas digitais, 16 entradas analógicas, 4 portas seriais de *hardware*, um oscilador a cristal de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP (*In-circuit serial programming*), usada para gravar o software no microcontrolador, e um botão de *reset*. (ARDUINO, 2015)

Figura 43 – Arduino Mega2560.



Fonte: Arduino (2015).

O microcontrolador ATmega2560, possui 256KB de memória *flash* para armazenamento de código, 8KB de SRAM e 4KB de EEPROM. Cada um dos 54 pinos digitais pode ser utilizado como uma entrada ou uma saída. Eles operam com 5 volts para nível alto e 0 volts para nível baixo. Cada pino pode drenar no máximo uma corrente elétrica de 40mA. Porém a soma das correntes não pode ultrapassar 200mA. (ARDUINO, 2015)

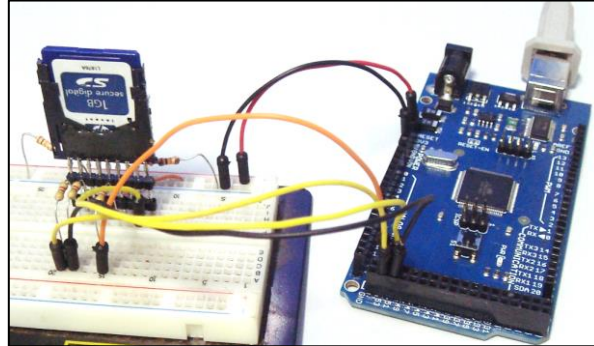
3.1.4 Módulo cartão SD

Para encontrar e montar um modelo ideal com os valores da temperatura interna do forno, durante todo o processo de sinterização, era necessário armazenar esses valores entre 60 e 72 horas. Como a memória para o armazenamento de dados do arduino é limitada, foi necessário à instalação de uma placa com cartão SD Card. Essa placa utiliza a biblioteca oficial do arduino, permitindo a leitura e escrita em um cartão SD com suporte ao formato FAT32 e capacidade de até 4GB.

Os dados armazenados no cartão podem ser utilizados para montar o modelo ideal e assim reproduzi-lo em sinterizações futuras e supervisionar a atuação dos funcionários

responsáveis pelo processo de sinterização. A Figura 44 mostra o módulo SD Card conectado ao Arduino Mega 2560.

Figura 44 – Módulo SD Card.



Fonte: Trentin (2011).

3.1.5 *Liquid crystal display* – LCD

O LCD usado no módulo para medição de altas temperaturas possui uma interface de comunicação paralela. Para exibir um texto é necessário armazenar os dados e instruções em registradores. A Biblioteca de LCD (*LiquidCrystal*) do arduino simplifica todo o processo de uma forma que não é necessário conhecer as instruções de baixo nível para realizar a transmissão de uma informação. A Figura 45 mostra o LCD 16x2 de 16 colunas e 2 linhas usado no Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura (SMMT). (ARDUINO, 2014)

Figura 45 – LCD.



Fonte: Arduino (2014).

3.1.6 Módulo de tempo real DS1307

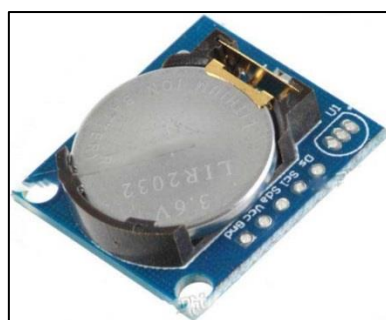
O sistema microcontrolado para a medição de altas temperaturas foi programado para fazer as leituras dos sensores a cada trinta minutos, mas quando ocorria algum erro na

leitura o sistema não gravava o valor da temperatura naquele dado momento. Para solucionar esse problema foi inserido um módulo com um circuito integrado DS1307.

O DS1307 possui um relógio de tempo real com calendário completo até o ano de 2100 e tem por característica um baixo consumo de energia. Para o seu funcionamento é essencial o uso de um cristal externo de 32,768kHz e uma bateria que o mantenha caso o fornecimento de energia seja interrompido. (LIMA; VILLAÇA, 2012, p. 396)

Esse módulo fornece as informações no tempo exato de ocorrência em segundos, minutos, horas, dia, mês e ano. Dessa forma, o sistema é capaz de gravar os valores da temperatura e do tempo de cada leitura. A Figura 46 mostra o módulo de tempo com sua bateria.

Figura 46 – Módulo de tempo real.



Fonte: TECHMOUNT(2014).

3.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS

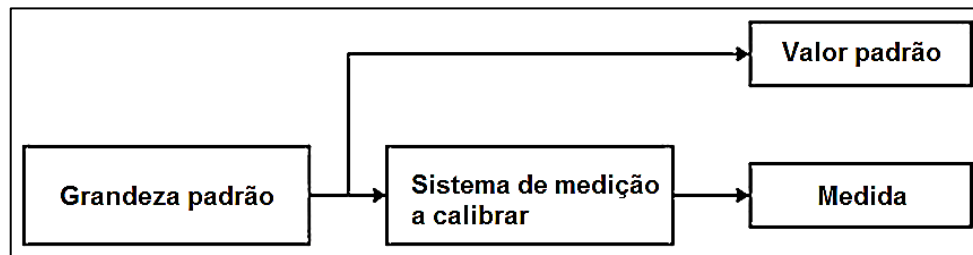
Um Sistema de Medição (SM) de boa qualidade deve ser capaz de fornecer os valores da grandeza medida com o mínimo de erros. Ele deve ser projetado para reduzir os erros ao longo da sua faixa de medição nas suas condições de funcionamento nominais. (SILVA NETO, 2012).

Através do procedimento experimental denominado calibração é possível estabelecer uma relação entre os valores (indicações) informados pelo sistema de medição e os valores correspondentes à grandeza medida. A calibração pode ser realizada de forma direta ou indireta. (SILVA NETO, 2012).

3.2.1 Calibração direta

A calibração é realizada utilizando padrões com medidas materializadas com seus valores convencionais verdadeiramente conhecidos. Uma simulação desse tipo de calibração pode ser visto na Figura 47. Os valores informados pelo sistema são confrontados com cada valor padrão para ser calculado o erro de medição. (SILVA NETO, 2012).

Figura 47 – Método de calibração direta.

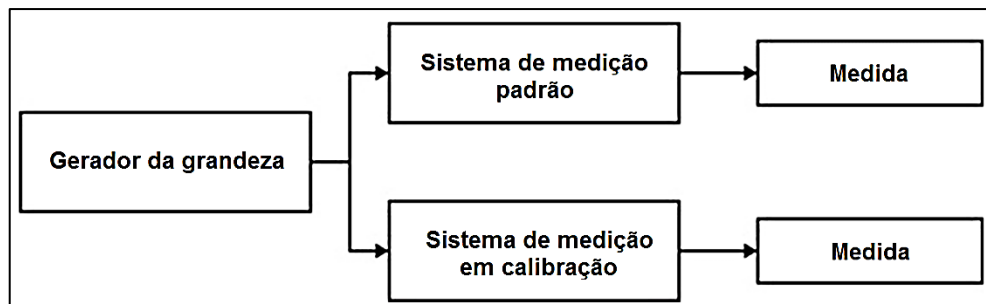


Fonte: Silva Neto (2012).

3.2.2 Calibração indireta

A grandeza a ser medida é gerada por um dispositivo auxiliar chamado de gerador da grandeza, que atua simultaneamente no sistema de medição a calibrar e no sistema de referência ou padrão. A medição da grandeza é feita pelos sistemas e os valores informados são comparados para que sejam feitas as devidas correções. A Figura 48 mostra o diagrama de blocos da calibração indireta. (SILVA NETO, 2012).

Figura 48 – Método de calibração indireta.



Fonte: Silva Neto (2012).

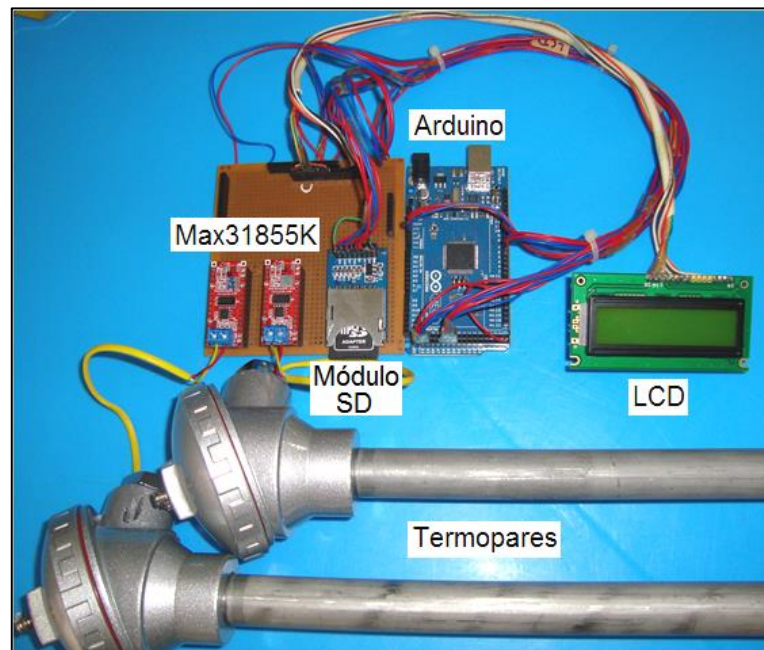
3.2.3 Seleção do tipo de calibração do sistema

A calibração direta é extremamente precisa, mas se torna onerosa devido à necessidade de um laboratório certificado com instrumentos e padrões especiais, além de um

ambiente rigorosamente controlado. Por esses motivos, o tipo de calibração adotado para o sistema microcontrolado para medição de altas temperaturas é o indireto.

A calibração indireta é precisa e oferece menor dificuldade de ser realizada, não sendo necessários laboratórios certificados para a aferição do sistema. O sistema a calibrar é ilustrado na Figura 49.

Figura 49 – Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura (SMMT).

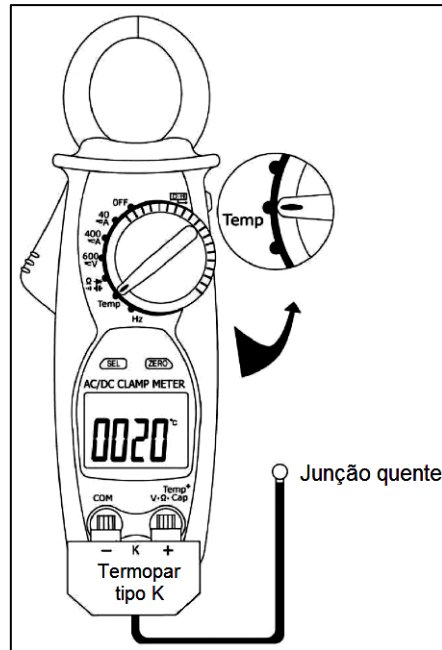


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4 Sistema de Medição Padrão (SMP)

O sistema padrão utilizado como referência para a calibração é formado por um alicate amperímetro digital modelo ET-3357 fabricado pela Minipa e um termopar tipo K, mostrados na Figura 50. O instrumento possui as seguintes características: faixa de medição de temperatura de -20 a 750°C, resolução de 1°C e precisão de $\pm (1\% + 5 \text{ dígitos})$ da leitura. (MINIPA, 2014).

Figura 50 – Sistema de referência padrão.



Fonte: Minipa (2014).

A Minipa é uma empresa brasileira do setor de instrumentos de medição em eletroeletrônica que possui as seguintes certificações: ISO 9001:2000, ISO 9001:2008 e o certificado de calibração do INMETRO segundo a Norma Internacional NBR ISSO/IEC 17025 CAL 0297. (MINIPA, 2014).

3.2.5 Procedimento de calibração

O termopar destinado a medir a temperatura no ponto superior (Termopar superior) do forno de cerâmica vermelha foi conectado ao Max31855K e este ao arduino. Os termopares dos sistemas SMMT e SMP foram inseridos em uma estufa, com potência de 2400W e capacidade de aquecimento até 200°C, um ao lado do outro de forma que a diferença de temperatura entre os sensores fosse desprezível, de acordo com a Figura 51.

Figura 51 – Estufa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram obtidas as indicações dos sistemas de medição durante o aquecimento do ar do interior da estufa até a temperatura de 190°C. O mesmo procedimento foi realizado com o termopar inferior.

3.2.6 Resultados do procedimento de calibração

A Tabela 2 mostra os valores de temperatura indicados pelos sistemas: Sistema de Medição Padrão (SMP) e Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura (SMMT). As medições foram realizadas com intervalos de aproximadamente 10 minutos. As indicações possuem tolerâncias que podem variar para mais ou menos o valor real da grandeza mensurada.

Tabela 2 - Leituras dos sistemas de medição.

SMP (°C)	SMMT Termopar Superior (°C)	SMMT Termopar Inferior (°C)
40±5,4	33±6	32,75±6
52±5,25	41,75±6	41,00±6
60±5,6	48,50±6	48,8±6
70±5,7	59,75±6	58,00±6
81±5,81	71,75±6	79,00±6

SMP (°C)	SMMT Termopar Superior (°C)	SMMT Termopar Inferior (°C)
90±5,9	80,50±6	84,00±6
100±6	90,25±6	92,75±6
110±6,1	103±6	102,50±6
120±6,2	114,50±6	113,25±6
130±6,3	126±6	123,25±6
140±6,4	136,50±6	133,25±6
150±6,5	149±6	143,75±6
160±6,6	160,25±6	154,75±6
171±6,71	171,75±6	165,75±6
180±6,8	180,25±6	175,75±6
190±6,9	192,25±6	185,25±6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando as tolerâncias do SMP e dos termopares, do SMMT, o sistema demonstra ser capaz de monitorar a temperatura de forma correta. Mas, se for considerado necessário, com algumas modificações em seu *firmware* ele pode se tornar mais eficiente.

Utilizando uma técnica de estatística, chamada de Regressão Linear Simples (RLS), o *firmware* pode aproximar o valor da leitura do termopar do valor fornecido pelo SMP. A RLS é um modelo matemático elaborado a partir de amostras para a dedução de valores futuros, que estabelece uma relação entre duas variáveis através da seguinte equação $f(x) = a + bx$. (ARAUJO, 2009) (ROMIO E LORSCHETER, 2012)

Aplicando a RLS aos valores fornecidos pelos sistemas de medição de temperatura utilizando o *software* GeoGebra(2015), obtemos as equações (4) e (5) para fazer as correções dos valores das leituras obtidas pelo SMMT. Os resultados com as devidas correções são apresentados na Tabela 3:

Equação para os valores do termopar superior:

$$\text{SMMTsc} = 13 + 0,92(\text{SMMTs}) \quad (4)$$

SMMTsc = Leitura do termopar superior corrigida

SMMTs = Leitura do termopar superior

Equação para os valores do termopar inferior:

$$\text{SMMTic} = 10 + 0,96(\text{SMMTi}) \quad (5)$$

SMMTic = Leitura do termopar inferior corrigida

SMMTi = Leitura do termopar inferior

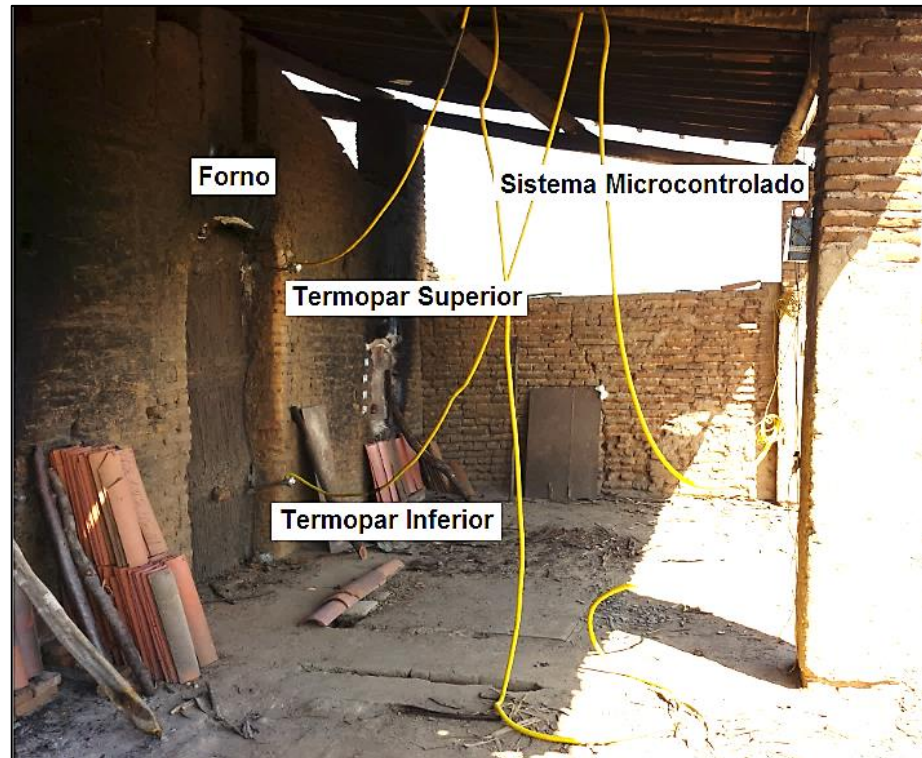
Tabela 3 - Leituras do SMMT após a correção.

SMP (°C)	SMMT Termopar Superior (°C)	SMMT Termopar Inferior (°C)
40±5,4	43,36±6	41,44±6
52±5,25	51,41±6	49,36±6
60±5,6	57,62±6	56,84±6
70±5,7	67,97±6	65,68±6
81±5,81	79,01±6	85,84±6
90±5,9	87,06±6	90,64±6
100±6	96,03±6	99,09±6
110±6,1	107,76±6	108,4±6
120±6,2	118,34±6	118,72±6
130±6,3	128,92±6	128,32±6
140±6,4	138,58±6	137,92±6
150±6,5	150,08±6	148±6
160±6,6	160,43±6	158,56±6
171±6,71	171,01±6	169,12±6
180±6,8	178,83±6	178,72±6
190±6,9	189,87±6	187,84±6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a calibração do SMMT, o mesmo foi instalado em um forno de uma indústria de cerâmica vermelha. Com o sistema foi possível traçar um perfil da temperatura no interior do forno durante um processo de sinterização, que possibilitou um aproveitamento de 82,76%. O resultado é excelente, com essas informações será possível repetir esse rendimento em sinterizações futuras, se o modelo elaborado pelo sistema for seguido. A Figura 52 mostra o SMMT com os seus sensores fixados na porta do forno para coletar os valores da temperatura nas partes superior e inferior do interior do mesmo.

Figura 52 – SMMT instalado no forno.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O sistema microcontrolado para medição de temperatura demonstra estar pronto para ser utilizado no monitoramento de altas temperaturas em fornos das indústrias de cerâmica vermelha. Para melhorar a sua eficiência foi realizada uma calibração indireta através da análise comparativa entre o SMMT e um sistema de medição industrial calibrado segundo normas internacionais. Os valores fornecidos pelos módulos Max31855K foram corrigidos pelo *firmware* que controla o sistema utilizando um modelo matemático chamado de regressão linear simples, que possibilitou uma maior aproximação dos valores reais.

4. SISTEMA MICROCONTROLADO INTELIGENTE DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO DE ALTAS TEMPERATURAS EM FORNOS DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA.

Usando o Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura (SMMT) como ponto de partida, o próximo passo foi analisar os requisitos para escrever o código fonte do *firmware* para dotar o sistema microcontrolado de inteligência para monitorar o processo de sinterização dos produtos cerâmicos. O programa principal foi escrito em linguagem C e usadas bibliotecas em C++, o que facilitou a programação, atualização e a redução de recursos computacionais para o sistema. Para gravar o código, a placa arduino disponibiliza uma interface de comunicação entre o microcontrolador e o computador com a função de transmitir de forma simples as atualizações.

As questões iniciais foram: Quais as funções do equipamento?, Com quem ele vai interagir?, Quais os resultados esperados?, Quais os recursos computacionais disponíveis?. Com base neste questionamento o código começou a ser desenvolvido.

O SMMT foi utilizado para medir a temperatura nas partes superior e inferior do forno em função do tempo dos processos de sinterização exatamente como eles ocorriam na microempresa de cerâmica vermelha e, com base nas informações, foi montado um modelo inicial do processo de sinterização. Esse procedimento foi realizado para se encontrar a faixa de temperatura ideal para o forno, obtendo um aproveitamento máximo da quantidade de telhas com qualidade de cor, resistência mecânica e impermeabilidade. Com base nessas informações foi construído um gráfico informando a temperatura ideal em função do tempo com as devidas tolerâncias para ser utilizado como modelo interno do sistema.

Os valores considerados ideais foram classificados como temperaturas padrão. Durante o processo é necessário um intervalo de tempo para os funcionários inserirem o combustível e o mesmo produzir calor. Por isso, o sistema deve se antecipar e evitar variações bruscas de temperatura, o que causa a quebra ou deformação dos produtos cerâmicos.

Para conduzir o processo de sinterização, o sistema microcontrolado inteligente deve monitorar e fornecer informações aos funcionários sobre o que fazer, como: adicionar combustível, a sua quantidade, parar de adicionar e a porcentagem de abertura da válvula do canal de exaustão. Essas informações devem ser transmitidas da forma mais simples possível, por meio de sinalizadores visuais, sonoros e comunicação textual, devido à falta de mão de obra especializada. O *hardware* adicional para a comunicação do sistema inteligente com os funcionários é discutido nas seções seguintes.

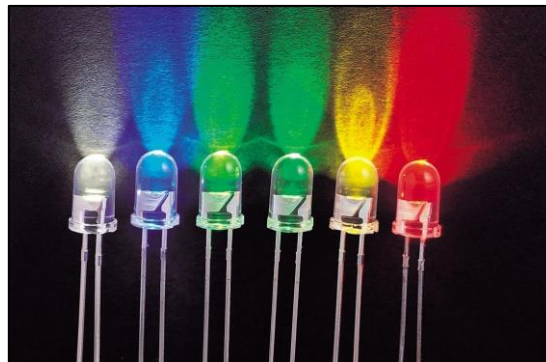
4.1 SINALIZADORES VISUAIS - LEDs

Os sinalizadores visuais ou luminosos podem ser lâmpadas ou LEDs, utilizados para transmitir informações de um determinado evento. Eles são aplicados em locais de fácil visualização. No sistema microcontrolado inteligente eles vão transmitir, de forma simples, a informação de inserir ou não o combustível na câmara de combustão do forno. O conjunto de sinalizadores empregado no sistema é constituído de LEDs de alto brilho, devido o seu baixo consumo de energia.

O LED (*Light Emitter Diode*) é um componente eletrônico semicondutor emissor de luz, que tem a capacidade de converter energia elétrica em luminosa. Ele é um elemento bipolar, ou seja, tem um terminal que deve ser ligado em um polo positivo e o outro ao polo negativo ou terra. (SANTANA, 2014)

Os LEDs de alto brilho funcionam da mesma forma que um led comum, mas com maior capacidade de emissão de luz. A Figura 53 exhibe os tipos usados no projeto.

Figura 53 – LEDs de alto brilho.



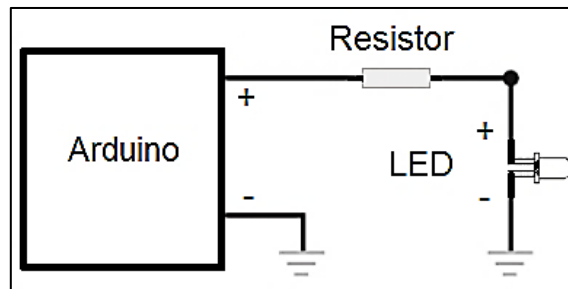
Fonte: LED (2014).

Para o seu funcionamento é necessário uma fonte de energia, no caso o pino de saída digital da placa Arduino Mega2560, e um resistor. Esse componente também é um elemento eletrônico, mas com a função de limitar a quantidade de energia destinada ao LED para evitar que o mesmo venha a ser danificado. Para utilizar os LEDs no sistema, foi necessário usar três resistores, um para cada LED, e com eles montar um circuito eletrônico em uma placa perfurada com uma de suas faces banhada em cobre para a soldagem dos elementos. As características dos LEDs são descritas a seguir:

- LEDs:
 - ✓ Tamanho: 5 milímetros;
 - ✓ Tensão elétrica: de 3 a 3,3 volts.
 - ✓ Corrente elétrica máxima: até $25 \times 10^{-3} \text{A}$

A Figura 54 mostra o esquema básico de ligação de um LED. Um fio deve ser soldado em uma das extremidades do resistor para ser conectado ao pino da placa Arduino Mega2560, a outra extremidade do resistor deve ser soldada a uma das extremidades do LED e por fim a outra extremidade do LED deve ser conectada ao pino terra da placa Arduino Mega2560.

Figura 54 – Esquema de ligação de um LED.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As informações serão transmitidas usando seis LEDs de alto brilho, sendo três verdes para informar que deve ser inserido combustível e três vermelhos para parar de adicionar.

4.2 SINALIZADOR SONORO - SIRENE

Os sinalizadores sonoros podem ser sirenes ou buzinas com a função de informar o acontecimento de eventos ou se eles estão prestes a ocorrer. Esses indicadores podem transmitir informações em locais de baixa visibilidade ou quando se deseja atingir um maior número de pessoas. (MOREIRA, 2012, p. 25)

O sinalizador utilizado no sistema é uma sirene elétrica, conforme a Figura 55. Ela tem o objetivo de chamar a atenção dos funcionários e indicar que o sistema vai transmitir alguma informação, através dos LEDs e LCD.

Figura 55 – Sirene elétrica.

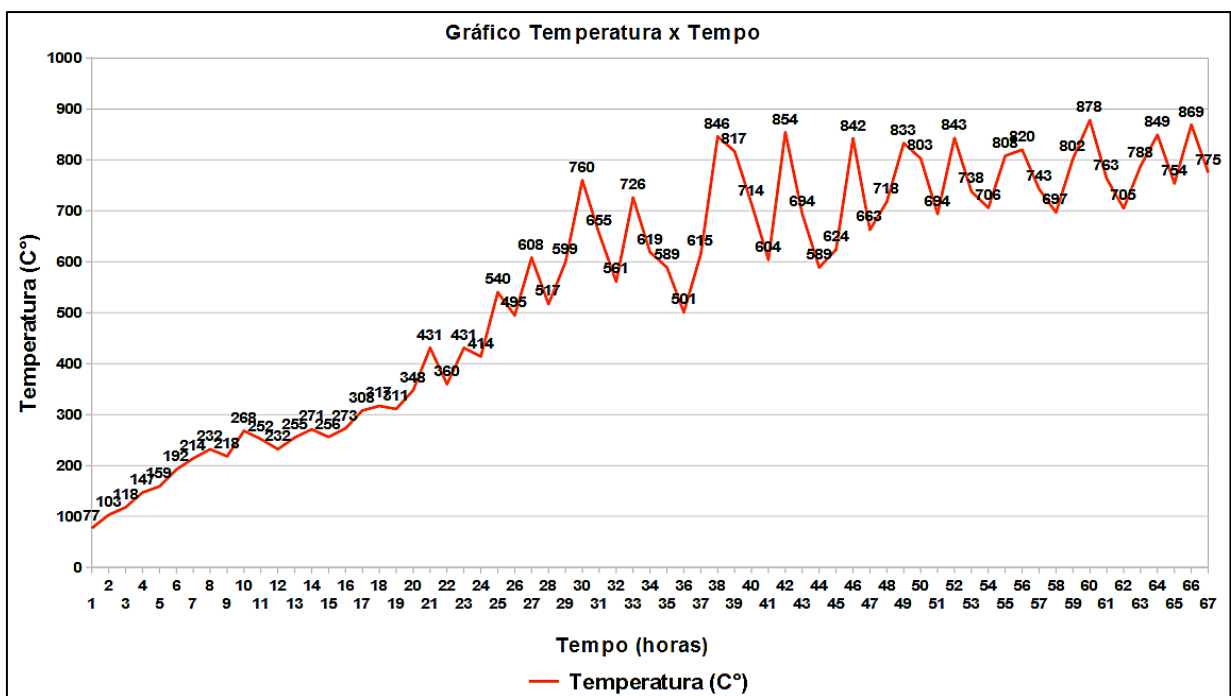


Fonte: Sirene (2014).

4.3 LINEARIZAÇÃO DA CURVA DE SINTERIZAÇÃO OU QUEIMA PARA COMPOR O MODELO INTERNO DO SISTEMA INTELIGENTE

O modelo obtido com o SMMT contendo os valores da temperatura em função do tempo é eficaz, mas ele possui alguns problemas de eficiência energética. Os elementos que o constituem estão distribuídos de forma dispersa, ou seja não lineares, o que caracteriza redução e aumento de calor no interior do forno de forma irregular. Se a temperatura reduzir, será necessário mais combustível para fazê-la retornar ao seu valor considerado ideal ou padrão e o seu excesso é classificado como desperdício. A Figura 56 mostra o gráfico da curva de sinterização obtida com o SMMT.

Figura 56 – Curva de sinterização ou queima dos produtos cerâmicos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Antes de incorporar o modelo interno do perfil térmico ao *firmware*, foi realizada uma linearização dos valores da temperatura com os objetivos de aumentar a eficiência energética e facilitar a sua reprodução pelo sistema microcontrolado inteligente. O processo de linearização é obtido com a distribuição dos valores considerados ideais ou padrões segundo uma função linear.

Seguindo o modelo teórico da curva de sinterização ou queima exposta na seção 2.8.3, os valores foram divididos em dois subconjuntos para ser linearizados: i) valores de temperatura para a fase de aquecimento ou esquentar e ii) valores para a sinterização ou

patamar de queima. Para a linearização foi utilizada novamente a técnica da Regressão Linear Simples (RLS).

Os valores menores ou iguais a 850°C foram atribuídos ao subconjunto aquecimento e o restante ao sinterização. Com os valores classificados como aquecimento foi gerado um gráfico no *software* Calc, Libreoffice The Document Foundation (2015), e depois executado o comando para inserir a linha de tendência. O Calc disponibiliza várias maneiras de gerar essa linha, entre elas esta a Regressão Linear Simples (RLS), e ainda fornece a equação utilizada para isso.

Aplicando a RLS aos valores da temperatura em função do tempo, obtidos com o SMMT, chegamos à equação (6) para fazer a linearização dos valores:

$$T_i = 17,3079(\Delta t) + 50 \quad (6)$$

T_i = Temperatura ideal

Δt = Variação de tempo (1h)

A Tabela 4 mostra os valores iniciais dos modelos e padrão encontrado.

Tabela 4 – Linearização dos valores de aquecimento.

Tempo (Horas)	Valores do modelo sem a linearização (°C)	Valores do modelo com a linearização (°C)	Padrão encontrado com diferença de temperatura entre os valores do modelo linearizado (°C)
1	77	67,3079	
2	103	84,6158	84,6158 - 67,3079 = 17,3079
3	118	101,9237	101,9237 - 84,6158 = 17,3079
4	147	119,2316	119,2316 - 101,9237 = 17,3079
5	159	136,5395	136,5395 - 119,2316 = 17,3079
6	192	153,8474	153,8474 - 136,5395 = 17,3079
7	214	171,1553	171,1553 - 153,8474 = 17,3079
8	232	188,4632	188,4632 - 171,1553 = 17,3079
9	218	205,7711	205,7711 - 188,4632 = 17,3079
10	268	223,079	223,079 - 205,7711 = 17,3079
11	252	240,3869	240,3869 - 223,079 = 17,3079
12	232	257,6948	257,6948 - 240,3869 = 17,3079
13	255	275,0027	275,0027 - 257,6948 = 17,3079
14	271	292,3106	292,3106 - 275,0027 = 17,3079
15	256	309,6185	309,6185 - 292,3106 = 17,3079

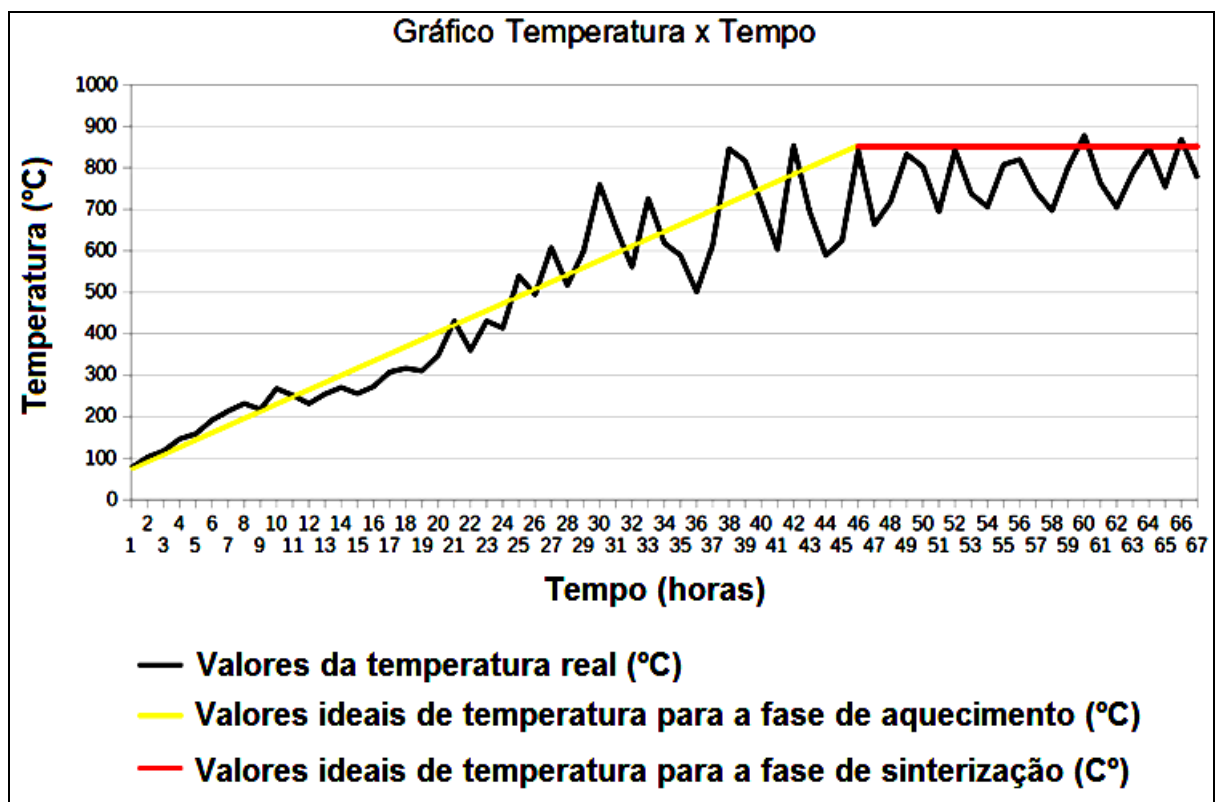
Tempo (Horas)	Valores do modelo sem a linearização (°C)	Valores do modelo com a linearização (°C)	Padrão encontrado com diferença de temperatura entre os valores do modelo linearizado (°C)
16	273	326,9264	$326,9264 - 309,6185 = 17,3079$
17	308	344,2343	$344,2343 - 326,9264 = 17,3079$
18	317	361,5422	$361,5422 - 344,2343 = 17,3079$
19	311	378,8501	$378,8501 - 361,5422 = 17,3079$
20	348	396,158	$396,158 - 378,8501 = 17,3079$

Fonte: Elaborada pelo autor.

O padrão encontrado com o processo de linearização foi 17,3079°C por hora, dessa forma foi adotado esse valor a ser incrementado pelo *firmware* a cada hora decorrida a partir do início de sua atuação.

A Figura 57 mostra o gráfico com o modelo ideal a ser embarcado no sistema inteligente após a linearização.

Figura 57 – Modelo interno do sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO INTELIGENTE PARA O SISTEMA (FIRMWARE)

Depois de obter os valores padrão e determinar as faixas de tolerância de temperatura, o próximo passo foi desenvolver o *firmware* com o objetivo de dotar o sistema microcontrolado de inteligência para conduzir de forma eficiente o processo de sinterização dos produtos cerâmicos. Os itens analisados para definição do algoritmo foram: custo computacional de execução e capacidade de executar as funções do sistema.

Os algoritmos para sistemas inteligentes podem ser desenvolvidos segundo algumas técnicas e metodologias, podendo ser implementadas isoladamente ou em conjunto para melhorar a sua eficiência em um conjunto de atividades ou tarefas. Entre elas, estão: aquisição de conhecimento, aprendizado de máquina, redes neurais, lógica fuzzy, computação evolutiva, agentes e multiagentes. (REZENDE, 2005, p. 8).

A plataforma de desenvolvimento, selecionada para compor o sistema, possui recursos computacionais limitados, dessa forma, a análise para a escolha do tipo de algoritmo deve ser minuciosa. Uma forma de reduzir o custo computacional de execução do programa é utilizar bibliotecas e carregar apenas a parte necessária do *firmware*.

Segundo Evans, Noble e Hochenbaum (2013, p. 91) uma biblioteca é uma parte de *software* que disponibiliza uma determinada função, como escrever um texto em um LCD, gravar uma informação em um cartão SD ou transmitir dados via GSM (*Global System for Mobile*). Uma biblioteca de *software* funciona da mesma forma que as bibliotecas físicas convencionais: você pega um livro e usa apenas as informações que precisa em seu trabalho de pesquisa. Seguindo essa lógica foram utilizadas várias bibliotecas no projeto, mas carregando apenas as partes necessárias do *software* de cada uma delas para reduzir o custo computacional necessário.

Durante a pesquisa, verificou-se que as técnicas de inteligência artificial que poderiam ser usadas no sistema eram os multiagentes e a lógica fuzzy. A metodologia multiagentes funcionando da seguinte forma: vários agentes monitoram as variáveis, mas apenas um agente pode agir por vez. Já a lógica fuzzy, foi utilizada devido aos seguintes fatores:

- De acordo com Simões e Shaw (2007, p. 59) a lógica fuzzy é um método capaz de expressar de uma maneira sistemática os dados e as informações imprecisas. Os controladores industriais baseados em lógica fuzzy são geralmente desenvolvidos a partir do conhecimento experimental de operadores humanos

já treinados, fazendo com que o controle seja tão bom quanto o deles, ou melhor;

- Ter encontrado uma biblioteca de lógica fuzzy para arduino.

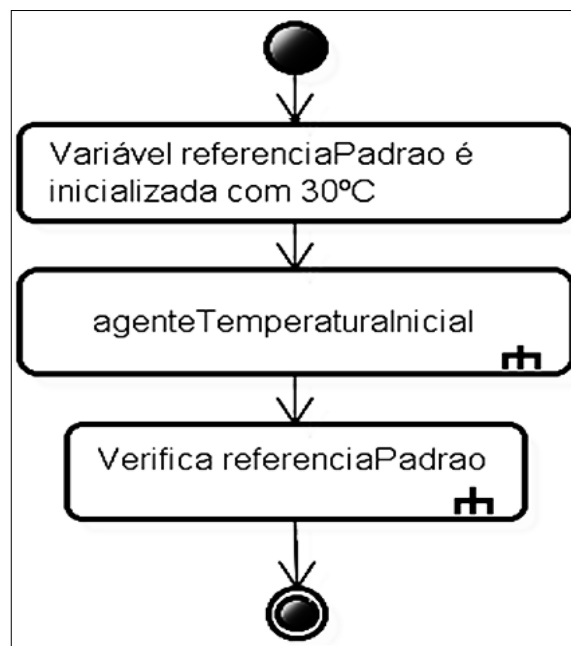
O processo de sinterização dos produtos cerâmicos é realizado de forma imprecisa e com variáveis dinâmicas, como: tipos diferentes de lenha produzindo intensidades distintas de calor, formatos diversos da lenha dificultando a mensuração da quantidade de combustível adicionada e a variação do fluxo de ar seccionado pela chaminé. Mesmo com essas variações, os funcionários conseguem trabalhar e contornar as dificuldades para conduzir o processo da melhor maneira possível, devido à experiência adquirida durante os vários anos de trabalho no setor industrial. Assim, um sistema que utiliza a lógica fuzzy pode incorporar as características de controle utilizadas por seres humanos e alcançar os mesmos resultados ou até melhores.

As técnicas de inteligência artificial, multiagentes e a lógica fuzzy, foram utilizadas em conjunto para aumentar a eficiência do sistema.

Para conhecer a temperatura no interior do forno em um dado momento os agentes tem acesso aos termopares e os módulos Max31855K.

O início da atuação do sistema microcontrolado inteligente pode ser visto na Figura 58.

Figura 58 – Início do sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

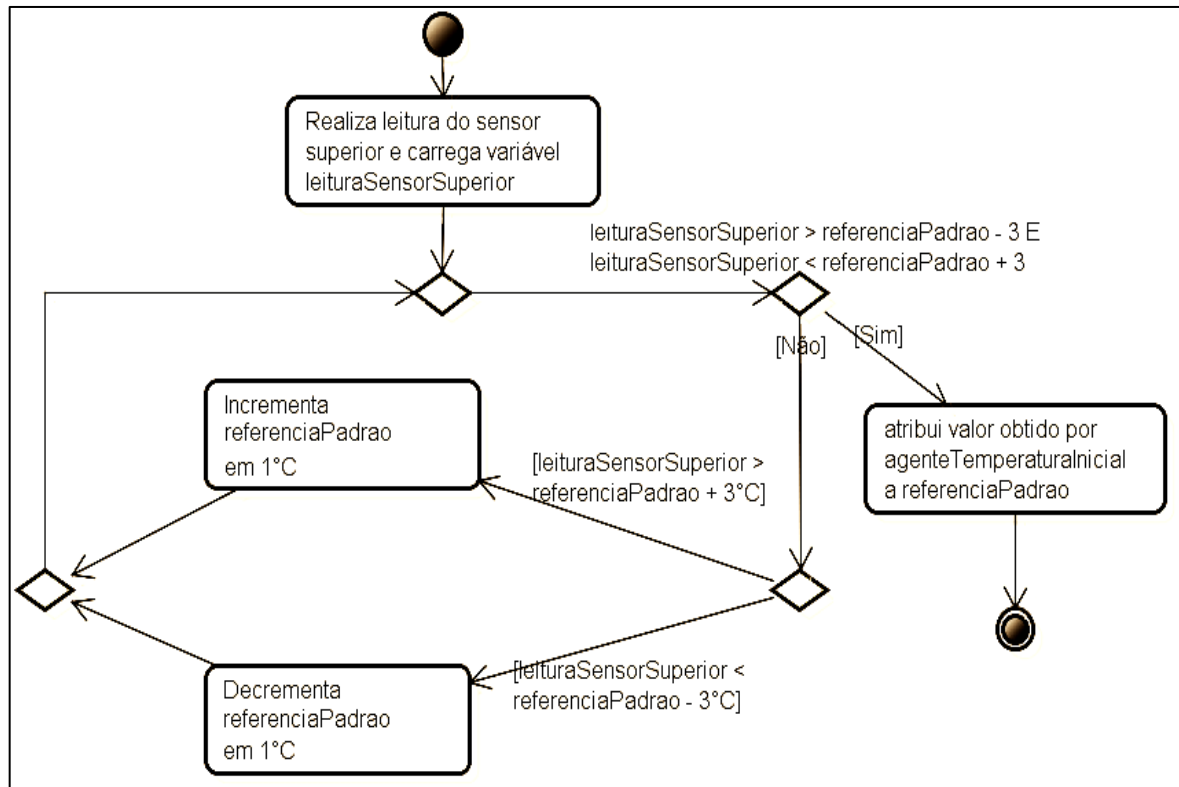
4.4.1 Agente temperatura inicial

O primeiro valor da temperatura definido como padrão é 30°C. Esse valor foi adotado, porque é o valor médio encontrado durante as manhãs na microempresa selecionada para a pesquisa. Todo processo de sinterização é geralmente iniciado pela manhã. Devido às telhas possuírem muita umidade, é necessário inserir combustível em pequenas quantidades. Se o combustível for inserido em grande quantidade ou rápido demais a água evapora bruscamente, formando espaços vazios no formato de bolhas, ou até, a quebra das telhas. Assim, começando o processo no início do dia, é possível, um maior controle da temperatura.

Após obter o valor padrão o `agenteTemperaturaInicial` faz a leitura do sensor superior, instalado no forno, e estabelece uma tolerância de $\pm 3^\circ\text{C}$ e compara com o valor da viável `referenciaPadrao`. Se o valor padrão for menor que o valor informado pelo sensor superior, o agente adiciona 1°C ao valor padrão e repete o procedimento. Se o valor padrão for maior que o valor informado pelo sensor o agente subtrai 1°C e repete o procedimento. O `agenteTemperaturaInicial` executa essa rotina até o valor padrão ser igual ao valor real, considerando as tolerâncias.

Quando o agente encontra um valor padrão próximo ao valor real, ele atribui esse valor a `referenciaPadrao` e estabelece o ponto de partida para a construção do conjunto de valores de temperatura considerados ideais em função do tempo, com o objetivo de obter o máximo de telhas de primeira qualidade. Dessa forma, o equipamento pode ser desligado e ligado novamente a qualquer momento do processo de sinterização, que o `agenteTemperaturaInicial` encontra o melhor valor da temperatura para ser utilizado como `referênciaPadrão`, com base em seu modelo interno, e disponibiliza essa informação para os outros agentes. A atuação do `agenteTemperaturaInicial` é ilustrado na Figura 59.

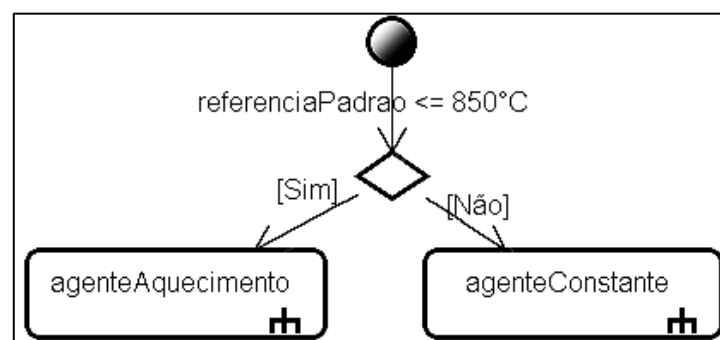
Figura 59 – Atuação do agenteTemperaturaInicial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Se a temperatura padrão for menor ou igual a 850°C o agenteAquecimento entra em atuação, se não, o agenteConstante assume o processo. Esse teste pode ser visto na Figura 60.

Figura 60 – Condicional para a atuação dos agentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.2 Agente aquecimento

O agenteAquecimento monitora a temperatura padrão e os valores da temperatura fornecidos pelos sensores, superior e inferior. Se a temperatura padrão for inferior a 850°C, faixa de aquecimento ou esquentar, o agente entra em execução.

Após verificar a temperatura padrão, o `agenteAquecimento` faz a leitura do sensor superior, estabelece uma tolerância de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ e verifica se a temperatura medida pelo sensor está compatível com o valor ideal para aquele instante. O valor da temperatura padrão mais 10°C é classificada como `referenciaPadraoSuperior`. Já o valor da temperatura padrão menos 10°C é classificada como `referenciaPadraoInferior`.

Se a temperatura superior estiver dentro dos limites desejáveis o agente estabelece nível baixo para as saídas digitais que acionam os dois conjuntos de LEDs de alto brilho, verdes e vermelhos. Após essa ação, a sirene é acionada por um segundo para chamar a atenção dos funcionários e informar que está tudo bem, que a condução do processo esta correta, essa verificação é realizada de três em três minutos.

Em nível computacional, o `agenteAquecimento` é responsável pela maioria das decisões na fase de aquecimento ou esquento. Para torná-lo mais eficiente, existem outros agentes funcionando dentro dele e assumindo funções especializadas, entre eles estão: o `agenteGravadorTemperatura`, o `agenteFuzzyCombustivel` e o `agenteFuzzyExaustao`. A atuação desses agentes é descrito a seguir.

O `agenteGravadorTemperatura` utiliza os *hardwares* dos módulos de tempo real DS1307 e cartão SD para gravar as seguintes informações: dia do mês, mês, ano, hora, minutos, segundos, dia da semana e os valores da temperatura coletados pelos sensores. Ele monitora o comportamento do processo e grava os dados periodicamente a cada três minutos, se o `agenteAquecimento` considerar que está tudo normal, ou a qualquer momento se for encontrado alguma anomalia.

Seguindo a análise da sinterização, se a temperatura na parte superior do forno começar a reduzir e ultrapassar o limite da `referenciaPadraoInferior` o `agenteAquecimento` aciona a sirene, acende os LEDs verdes e imprime no LCD que deve ser adicionado combustível nas câmaras de combustão.

Após transmitir a informação de forma sonora, luminosa e textual o `agenteFuzzyCombustivel` faz a leitura do valor que esta armazenado na variável `temperaturaPadrao` e do sensor superior (`leituraSensorSuperior`), em função da diferença de temperatura entre os valores das variáveis. Ele informa a quantidade de combustível necessária para a temperatura real se aproximar ou se igualar a `referenciaPadrao`.

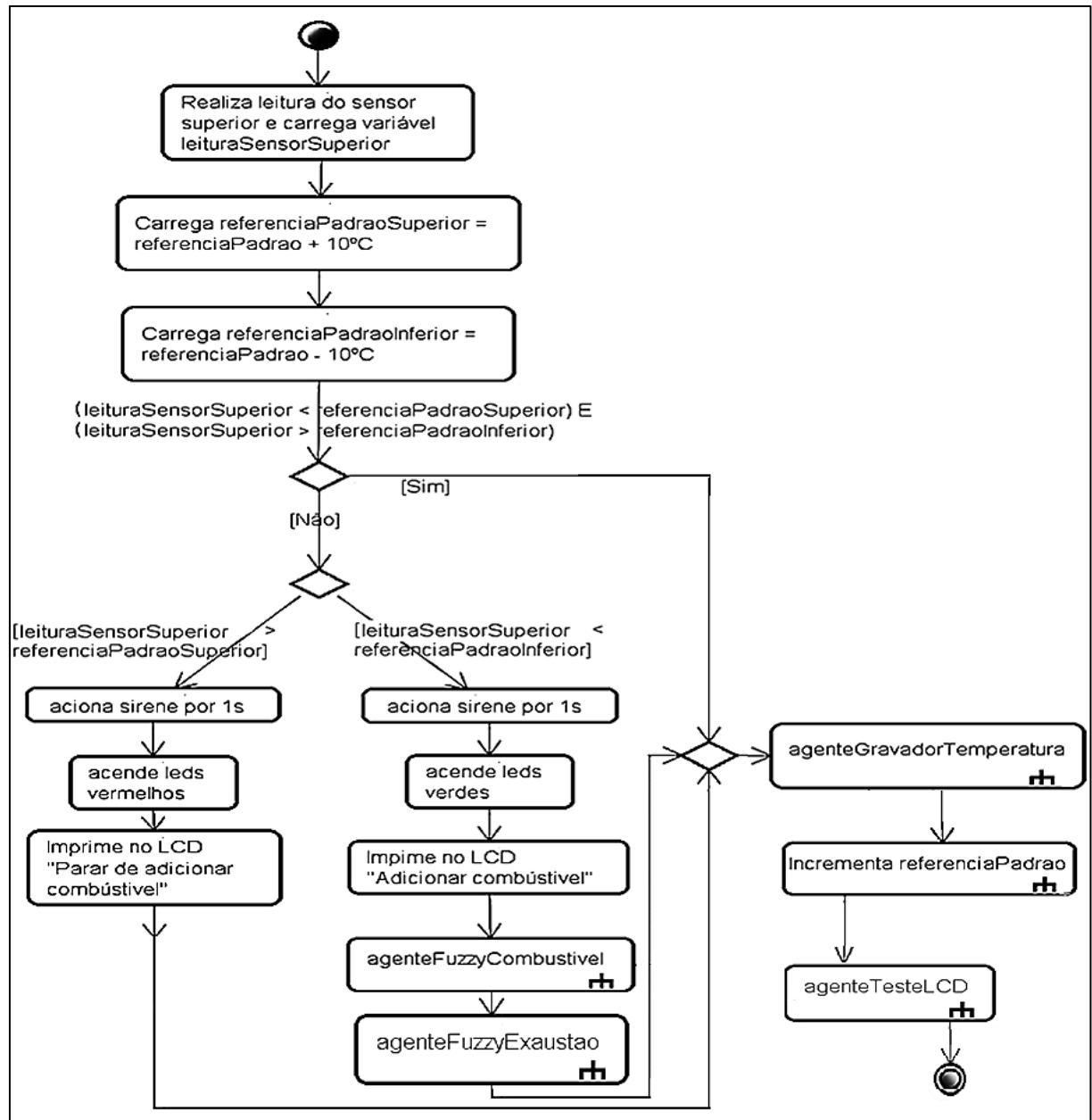
O outro caso é se a temperatura começar a aumentar e ultrapassar o limite da `referenciaPadraoSuperior`. Então, a sirene e os LEDs vermelhos serão acionados e impresso no LCD que os funcionários devem parar de adicionar combustível.

Quando a temperatura na parte superior do forno se aproximar ou se igualar a `referenciaPadrao`, o próximo passo é fazer com que o calor se desloque para a parte inferior do forno, tornando o processo isotérmico e sinterizando de maneira uniforme as telhas. Para fazer isso, o `agenteFuzzyExaustao` faz a leitura dos sensores, superior e inferior, e com base na diferença de temperatura entre eles o agente informa a porcentagem de abertura da válvula do canal de exaustão, que segue para o chaminé.

Depois de resolver os problemas da diferença de temperatura entre a real e a padrão, e os sensores, o *firmware* incrementa um determinado valor a variável `referenciaPadrao`, para que a curva de queima possa prosseguir em função do tempo. O valor atribuído depende do estudo realizado no forno e encontrar a condução ideal para o processo.

Por meio da análise dos processos de sinterização foi identificado que a temperatura no interior do forno deve ter um aumento de 17°C a cada hora. Para isso, o sistema microcontrolado inteligente adiciona 0,85°C a cada três minutos durante a fase de aquecimento ou esquentar. As ações do agente podem ser visualizadas na Figura 61.

Figura 61 – Atuação do agenteAquecimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os funcionamentos dos agentes agenteFuzzyCombustivel e agenteFuzzyExaustao são expostos a seguir.

4.4.3 Agente Fuzzy Combustível

Para o funcionamento do agenteFuzzyCombustivel foi usada uma biblioteca de lógica fuzzy para a plataforma arduino. Como resultado da pesquisa foi encontrada a eFLL (*Embedded Fuzzy Logic Library*) desenvolvida pelo *Robotic Research Group* (RRG) na Universidade Estadual do Piauí (UESPI-Teresina). (SOFTWARE LIVRE BRASIL, 2014)

A eFLL é capaz de auxiliar no desenvolvimento de sistemas fuzzy para serem empregados em plataformas de *hardware* embarcados tornando a sua criação mais rápida e intuitiva. A biblioteca demonstra ser leve o bastante para ser executada em microcontroladores com recursos computacionais limitados. (KRIDI et al., 2014)

Escrita em C e C++, a eFLL usa a biblioteca padrão da linguagem C, `stdlib.h`, dessa forma ela pode ser destinada ao Arduino. A princípio, a mesma não apresenta limitações de quantidade de entradas, saídas, conjuntos e regras fuzzy. As restrições estão vinculadas a capacidade de processamento e memória do microcontrolador adotado. A biblioteca usa o processo: **MAX-MIN** para a inferência e composição e **Centro de Área** para a desfuzzyficação. (SOFTWARE LIVRE BRASIL, 2014)

Os *links* para as páginas com o acesso ao *download* da biblioteca eFLL, informações sobre autores e coautores e a licença para o uso da biblioteca eFLL estão disponíveis no Software Livre Brasil (2014). O *download* da biblioteca eFLL também pode ser feito diretamente na página da GitHub (2015): **Zerokol/eFLL**.

Para o agenteFuzzyCombustivel ter a capacidade de informar a quantidade de combustível necessária para aproximar a temperatura superior da `referenciaPadrao` foi necessário um controlador fuzzy.

Durante o período de pesquisa *in loco* foi inserida a quantidade máxima de lenha na câmara de combustão do forno, representando a adição de 100% de combustível, para conhecermos a capacidade máxima de produção de calor, conforme a Figura 62. Com esse experimento chegou-se ao valor de 180°C e com ele foram estabelecidas as variáveis linguísticas de entrada para representar a diferença entre a temperatura superior e a `referenciaPadrao`. Para abranger possíveis variações do processo como diferentes tipos de lenha, produzindo quantidades distintas de calor, foi adotado uma amplitude de 0°C a 300°C.

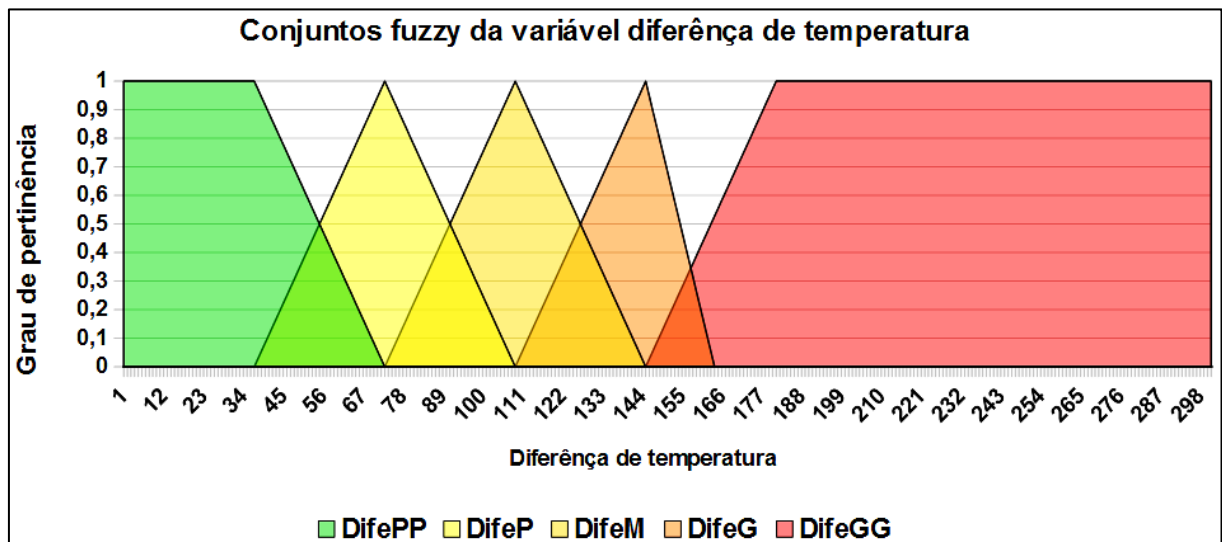
Figura 62 – Câmara de combustão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os termos linguísticos utilizados foram **DifePP**(0, 0, 36, 72); **DifeP**(36, 72, 108); **DifeM**(72, 108, 144); **DifeG**(108, 144, 163) e **DifeGG**(144, 180, 300, 300). A Figura 63 exibe as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy.

Figura 63 – Funções de pertinência da diferença de temperatura entre a referenciaPadrão e leituraSensorSuperior.

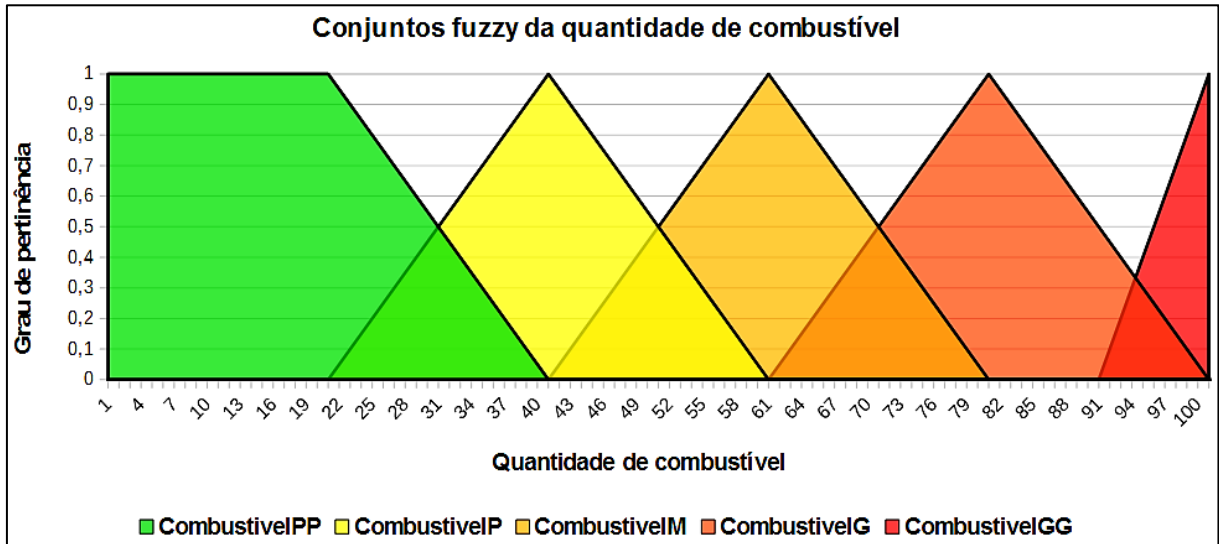


Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

As variáveis de saída foram definidas em função da quantidade de combustível que deveria ser inserida na câmara de combustão. Elas foram denominadas de **CombustivelPP**(0, 0, 20, 40); **CombustivelP**(20, 40, 60); **CombustivelM**(40, 60, 80);

CombustivelG(60, 80, 100) e **CombustivelGG**(90, 100, 100). A Figura 64 mostra as suas funções de pertinência.

Figura 64 – Funções de pertinência da quantidade de combustível .



Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

Para o funcionamento do controlador fuzzy foi elaborada uma base de regras a partir dos dados experimentais coletados nos processos de sinterização e entrevistas com os funcionários para absorver o máximo de suas experiências. Essas informações tornaram o `agenteFuzzyCombustivel` capaz de indicar corretamente as ações a serem realizadas.

A base de regras foi formada de acordo com a seguinte estrutura: **SE** <premissa> **ENTÃO** <conclusão>. Para o controlador, foram definidas 5 regras. Cada regra com uma entrada e uma saída com o intuito de tornar o processamento dos dados o mais rápido possível com o mínimo de recurso computacional. O conjunto de regras é o apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Base de regras do `agenteFuzzyCombustivel`.

Regras	Premissa	Conclusão
1.	SE <diferençaTemperatura é DifePP>	ENTÃO <combustivel é CombustivelPP>
2.	SE <diferençaTemperatura é DifeP>	ENTÃO <combustivel é CombustivelP>
3.	SE <diferençaTemperatura é DifeM>	ENTÃO <combustivel é CombustivelM>
4.	SE <diferençaTemperatura é DifeG>	ENTÃO <combustivel é CombustivelG>
5.	SE <diferençaTemperatura é DifeGG>	ENTÃO <combustivel é CombustivelGG>

Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima etapa é a atribuição do valor da variável de entrada, referente à diferença entre a `referenciaPadrao` e a `leituraSensorSuperior`, a um ou mais graus de pertinência em relação aos conjuntos fuzzy da variável diferença de temperatura.

Em seguida vem o processo de inferência. Neste instante, são associadas às possíveis combinações entre as pertinências e os conjuntos ativados pela variável e seus correspondentes conjuntos de saída. O módulo de inferência do sistema fuzzy irá associar os conjuntos de entrada aos conjuntos correspondentes de saída, sempre embasado nas regras da base de regras. (KRIDI et al., 2015)

Após a inferência decidir qual o grau de pertinência que os conjuntos de saída foram acionados, é inicializado o processo de defuzzificação. Nesta etapa, é encontrado o valor preciso referente ao grau de pertinência de um determinado conjunto ou associação deles. (KRIDI et al., 2015)

Dessa maneira a quantidade de combustível a ser adicionada pode ser informada pelo sistema microcontrolado inteligente para o monitoramento do processo de sinterização. A Figura 65 mostra a câmara de combustão do forno da microempresa de cerâmica vermelha com uma escala em uma de suas laterais para que os funcionários possam adicionar a quantidade correta de combustível, no caso lenha.

Figura 65 – Câmara de combustão.

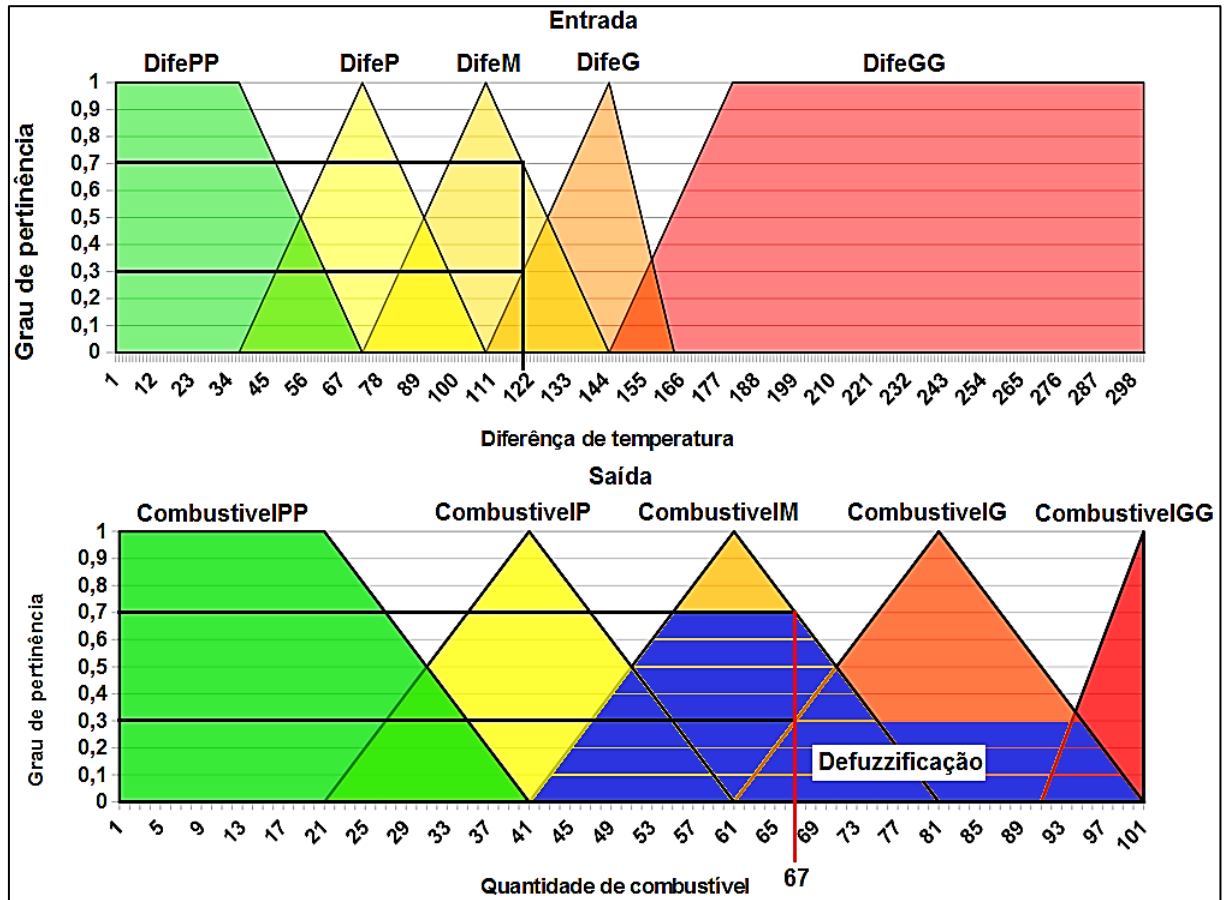


Fonte: Elaborada pelo autor.

Existem vários métodos de defuzzificação na literatura, mas o utilizado pelo `agenteFuzzyCombustivel` é o centro de gravidade devido o uso da biblioteca eFLL.

O processo de fuzzificação versus cálculo do grau de pertinência realizado pelo controlador fuzzy do `agenteFuzzyCombustivel` é ilustrado na Figura 66.

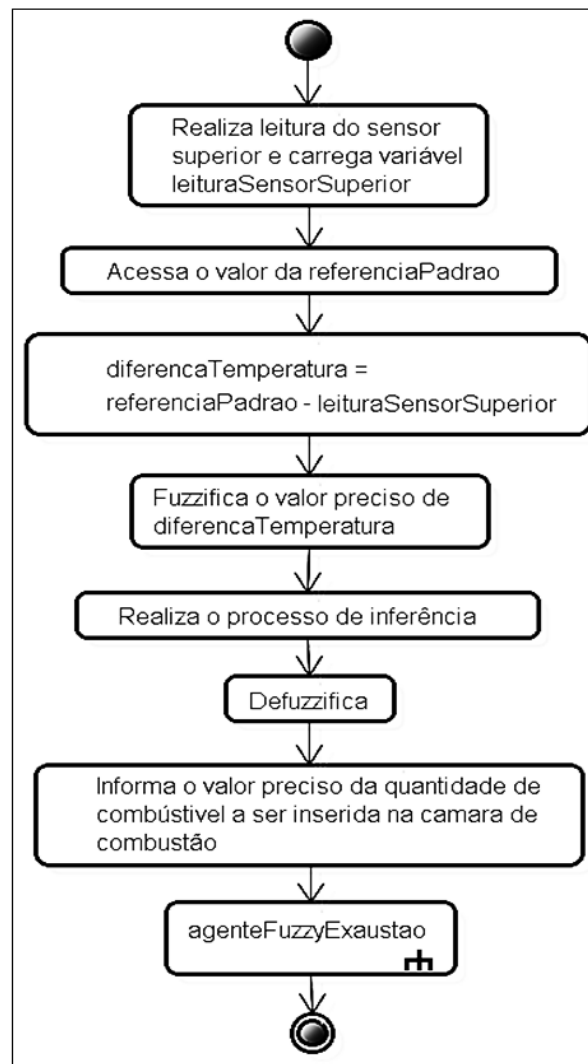
Figura 66 –Controlador fuzzy do agenteFuzzyCombustivel.



Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

O funcionamento do agente agenteFuzzyCombustivel pode ser visualizado na Figura 67.

Figura 67 – Simulação do agenteFuzzyCombustivel.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.4 Agente Fuzzy Exaustão

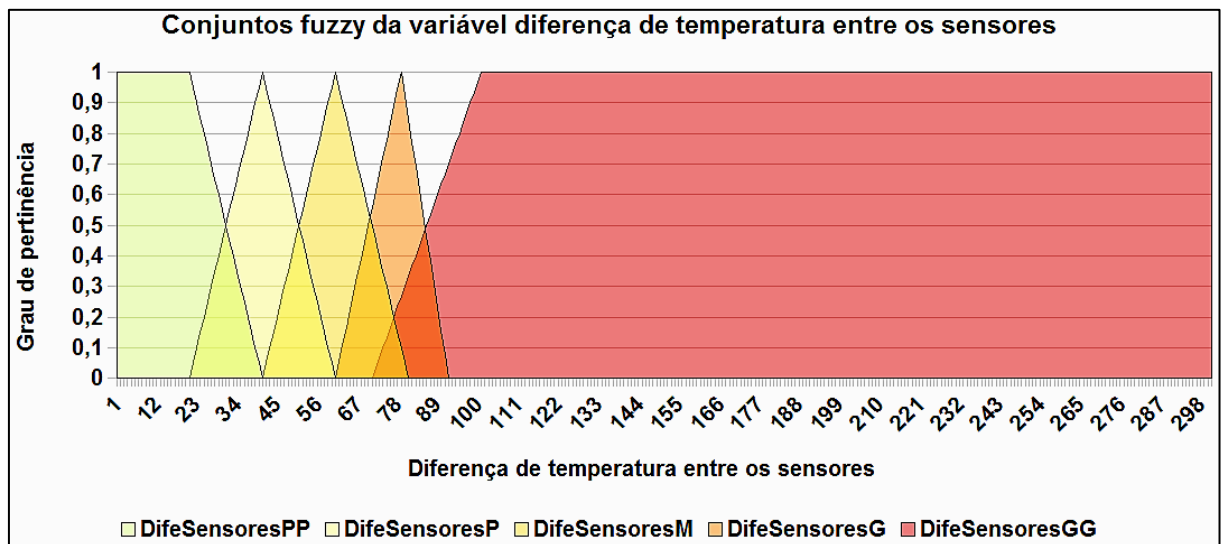
Também foi usado um controlador fuzzy no agenteFuzzyExaustao, dessa forma, foi concedido a ele a capacidade de informar a porcentagem de abertura da válvula do canal de exaustão, em função da diferença de temperatura entre os sensores, com o objetivo de deslocar o calor da parte superior para a inferior do forno obtendo uma sinterização mais uniforme dos produtos cerâmicos.

Para obter as informações, durante um processo de queima a válvula de exaustão foi fechada completamente, esta ação proporcionou uma diferença de temperatura entre as partes, superior e inferior, de aproximadamente 100°C. À medida que a válvula era gradativamente aberta as temperaturas começavam a se aproximar de uma forma

proporcional. Essas informações foram usadas como base para a criação das variáveis linguísticas de entrada, cada varável esta relacionada a um conjunto de valores referentes à diferença de temperatura entre os sensores, superior e inferior. Para alcançar um maior número de valores e compensar possíveis variações foi empregado um domínio ou *range* de 0°C a 300°C.

As variáveis linguísticas aplicadas para representar os conjuntos fuzzy de entrada foram **DifeSensoresPP**(0, 0, 20, 40), **DifeSensoresP**(20, 40, 60), **DifeSensoresM**(40, 60, 80), **DifeSensoresG**(60, 78, 91) e **DifeSensoresGG**(70, 100, 300, 300). A Figura 68 mostra as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy.

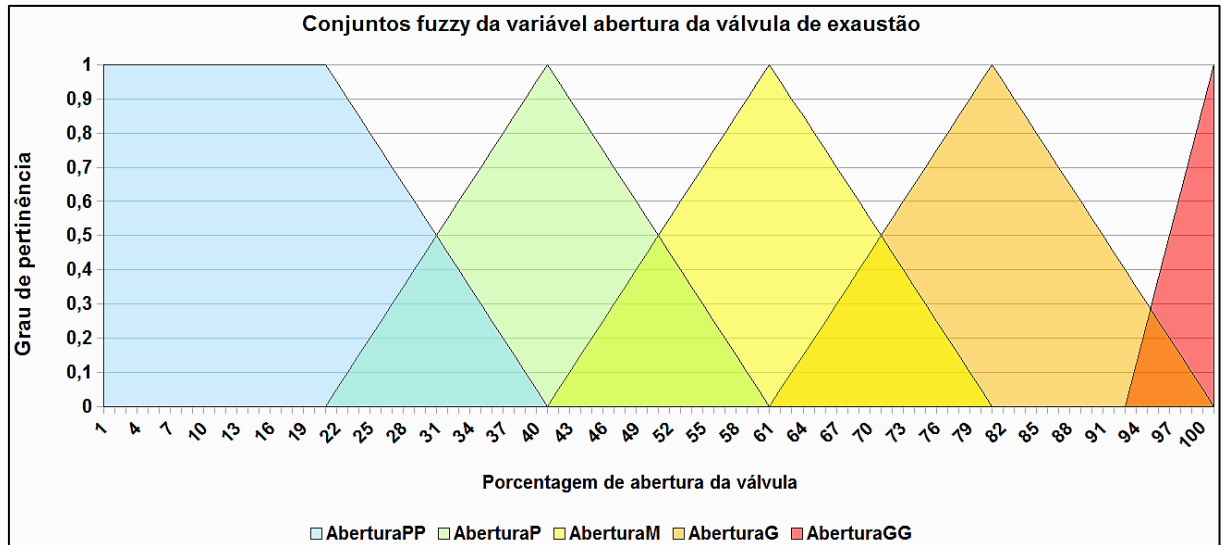
Figura 68 – Funções de pertinência da diferença de temperatura entre os sensores.



Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

As variáveis de saída foram definidas em função da porcentagem de abertura da válvula de exaustão. Elas foram definidas como **AberturaPP**(0, 0, 20, 40), **AberturaP**(20, 40, 60), **AberturaM**(40, 60, 80), **AberturaG**(60, 80, 100) e **AberturaGG**(92, 100, 100, 100). A Figura 69 mostra as suas funções de pertinência.

Figura 69 – Funções de pertinência da abertura da válvula do canal de exaustão.



Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

A base de regras do `agenteFuzzyExaustao` também foi construída empregando informações extraídas de dados empíricos e da experiência dos funcionários da microempresa.

A base de conhecimento é formada por 5 regras. Cada regra com uma entrada e uma saída. O conjunto de regras é o apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Base de regras do `agenteFuzzyExaustao`.

Regras	Premissa	Conclusão
1.	SE <diferençaTemperaturaSensores é DifeSensoresPP>	ENTÃO <aberturaValvula é AberturaPP>
2.	SE <diferençaTemperaturaSensores é DifeSensoresP>	ENTÃO <aberturaValvula é AberturaP>
3.	SE < diferençaTemperaturaSensores é DifeSensoresM>	ENTÃO <aberturaValvula é AberturaM>
4.	SE < diferençaTemperaturaSensores é DifeSensoresG>	ENTÃO <aberturaValvula é AberturaG>
5.	SE < diferençaTemperaturaSensores é DifeSensoresGG>	ENTÃO <aberturaValvula é AberturaGG>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na fuzzificação dos valores das variáveis de entrada, o valor preciso da diferença entre as temperaturas dos sensores é atribuído a um ou mais graus de pertinência em relação aos conjuntos fuzzy. Durante a inferência são atribuídas as possíveis combinações entre as pertinências e os conjuntos ativados pela variável e seus correspondentes conjuntos de saída. (KRIDI et al., 2015)

Para finalizar o processo é realizada a defuzzificação disponibilizando o valor preciso da porcentagem de abertura da válvula do canal de exaustão. A Figura 70 mostra o sistema indicando a porcentagem de abertura do canal e a Figura 71 mostra uma chapa

metálica dotada de uma alça na parte superior para a abertura da mesma com a uma escala graduada que constitui a válvula do canal de exaustão.

Figura 70 – Indicação do sistema microcontrolado inteligente de baixo custo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

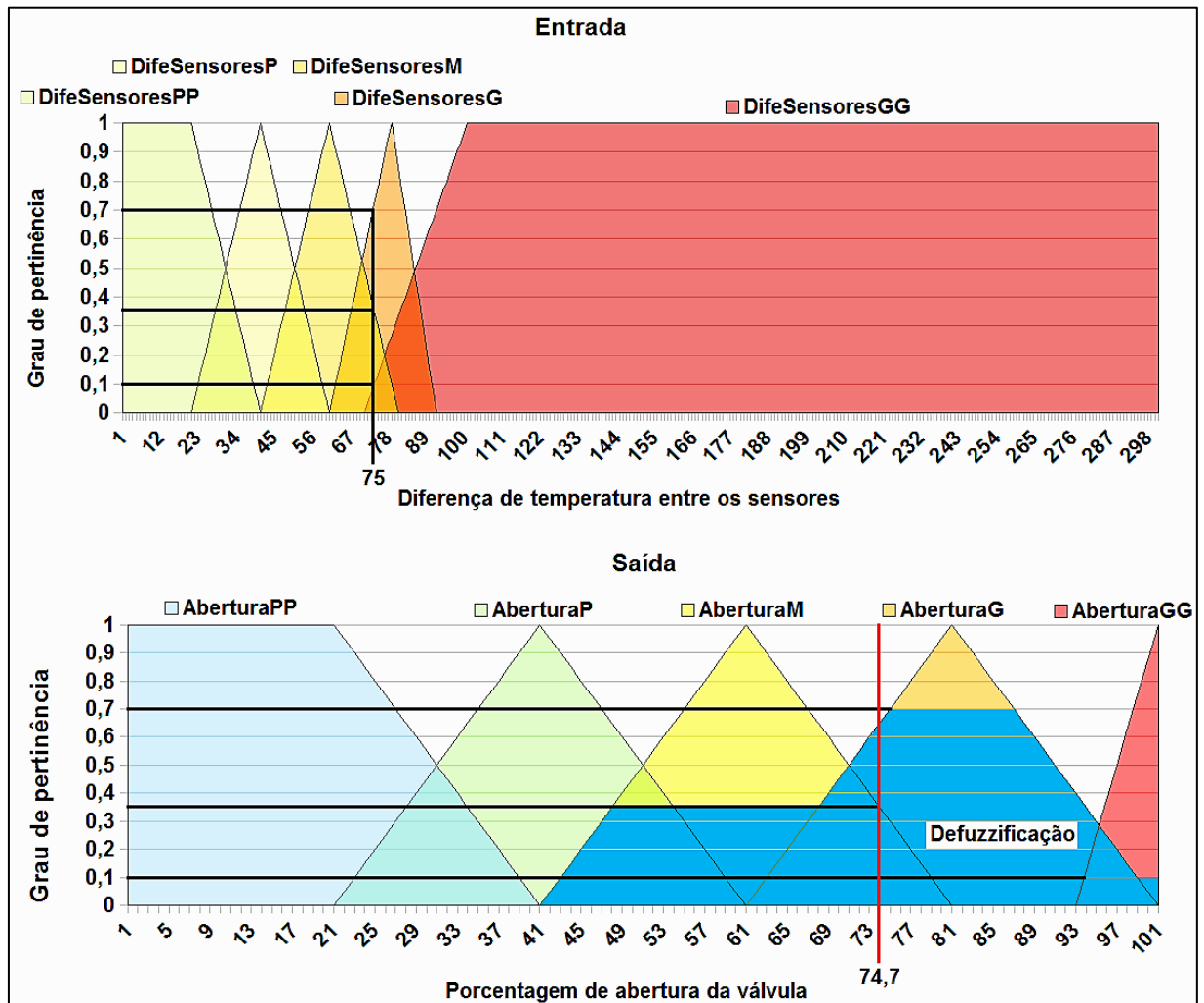
Figura 71 – Válvula do canal de exaustão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo de fuzzificação versus cálculo do grau de pertinência realizado pelo controlador fuzzy do agenteFuzzyExaustao pode ser visto na Figura 72.

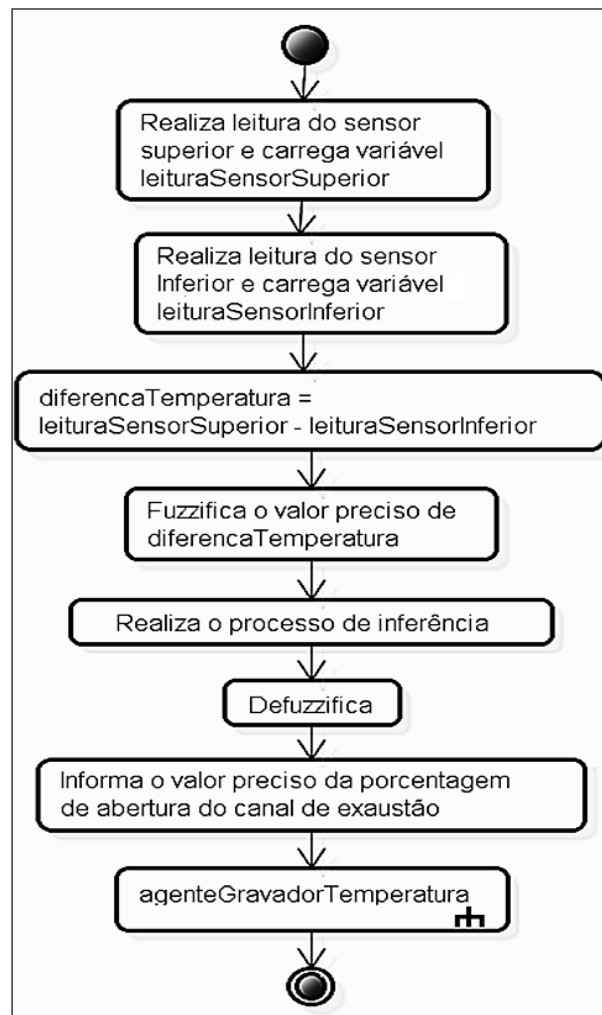
Figura 72 – Controlador fuzzy do agenteFuzzyExaustao.



Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

A execução do agenteFuzzyExaustao é ilustrada na Figura 73.

Figura 73 – Atuação do agenteFuzzyExaustao.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.5 Agente constante

A atuação do agenteConstante é muito semelhante ao do agenteAquecimento, mas com algumas particularidades. Ele também monitora a referenciaPadrao e os valores de temperatura fornecidos pelos sensores superior e inferior. Se a temperatura padrão for superior a 850°C, faixa de sinterização ou queima, o agente passa a indicar as tomadas de decisão.

Após certificar-se da referenciaPadrao, ele faz a leitura do sensor superior e estabelece uma tolerância de +40°C e -10°C. O valor da referenciaPadrao mais +40°C é classificada como referenciaPadraoSuperior. Para a referenciaPadraoInferior é adotada a referenciaPadrao menos 10°C.

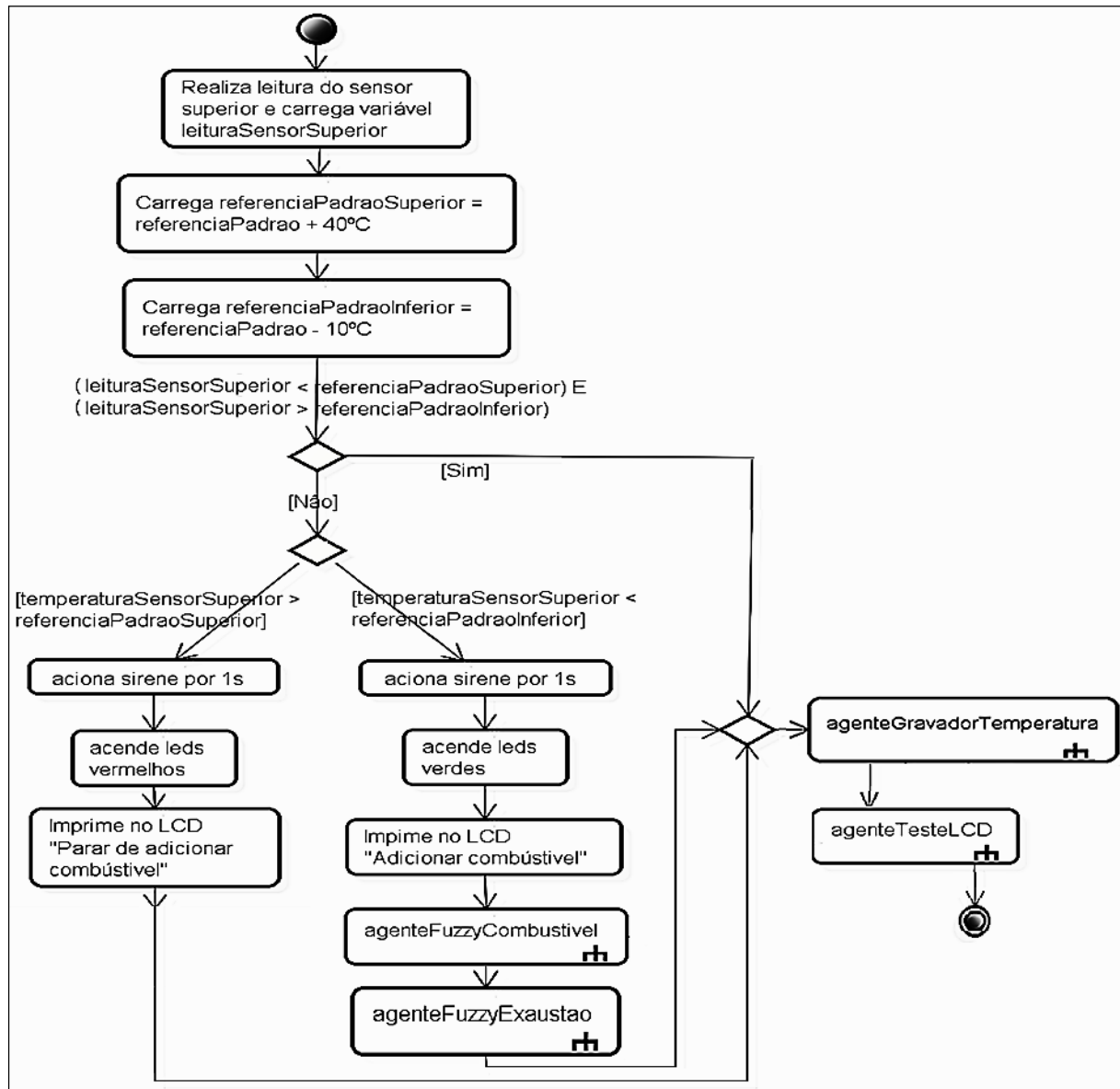
Se a temperatura superior estiver dentro dos limites desejáveis o agente estabelece nível baixo para as saídas digitais que acionam os LEDs, verdes e vermelhos, e aciona a sirene por um segundo para informar aos funcionários que a condução do processo está correta.

Para manter a mesma eficiência do agenteAquecimento, o agenteConstante também utiliza os agentes: agenteGravadorTemperatura, agenteFuzzyCombustivel e o agenteFuzzyExaustao.

Analizando o processo de sinterização, se for verificado que a temperatura na parte superior do forno está reduzindo e ultrapassar o limite da referenciaPadraoInferior o agenteConstante aciona a sirene, acende os LEDs verdes e imprime no LCD que deve ser adicionado combustível. Nesse momento, o agenteFuzzyCombustivel informa a quantidade de combustível que deve ser inserida para a correção do problema.

Caso a temperatura exceda o limite da referenciaPadraoSuperior. A sirene e os LEDs vermelhos serão acionados e impresso no LCD que os funcionários devem parar de adicionar combustível. Depois desse procedimento o agenteFuzzyExaustao determina a porcentagem de abertura da válvula de exaustão. A atuação do agenteConstante pode ser visualizado na Figura 74.

Figura 74 – Atuação do agenteConstante.

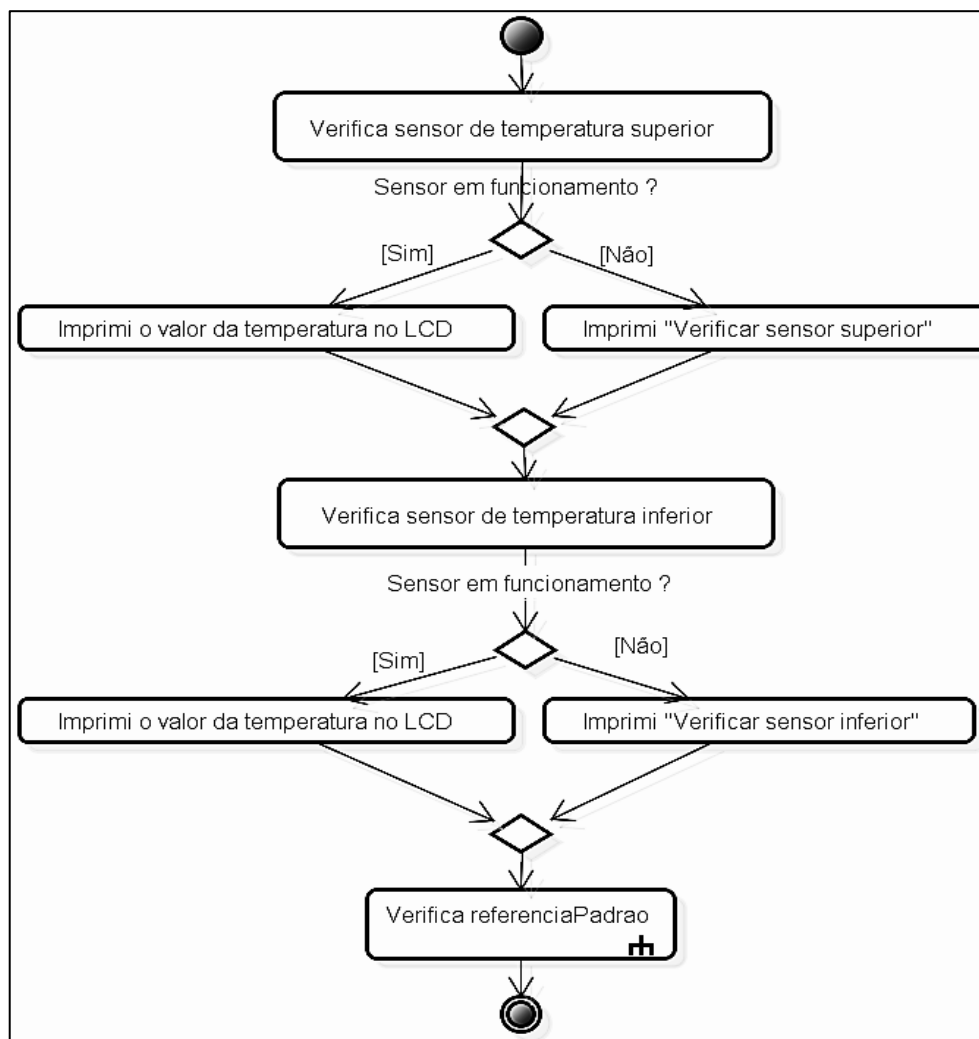


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.6 Inspeção do sistema

Após a atuação dos agentes, agenteAquecimento e agenteConstante, o agenteTesteLcd fica informando os valores da temperatura nas partes, superior e inferior, do forno e testando a integridade dos sensores e cabos de ligação durante os três minutos necessários para o incremento ou adição de 0,85°C no valor da variável referenciaPadrao, para dar prosseguimento a curva de sinterização ou queima. Essa metodologia treina os funcionários e os avisam de possíveis falhas. A Figura 75 mostra a atuação do agente agenteTesteLcd.

Figura 75 – Atuação do agenteTesteLcd.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para inspecionar o funcionamento do conjunto formado pelos sensores, cabos de ligação e módulos MAX31855K o sistema microcontrolado inteligente possui valores de referência para comparar com os valores fornecidos pelos componentes.

Ao término da atuação do agenteTesteLcd o *firmware* chega ao final de sua execução, mas como na plataforma arduino o programa funciona em um *loop*, o *firmware* é redirecionado para a análise da *referenciaPadrao*, conforme a figura 58, para dar continuidade a sua atividade, seguindo de onde parou no gráfico da curva de queima do processo de sinterização.

4.4.7 Forno para simulação

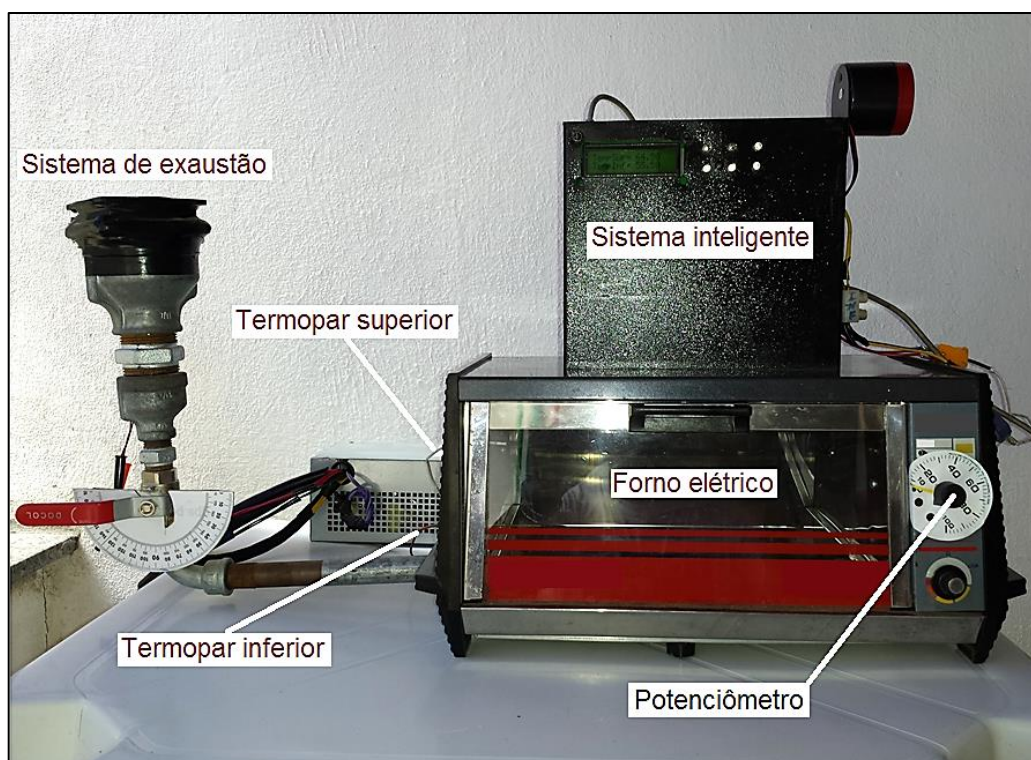
Para testar o sistema microcontrolado inteligente de baixo custo foi utilizado um forno elétrico modificado, de forma que ele pudesse reproduzir de uma maneira semelhante o funcionamento do forno da microempresa de cerâmica vermelha. Para isso, as resistências elétricas que convertem energia elétrica em calor foram instaladas na parte superior do forno.

Para simular a adição de combustível e sua quantidade, foi instalado um sistema eletrônico de controle (potenciômetro) para variar a potência elétrica disponibilizada as resistências e um sistema de exaustão completo, com: canal de exaustão, válvula de abertura do canal com escala graduada e um exaustor para simular o deslocamento do calor da parte superior para a inferior.

O tempo necessário para a realização de um processo de sinterização de telhas de cerâmica vermelha e conhecer o seu resultado é de aproximadamente nove dias, sendo: dois dias para encher o forno com as telhas, três dias para sinterizar e quatro dias para resfriar, tornando possível a sua retirada.

O uso do forno para a simulação do sistema microcontrolado inteligente foi fundamental. Com ele foi possível identificar alguns problemas e fazer as devidas correções no *firmware*. A Figura 76 mostra o forno elétrico modificado.

Figura 76 – Forno elétrico para simulação dos sistemas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante o funcionamento no simulador, foram calculados os intervalos de atuação dos agentes, para não ultrapassar o tempo de incremento da temperatura no gráfico, no caso três minutos. Existia uma concorrência entre os agentes, proporcionando respostas inadequadas para o dado momento, para resolver esse conflito foram adicionados testes de execução para cada um deles. Depois de solucionar vários problemas o sistema passou a funcionar normalmente.

O sistema foi novamente instalado no forno elétrico para testar o seu funcionamento por um período prolongado. Quando, considerava-se que estava tudo pronto, surgiu um imprevisto, o *firmware* do sistema parava de funcionar depois de algum tempo, entre duas e três horas. Como o arduino possui recursos limitados, a primeira hipótese foi que a sua memória não suportava a execução do programa por um longo período. Então, surgiram as seguintes questões: a placa deveria ser substituída por uma com maior capacidade computacional? O sistema iria coletar os dados e eles seriam enviados a um computador para o processamento? Deveria ser desenvolvido algum sistema de banco de dados?

A solução para o problema foi mais simples, depois de pesquisar sobre os comandos em linguagem C para o arduino, foi encontrado o *return*, segundo Arduino (2015) o comando *return* termina a função que esta sendo executada e retorna o(s) valor(es) para a função de chamada.

A função que executa o procedimento principal do sistema microcontrolado inteligente é a *void loop()*, inserindo o *return* no seu final, o comando encerra o programa, liberando a memória do microcontrolador, e retorna todos os valores armazenados nas variáveis. Dessa forma, foi possível utilizar a placa arduino por tempo indeterminado.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Durante o trabalho de pesquisa foram realizadas visitas *in loco* para coletar dados sobre os processos de sinterização, realizados sem a utilização do sistema. Eles eram efetuados segundo a experiência dos funcionários com base na observação da cor das telhas no interior do forno, através de pequenas janelas nas partes superior e inferior das portas do forno. Essa metodologia expõe os funcionários a uma grande quantidade de calor e a inalação de fumaça, conforme as Figura 77 e 78.

Figura 77 – Janela do forno.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 78 – Emissão de fumaça através da janela do forno.



Fonte: Elaborada pelo autor.

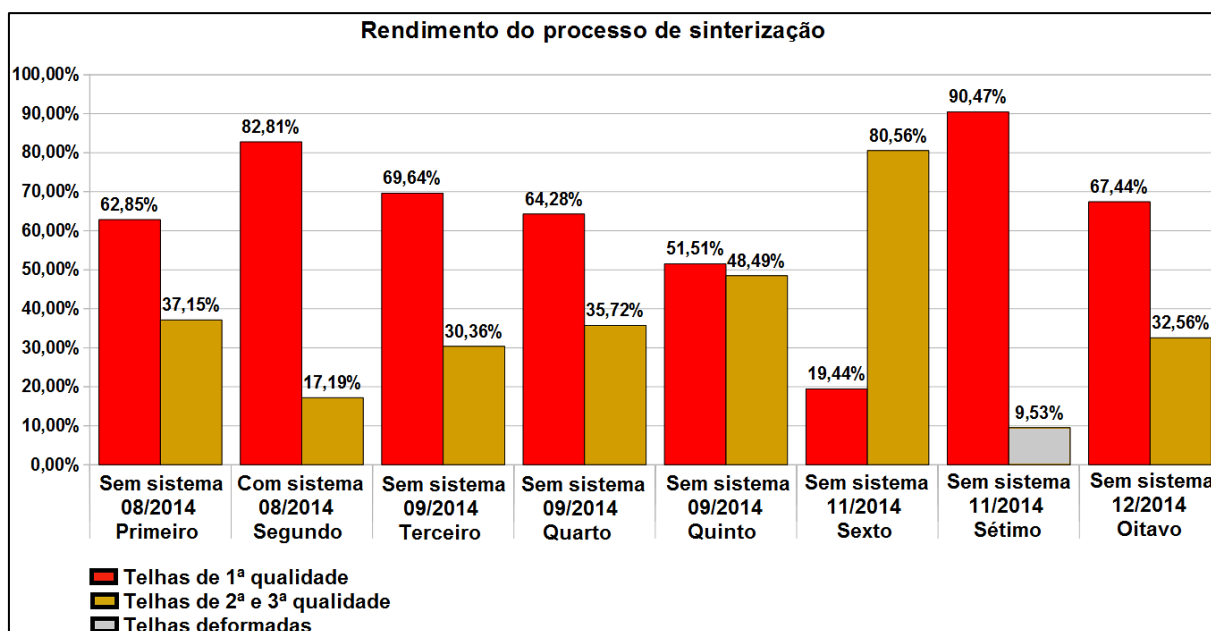
As informações coletadas conforme esse critério geram incerteza, o que reflete nos resultados da sinterização dos produtos cerâmicos, proporcionando uma produção irregular e muitas vezes com baixo rendimento. O lucro do ceramista está relacionado à quantidade de telhas de 1ª qualidade produzida em cada processo, se esse número é

relativamente pequeno a sua produção em vez de lucro proporciona prejuízo e o endividamento do empresário junto aos seus fornecedores.

O sistema foi instalado no forno da cerâmica e logo se identificou um benefício. A redução do índice de insalubridade devido a não ser mais necessário olhar a cor do interior do forno para tentar identificar a intensidade da temperatura. O processo foi iniciado e conduzido conciliando informações literárias com a experiência dos funcionários. O resultado obtido com o Sistema Microcontrolado para Medição de Temperatura (SMMT) proporcionou uma sinterização com a produção de 82,81% de telhas com primeira qualidade, essa informação pode ser vista no registro do segundo processo no gráfico da Figura 77.

Durante o primeiro teste foram coletadas informações para o melhoramento do sistema e desenvolvimento do *firmware* inteligente. Em seguida o SMMT foi retirado do forno para se analisar o rendimento dos próximos processos sem o sistema. Através do gráfico da Figura 79 foi realizada uma análise comparativa entre os processos de sinterização com o SMMT e sem o mesmo.

Figura 79 – Porcentagem de telhas de 1ª qualidade.



Fonte: Elaborada pelo autor no LibreOffice Calc.

Ao longo das sinterizações seguintes os funcionários tentaram alcançar o rendimento proporcionado pelo SMMT, mas sem êxito. O supervisor da empresa, decepcionado com as perdas, recomendou que adicionasse mais combustível nas câmaras de combustão para tentar aumentar a quantidade de telhas de primeira qualidade. Com essa atitude o número de telhas de primeira qualidade aumentou, conforme registrado no sétimo processo do gráfico da Figura 79, mas surgiu outro problema. Milhares de telhas se

deformaram devido ao excesso de calor. As telhas de segunda e terceira qualidade podem ser comercializadas, mesmo com valor inferior ao das telhas de primeira, mas telhas deformadas não. Esse tipo de produto é destinado ao descarte, aumentando a geração de resíduos. Com isso, o supervisor aconselhou que, sem o sistema, os funcionários poderiam voltar a trabalhar como antes. A Figura 80 mostra as telhas deformadas.

Figura 80 – Telhas deformadas.

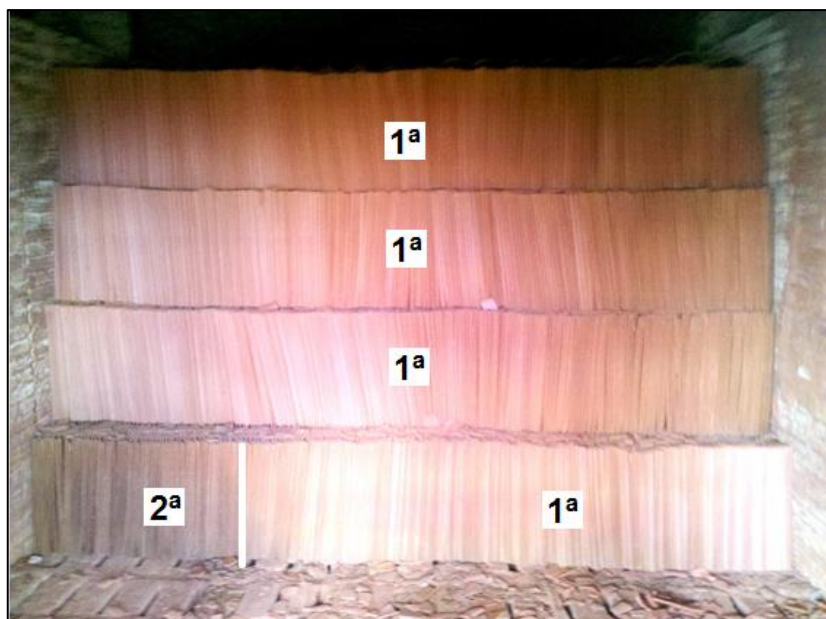


Fonte: Elaborada pelo autor.

O *firmware* com o modelo interno (curva de queima ideal), os multiagentes e a lógica fuzzy, foi embarcado no sistema e o mesmo instalado no forno. A atuação do sistema microcontrolado inteligente foi inspecionada, durante a sinterização, e observado que ele conseguia tomar as decisões de forma correta, tentando conduzir o processo seguindo a função linear dos valores da temperatura em função do tempo. O sistema analisava o processo e fornecia informações necessárias para a tomada de decisão, o que antes não existia. A maneira de raciocinar do equipamento acontecia de forma semelhante a dos funcionários, mas devido ao seu modelo interno elaborado segundo processos anteriores e as informações precisas disponibilizadas pelos sensores, ele conseguia detectar previamente a necessidade de atuação dos funcionários.

No primeiro teste do sistema microcontrolado inteligente de baixo custo, os funcionários ofereceram certa resistência a seguir todas as indicações do sistema, mas aceitaram conduzir a sinterização da seguinte forma, em uma extremidade do forno eles adotavam as indicações do sistema e na outra eles trabalhavam como estavam habituados. O resultado pode ser visto nas Figuras 81 e 82.

Figura 81 – Extremidade do forno com o sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

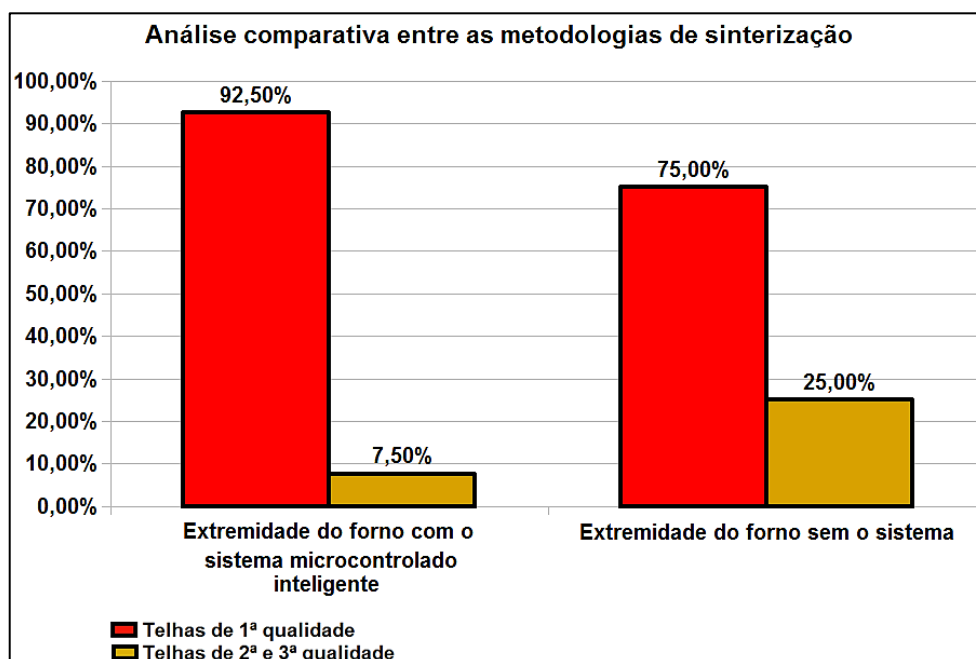
Figura 82 – Extremidade do forno sem o sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados podem ser analisados no gráfico da Figura 83.

Figura 83 – Análise comparativa das metodologias.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o teste, o equipamento foi retirado para a realização de algumas correções no *firmware*, referente ao *agenteConstante*, para tentar aumentar a sua eficiência. Quando o agente entrava em execução ele indicava o que deveria ser feito para corrigir o problema e persistia em sua indicação, ficando preso em um loop até os funcionários atenderem o seu pedido.

Depois de realizar as correções o sistema foi instalado novamente no forno. Na sinterização seguinte, os funcionários se comprometeram a seguir s mais as indicações do equipamento. O resultado foi um sucesso, o processo atingiu um rendimento de 93,97% de telhas de primeira qualidade. As Figuras 84 e 85 mostram o início e o final do forno.

Figura 84 – Início do forno com o sistema microcontrolado inteligente e funcionários atingindo 100% de telhas de 1ª qualidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

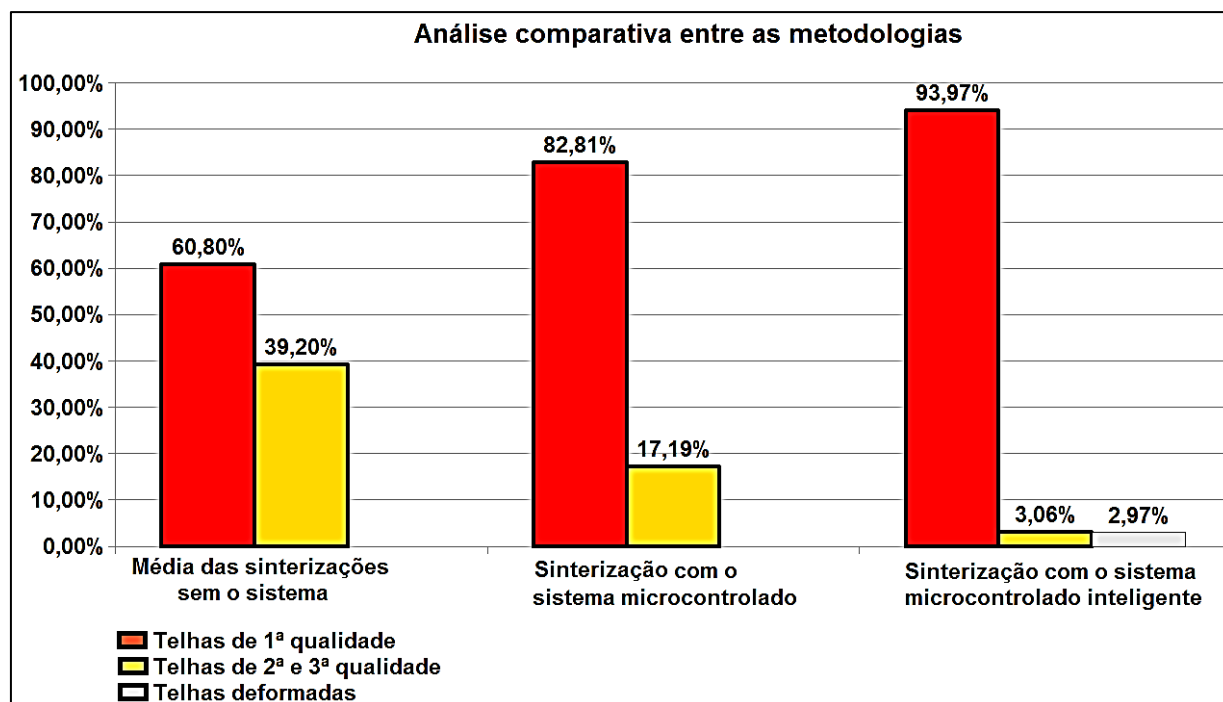
Figura 85 – Final do forno com o sistema microcontrolado inteligente e funcionários atingindo 87,94% de telhas de 1ª qualidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para fazer uma análise comparativa entre as metodologias utilizadas nos processos de sinterização dos produtos cerâmicos, a Figura 86 mostra uma média dos resultados obtidos com as quantidades de telhas de primeira qualidade, segunda e terceira qualidade e telhas deformadas sem o uso do sistema, ou seja, realizados apenas com o conhecimento dos funcionários, e com o uso dos sistemas microcontrolado e microcontrolado inteligente.

Figura 86 – Análise comparativa entre os processos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inteligência artificial ou computacional desperta nas pessoas a curiosidade e fascínio de ter as suas habilidades e conhecimentos transferidos a uma máquina ou equipamento. O que antes era apenas metal e plástico agora possui características retiradas de seus desenvolvedores. Dessa forma, os sistemas inteligentes podem receber informações imprecisas e até contraditórias e raciocinar de forma semelhante a um ser humano para solucionar problemas, tornando os processos produtivos industriais mais eficazes e eficientes.

O segmento industrial abordado neste trabalho de pesquisa é de cerâmica vermelha. Este setor contribui de forma significativa com o avanço socioeconômico do país. Mas parte de suas microempresas passam por dificuldades, devido à falta de recursos financeiros e mão de obra especializada. Nelas, o processo produtivo ainda é realizado com tecnologia limitada, proporcionando grandes perdas, resíduos e produtos com baixo valor agregado. Por estes motivos, foi desenvolvido um sistema microcontrolado inteligente de baixo custo para atender o principal processo produtivo deste setor, que é a sinterização de seus produtos.

A inteligência computacional do sistema lhe dá a competência de analisar o processo de sinterização ou queima e tomar decisões de forma autônoma de acordo com a execução de seu *firmware* e estrutura física. O feito realizado automatizou o raciocínio de pessoas com experiência acumulada em vários anos de trabalho em fornos de empresas e microempresas de cerâmica vermelha.

O principal objetivo do sistema é melhorar a qualidade dos produtos cerâmicos, através da comunicação com os funcionários responsáveis pela sinterização, informando as ações necessárias para a obtenção do máximo de produtos cerâmicos de 1ª qualidade.

No início da pesquisa foi realizado um levantamento sobre trabalhos relacionados com o estudo proposto, para se identificar quais as contribuições que o sistema microcontrolado inteligente poderia fornecer.

A próxima fase foi selecionar a empresa para participar do projeto, alguns proprietários e administradores foram entrevistados com o objetivo de descobrir se havia motivação para buscar a utilização de novos recursos para o aprimoramento do seu processo produtivo. Depois, de serem esclarecidos sobre os riscos envolvidos durante os testes. Alguns empresários demonstraram receio em participar, mas com a exposição das possíveis vantagens, aumento produtivo e lucratividade, uma microempresa se mostrou disposta a aceitar.

O passo seguinte foi conhecer o funcionamento do forno, o processo de sinterização, conjuntos de *hardwares* e sensores que suportassem as altas temperaturas envolvidas no processo.

Durante a pesquisa do *hardware*, a plataforma que se mostrava mais adequada era a arduino, em função do seu baixo custo e a disponibilidade de placas genéricas com circuitos eletrônicos para o controle das grandezas elétricas. Mas surgiu um problema, as placas arduino não possuíam resolução suficiente para realizar a leitura direta dos sensores selecionados, no caso os termopares. O sinal emitido pelos sensores possuía uma intensidade baixa, não era linear e sofria interferência com a variação da temperatura ambiente ao longo do dia. Dessa forma, pesquisou-se um circuito integrado que pudesse transpor essas dificuldades. A solução encontrada foi à utilização do módulo *nanoshield thermocouple* tipo K da Circuitar Eletrônicos com o CI Max31855K fabricado pela *Maxim Semiconductor*.

A versão inicial do sistema foi denominada SMMT, montada e submetida ao primeiro teste. Os termopares, do SMMT e de um sistema de medição padrão, foram inseridos em uma estufa, com capacidade de aquecimento de até 200°C, um ao lado do outro, de forma que a diferença de temperatura entre os sensores fosse desprezível. Considerando as tolerâncias do sistema padrão e dos termopares, a primeira versão do sistema microcontrolado inteligente, demonstrou estar pronta para monitorar a temperatura de forma correta.

Para melhorar o rendimento da primeira versão do sistema, o mesmo recebeu uma calibração indireta através de uma técnica matemática chamada de regressão linear simples, que possibilitou uma maior aproximação dos valores reais.

O SMMT foi instalado no forno da microempresa selecionada. Com o sistema foi possível traçar um perfil térmico, que possibilitou uma produção de 82,76% de telhas de 1ª qualidade. O resultado foi considerado excelente, com as informações era possível repetir o rendimento em sinterizações futuras, se o modelo elaborado pelo sistema fosse seguido.

Mas o modelo obtido com o SMMT possuía alguns problemas de eficiência energética. Os valores que o constituíam estavam dispersos, o que caracterizava redução e aumento de calor no interior do forno de forma irregular. Antes de incorporar o modelo interno do perfil térmico ao *firmware*, os valores da temperatura foram linearizados para aumentar o seu rendimento e facilitar a sua reprodução.

Para proporcionar ao sistema a sua capacidade cognitiva, várias técnicas de inteligência artificial foram analisadas para tornar o sistema inteligente, ou seja, torná-lo capaz de coletar os dados dos sensores, processar e indicar as melhores ações a serem realizadas pelos funcionários. Mas, como a placa arduino selecionada para compor o sistema

possuía recursos limitados, os itens analisados para definição das técnicas a serem usadas no algoritmo foram: custo computacional necessário e capacidade de exercer as funções do sistema.

Uma forma de reduzir o custo computacional foi utilizar bibliotecas e pesquisar uma maneira de executar o *firmware* por ciclo.

Durante a pesquisa, verificou-se que as técnicas de inteligência artificial que poderiam ser utilizadas no sistema eram os multiagentes e a lógica fuzzy. As duas técnicas foram utilizadas em conjunto para aumentar a eficiência.

Após a fase de desenvolvimento do *firmware* e uso das bibliotecas, o programa inteligente foi embarcado no microcontrolador. O sistema microcontrolado inteligente antes de ser instalado no forno da cerâmica passou por um período de testes no forno elétrico montado para simulações.

Após a realização de algumas correções o sistema foi instalado no forno da microempresa cerâmica para ser testado e avaliado através dos resultados obtidos. Os testes foram realizados de forma supervisionada para a verificação de sua eficiência.

Na condução do processo de sinterização, o sistema microcontrolado inteligente monitorou e forneceu informações aos funcionários sobre o que fazer, como: adicionar combustível, a sua quantidade, parar de adicionar combustível e a porcentagem de abertura da válvula do canal de exaustão. Essas informações foram transmitidas da forma mais simples possível, através sinalizadores visuais (LEDs), sonoros (sirene elétrica) e comunicação textual (LCD), devido à falta de mão de obra especializada. Essa forma de comunicação proporcionou mais um benefício, que foi a redução do índice de insalubridade devido, não ser mais necessário olhar a cor do interior do forno para tentar identificar a intensidade da temperatura.

Como resultado final deste trabalho de pesquisa, temos um sistema microcontrolado inteligente, de baixo custo, para o monitoramento da temperatura e indicação para controle de um processo de fabricação de produtos cerâmicos que proporciona um rendimento de 93,97% no processo de sinterização. Segundo a definição dos tipos de agentes de Russell e Norvig (2010, p. 46, tradução nossa), o sistema, em seu todo, pode ser classificado como um agente baseado em objetivo, porque ele possui um estado interno, conhecimento a respeito de seus objetivos, para decidir qual ação deve ser executada e tem a capacidade de combinar as informações do resultado de suas ações e verificar se elas atingem os seus objetivos.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros esperam-se:

- Instalar um módulo GSM (*Global System for Mobile*) na placa Arduino Mega2560 para acompanhar o processo de sinterização nos fornos das indústrias de cerâmica vermelha em tempo real, por meio de um computador ou smartphone;
- Utilizar várias placas arduino com microcontrolador, em vez uma única, para processar os dados e transmitir as informações de forma paralela;
- Usar mais LCDs para visualizar um maior número de informações ao mesmo tempo;
- Estudar a possibilidade de aplicar a mesma metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema microcontrolado inteligente em outras áreas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAFRUIT. **A thermocouple is a kind of temperature sensor**. 2014. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/thermocouple/overview>>. Acesso em: 03 maio 2014.

ADAFRUIT. **Using a Thermocouple**: Arduino Library. Published on 2012-07-29 at 03.58.38 PM. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/thermocouple/using-a-thermocouple>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

ALCIATORE, David G.; HISTAND, Michael B.. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições**. 4. ed. Porto Alegre - RS: AMGH EDITORA LTDA, 2014.

ALUTAL CONTROLES INDUSTRIAIS (Brasil). **Termopar Metálico - inox 310**. Disponível em: <<http://www.alutal.com.br/ceramica/br/produtoDetalhe/termopar-metalico-inox-310#tabs-1=&tabs=2>>. Acesso em: 25 nov. 2014.

ANDRADE, Michelle; JACQUES, Maria Alice Prudêncio. ESTUDO COMPARATIVO DE CONTROLADORES DE MAMDANI E SUGENO PARA CONTROLE DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES ISOLADAS. **XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2008. Disponível em: <http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/Mamdani_e_Sugeno.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

ARAÚJO, Ícaro Bezerra Queiroz de et al. **Desenvolvimento de um protótipo de automação predial/residencial utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica arduino**. Cobenge: XL Congreço Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém - PA, p.1-9, 2012.

ARAUJO, Marcos Antônio de. **Administração de produção e operações**: Uma abordagem prática. Rio de Janeiro-RJ: Brasport Livros e Multimídia Ltda, 2009. 391 p.

ARDUINO. **Arduino**. 2013. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 05 dez. 2013.

ARDUINO. **Arduino Mega 2560**. 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 05 fev. 2015.

ARDUINO. **LiquidCrystal - "Hello World!"**. 2014. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Tutorial/LiquidCrystal>>. Acesso em: 08 dez. 2014.

ARDUINO. **Return**. 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Reference/Return>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

ARTERO, Almir Olivette. **Inteligência artificial teórica e prática**. São Paulo: Livraria da Física, 2008. 230 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABC (Brasil) (Org.). **Informações Técnicas**: Definição e Classificação. 2013. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4&submenu=46>>. Acesso em: 30 nov. 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER (Brasil). **Dados Oficiais**. Fonte: IBGE 2008 para Seção C, Divisão 23, Grupo 234, Classe 2342-7, Fabricação de Produtos Cerâmicos Não-Refratários para Uso Estrutural na Construção, excluídas as palavras pisos e azulejos da razão social. Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br/setor/dados-oficiais/>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 385 p.

BALTZAN, Paige; PHILLIPS, Amy. **Sistemas de Informação**. Brasil: Mcgraw Hill Brasil, 2012. 384 p.

BASTOS, Frederico Assis. **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TELHAS E BLOCOS CERÂMICOS VISANDO A CERTIFICAÇÃO DO PRODUTO**. 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86480/191985.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 09 dez. 2013.

BEGA, Egídio Alberto et al (Org.). **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. 668 p.

BELA VISTA TIJOLOS (Itaporanga - Sc) (Org.). **Processos de produção**. 2014. Disponível em: <<http://www.belavistatijolos.com.br/processo.html>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

BOLTON, W. **Mecatrônica - Uma Abordagem Multidisciplinar**. 4. ed. Brasil: Bookman, 2010. 664 p.

CALDEIRA, André Machado et al. **Inteligência Computacional Aplicada À Administração , Economia e Engenharia em Matlab**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 370 p.

CASA DA CERÂMICA (Russas - Ce) (Ed.). **Cortador para telha**. Disponível em: <http://www.metalcasadaceramica.com.br/detalhes_produto.php?codPro=23>. Acesso em: 14 nov. 2014.

CERÂMICA MILENIUM - TELHAS E TIJOLOS (Tocantins) (Org.). **Tecnologia e modernidade na industrialização de produtos cerâmicos**. 2014. Disponível em: <<http://ceramicamilenium.com/fabricacao.htm>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

CERÂMICA MUNDIAL (Brasil) (Org.). **TELHA COLONIAL ESTRUSADA COM TRAVA**. Disponível em: <http://www.ceramicamundialltda.com.br/telha_colonial_marombada.htm>. Acesso em: 16 nov. 2014.

CERÂMICA VERMELHA: Estudos de mercado SEBRAE/ESPM 2008. Brasil: Série Mercado, mar. 2008. Disponível em: <[http://201.2.114.147/bds/bds.nsf/C5B4284E12896289832574C1004E55DA/\\$File/NT00038DAA.pdf](http://201.2.114.147/bds/bds.nsf/C5B4284E12896289832574C1004E55DA/$File/NT00038DAA.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2014.

CIRCUITAR ELETRÔNICOS. **Thermocouple**. 2013. Disponível em: <<https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/thermocouple/>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

CONTROL Y ROBÓTICA (Org.). **SENSORES**. 2012. Disponível em: <<http://jaimeruedayvuelvearodar.blogspot.com.br/2012/06/sensores.html>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

EVANS, Martin; NOBLE, Joshua; HOCHENBAUM, Jordan. **Arduino em Ação**. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2013.

FAILE JUNIOR, Ron et al. **LibreOffice Guia de Iniciação**. Lisboa: ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, 2014.

FARIA, Lucas Teles de. **Sistema Inteligente Híbrido Intercomunicativo para Detecção de Perdas Comerciais**. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus da Ilha Solteira, Ilha Solteira - Sp, 2012. Cap. 3. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/2012_diss_lucas_t eles.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2013.

FARIAS, Salete et al. UTILIZAÇÃO DE ECO-INOVAÇÃO NO PROCESSO DE MANUFATURA DE CERÂMICA VERMELHA. **Rai - Revista de Administração e Inovação**, São Paulo, v. 9, n. 3, p.154-174, jul./set. 2012. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=97323719008>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

FIEMG, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais -; FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente -. **GUIA TÉCNICO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**. Belo Horizonte: A, 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENT AIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2015.

FERRAMENTAS PC (Org.). **Arduino - Linha Completa**. Disponível em: <<http://www.ferramentaspc.com.br/2013/10/o-que-e-o-arduino.html>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

FLOYD, Thomas. **Sistemas Digitais: Fundamentos e Aplicações**. 9. ed. Porto Alegre - RS: Artmed Editora S.a., Bookman Companhia Editora, 2007.

FONSECA, E. G. P.; VEJA, A. S. **Tutorial sobre Introdução a Projetos Utilizando o Kit de Desenvolvimento Arduino**. Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Cobenge. Blumenau: FURB, 2011. 7 p.

FONSECA, Erika G. P. da; LAVEGA, Alexandre S. de. **TUTORIAL SOBRE INTRODUÇÃO A PROJETOS UTILIZANDO O KIT DE DESENVOLVIMENTO ARDUINO**. 2011. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2011/sessoestec/art1677.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2013.

GEOGEBRA. **O que é o GeoGebra.** 2015. Disponível em: <<https://www.geogebra.org/about>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

GELENSKI - MÁQUINAS PARA CERÂMICA (Brasil) (Ed.). **Máquinas para cerâmica.** Disponível em: <<http://www.gelenski.com.br/Gelenski-Maquinas/galeria/maquinas/foto-2.jpg>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

GITHUB. **Adafruit/Adafruit-MAX31855-library:** Library for the Adafruit Thermocouple breakout with MAX31855K <http://www.adafruit.com/products/269>. Tdicola authored on 8 Aug 2014. Disponível em: <<https://github.com/adafruit/Adafruit-MAX31855-library>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

GITHUB. **Zerokol/eFLL:** eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library) is a standard library for Embedded Systems. Zerokol authored on 16 May 2014. Disponível em: <<https://github.com/zerokol/eFLL>>. Acesso em: 24 jan. 2015.

INSTRUMENTACIÓN: EQUIPOS Y PRINCIPIOS (Org.). **Medidores de Temperatura Convencionales.** 2013. Disponível em: <<http://instrumentaciondinamica2013.blogspot.com.br/2013/12/medidores-de-temperatura-convencionales.html>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

IOPE. **Termopares.** Disponível em: <http://www.iope.com.br/3ia6_termopares.htm>. Acesso em: 17 fev. 2015.

ITALTERM (Brasil). **Politemp K.** Disponível em: <<http://www.italterm.com/item.php?prod=10>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

JOBSTRAIBIZER, Flávia. **Desvendando as redes sem fio.** São Paulo: Digerati Books, 2010. 96 p.

J. MENDO CONSULTORIA. **Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha.** 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P23_RT32_Perfil_da_Argila.pdf/b6fc71dc-3c0a-4eb1-b2a5-df62b2c3bec0>. Acesso em: 15 fev. 2015.

KRIDI, Douglas Santiago et al. **DESENVOLVIMENTO DE UMA BIBLIOTECA FUZZY PARA O CONTROLE AUTÔNOMO DE UM ROBÔ MÓVEL EM AMBIENTE DESCONHECIDO.** Universidade Estadual do Piauí – Uespi/Laboratório de Informática Aplicada - LAIC. Disponível em: <http://api.ning.com/files/2VGrzzXedu0xdLpTzCvx7fTrjzPI1HEVNm7ud*CMOm5SSC-da9M0scEphzAJdnvGrzwiUUVjJTnQUgG4M3v5jstV*elcy**B/ArtigoBibliotecaFUZZY.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2014.

LED Alto Brilho. Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-610801229-kit-100-pecas-super-led-alto-brilho-5mm-frete-barato-_JM>. Acesso em: 10 dez. 2014.

LIBREOFFICE THE DOCUMENT FOUNDATION. **Calc.** Disponível em: <<https://pt-br.libreoffice.org/descubra/calc/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

LIMA, Charles Borges de; VILLAÇA, Marco Valério Miorim. **Avr e Arduino: Técnicas de Projeto**. 2. ed. Florianópolis: Editora dos Autores, 2012.

MAXIM INTEGRATED (United States). **MAX31855 - Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter**. 2012. Disponível em: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

MECATRÔNICA ATUAL (Brasil) (Org.). **Instrumentação Básica - Parte 1 - Medição de Temperatura**. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/959-instrumentao-bsica-parte-1-medio-de-temperatura>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

MESSIAS, Laiete Soto. **Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria de Cerâmica Estrutural**. 1996. IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira - Butantã - CEP 05508-901 - São Paulo SP. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v01n02/v1n2_5.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2015.

MICROCONTROLANDO (Comp.). **Arduino - Componente para o Proteus**. Disponível em: <<http://microcontrolandos.blogspot.com.br/2012/12/arduino-componentes-para-o-proteus.html>>. Acesso em: 01 jun. 2013.

MINIPA (Brasil). **Alicate amperímetro digital, modelo ET-3357**. 2014. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/ET-3157-3357-1103-BR.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2014.

MINIPA (Brasil). **Catálogo geral 2013/2014 2ª Edição**. 2014. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/Content/img/Catalogos/Arquivo/catalogo_2013_2014.pdf>. Acesso em: 10 maio 2014.

MONTEBELLE, Sidney José. **MICROCONTROLADOR 805**. 2014. FACENS. Disponível em: <http://alfa.facens.br/~sidney/MICROCONTROLADOR_8051.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2014.

MOREIRA, Ilo da Silva. **Comandos elétricos de sistemas pneumáticos e hidráulicos**. 2. ed. São Paulo: Senai-sp Editora, 2012.

MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JÚNIOR, Marsis. As matérias-primas cerâmicas: parte I – o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Cerâmica Industrial*, São Carlos, v.6, n.2, mar./abr., 2001. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v06n02/v6n2_4.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2013.

NATREB (Morro da Fumaça - Sc) (Ed.). **Misturador MN-2**. Disponível em: <http://www.natreb.com.br/portugues/produto.php?codigo_cat=23&codigo_lin=1>. Acesso em: 14 nov. 2014.

NOSHOK (Ed.). **Temperature Measurement: 910/915 Series Industrial RTD, Probe Type with Connection Head**. Disponível em: <http://www.noshok.com/temp_910_series_industrial.shtml>. Acesso em: 19 nov. 2014.

WENDLING, Prof. Marcelo. **Sensores**. 2010. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP, Campus de Guaratinguet. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2013.

WEBER, Leo; KLEIN, Pedro Antônio Trierweiler. **Aplicação Da Lógica Fuzzy Em Software e Hardware**. Canoas: ULBRA, 2003. 112 p.

PCE (Org.). **Transdutores**. 2012. Disponível em: <<http://www.pce-medidores.com.pt/sistemas/transdutores.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

PETRUZELLA, Frank D.. **ELETRO-TÉCNICA I Série Tekne**. Porto Alegre - RS: AMGH EDITORA LTDA, 2014. Uma parceria entre GRUPO A EDUCAÇÃO S.A. e MCGRAW-HILL EDUCATION.

PETRUZELLA, Frank D.. **Motores Elétricos e Acionamentos: Série Tekne**. Porto Alegre: AMGH, 2013. Tradução: José Lucimar do Nascimento; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior.

PIÃO, Silvano Sotelo. **Implementação de Rede Neural Artificial em FPGA Utilizando VHDL**. 2012. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012. Cap. 2. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-18042013-140836/>>. Acesso em: 01 jan. 2014.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F.. **Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha**. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v56n339/a0556339.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2013.

RAINER, R. Kelly; CEGIELSKI, Jr. Casey G. **Introdução a Sistemas de Informação – Tradução da 3ª Edição**. 3. ed. Brasil: Elsevier Brasil, 2012. 431 p. Tradução de John Wiley & Sons, Inc.

REGIONAL - DIÁRIO DO NORDESTE (Brasil) (Ed.). **Russas produz 70% da telha colonial do NE**. 2012. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/russas-produz-70-da-telha-colonial-do-ne-1.521588>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

REINALDO FILHO, Lucídio Leitão; BEZERRA, Francisco Diniz. **INFORME SETORIAL CERÂMICA VERMELHA**. Brasil: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - Etene, 2010. Banco do Nordeste do Brasil S/A. Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/documents/88765/89729/ano4_n21_informe_setorial_ceramica_vermelha.pdf/66eb35dc-dd49-420d-a921-26e9efc320d9>. Acesso em: 17 fev. 2015.

REVISTADA FIEC: **Inovação é essencial para o Brasil conquistar mercados**. Estado do Ceará: Sistema Federação das Indústrias do Estado do Ceará, n. 27, ago. 2009. Disponível em: <http://www.sfiec.org.br/portaLv2/sites/revista/home.php?st=maisnoticias&conteudo_id=36920&start_date=2009-08-29>. Acesso em: 16 nov. 2014.

REZENDE, Sergio Machado. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

REZENDE, Solange Oliveira (Brasil). **Sistemas inteligentes fundamentos e aplicações**. Barueri - Sp: Manole, 2005. 525 p.

RIBEIRO COMÉRCIO E REPRESENTAÇÕES LTDA (Curitiba) (Org.). **Indicador de Temperatura**. Disponível em: <<http://www.ribeirorepresentacoes.com/produtos.php?cod=52>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

ROMIO, Cristiane; LORSCHETER, Thiago Aguirre; SILVA, Isaac Newton Lima. CALIBRAÇÃO DE UM TERMOPAR TIPO K PARA SER UTILIZADO EM UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS COM O ARDUINO. **Tchê Química**, Porto Alegre, v. 9, n. 17, p.60-66, 2012. Semestral. Disponível em: <<http://www.deboni.he.com.br/Periodico17.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2014.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence A Modern Approach Third Edition**. 13. ed. New Jersey, United States: Pearson Prentice Hall, 2010. 1151 p.

SANTANA, Mário Alberto de. **Laboratório de iluminação: LED - O que é, e como funciona**. Disponível em: <<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/led/dica36.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2014.

SANTOS, Gabriel Mann Dos. Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha. 2001. 113 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SCHULER, Charles. **Eletrônica II**. 7. ed. Nacional: Bookman, 2013. 346 p.

SEBRAE (Brasil) (Org.). **Cerâmica vermelha**. 2013. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/setor/ceramica-vermelha>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

SILVA, Ivan Nunes da et al. **Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas – Curso Prático**. São Paulo: Artliber, 2010. 399 p.

SILVA NETO, João Cirilo da. **Metrologia e Controle Dimensional: Conceitos, Normas e Aplicações**. Brasil: Campus, 2012.

SILVA, Vanderlei Alves Santos da. **Hardware e Software**. Brasil: Clube de Autores, 2008. 23 p.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S.. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, Fapesp, 2007. 186 p.

SINDICATO DA INDÚSTRIA CERÂMICA DO CEARÁ – SINDCERÂMICA-CE et al. Diagnóstico setorial da indústria cerâmica do Ceará. Fortaleza, 2002. 74p.

SIRENE 12v 6 Tons Gc. Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-601809580-sirene-12v-6-tons-gc-_JM>. Acesso em: 17 dez. 2014.

SOFTWARE LIVRE BRASIL. **AJ Alves: eFLL – Uma Biblioteca Fuzzy para Arduino e Sistemas Embarcados.** Disponível em: <<http://softwarelivre.org/psl-pi/blog/aj-alves-efll—uma-biblioteca-fuzzy-para-arduino-e-sistemas-embarcados>>. Acesso em: 29 dez. 2014.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Salcas. **Termopares Convencionais.** Disponível em: <<http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instrumentacao/salcas/produtos/instrumentacao/termopares-convencionais>>. Acesso em: 24 nov. 2014.

SOUZA, Anderson R. de et al. **A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC.** 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n1/26.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2013.

SOUZA, Anderson R. de et al. **A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC.** Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p.1-5, 21 mar. 2011.

SOUZA, Valtinei Andrade de; BARBOZA, Frederico Jorge Ribeiro. **Avaliação da Aplicabilidade de Inferência Difusa em Sistema de Controle Embarcado para Irrigação.** Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFjAA&url=http://www.wiki.ifba.edu.br/ads/tiki-download_file.php?fileId=913&ei=cBXhVJPRPIWigwSJIsIAw&usg=AFQjCNFVrSaRUyEmXHpWqwVJNUmDrnA3qA&bvm=bv.85970519,d.eXY>. Acesso em: 15 fev. 2015.

SUBSÍDIOS para a Elaboração do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Cadeia Produtiva da Indústria de Cerâmica Vermelha. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1295436730.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2015.

SUSTAINABLE CARBON CLIMATE SOLUTIONS (Brasil) (Org.). **Sistema de monitoramento eletrônico da curva de queima melhora o desempenho das cerâmicas.** 2014. Disponível em: <<http://carbonosustentavelbrasil.wordpress.com/2009/09/10/sistema-de-monitoramento-eletronico-da-curva-de-queima-melhora-o-desempenho-das-ceramicas/>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

TAVARES. Forno abóboda. Disponível em: <www.ceramicatavares.com.br>. Acesso em: 09 jun. 2013.

TECHMOUNT (Org.). **Módulo Relógio Em Tempo Real RTC Ds1307 At24c32.** Disponível em: <<http://www.techmount.com.br/modulo-relogio-em-tempo-real-rtc-ds1307-at24c32>>. Acesso em: 23 dez. 2014.

TELHÃO - TELHADOS E COBERTURAS (São Paulo) (Org.). **Telha Cerâmica Italiana.** 2014. Disponível em: <<http://www.telhao.com/telha-ceramica/telha-ceramica-italiana.php>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

TELHA JUNDIAI GRILL (Jundiai - Sp) (Org.). **Telha Colonial Vermelha.** Disponível em: <http://telhasjundiai.com.br/produtos_telha_colonial.html>. Acesso em: 16 nov. 2014.

TEKETECNO. **El termistor.** 2012. Disponível em: <<https://teketecno.wordpress.com/2012/10/26/el-termistor/>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações.** 8. ed. São Paulo: Érica, 2011. 224 p.

TOKHEIM, Roger. **Fundamentos de Eletrônica Digital - Vol.2: Sistemas Sequenciais. Série Tekne.** 7. ed. Brasil: Mcgraw Hill, Bookman, 2013. Tradução de: Fernando Lessa Tofoli.

TOOLEY, Mike. **Circuitos Eletrônicos Fundamentos e Aplicações.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. Tradução da terceira edição Luiz Cláudio de Queiroz Faria.

TRENTIN, Paulo Marcos. **Data-Logger SD/MMC com Arduino.** 2011. Disponível em: <<http://www.paulotrentin.com.br/eletronica/data-logger-sdmmc-com-arduino/>>. Acesso em: 27 nov. 2014.

TRIANGULO MECATRÔNICO (Comp.). **As diferenças entre sinal digital e sinal analógico.** 2012. Disponível em: <<http://triangulomecatronico.blogspot.com.br/2012/03/diferenca-entre-sinais-digitais-e.html>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

TRINDADE FILHO, Milson Oliveira da et al. ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA POR TERMOPARES EM FORNOS TIPO CAIEIRA NA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Conem 2010: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, Campina Grande – Paraíba - Brasil, v. 1, n. , p.1-4, 18 ago. 2010. Disponível em: <<https://sigaa.ufrn.br/sigaa/verProducao?idProducao=2128470&key=ded5dfa19a0233769a2d1542f32741da>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

VAHID, Frank. **Sistemas Digitais Projeto, Otimização e HDLs.** Porto Alegre: Bookman, 2008. Tradução Anatólio Laschuk.

VARLE - MÁQUINAS PARA CERÂMICAS E OLARIAS (São Leopoldo - Rs) (Ed.). **Aparelho Laminador - VAL.** Disponível em: <<http://www.varlemaquinas.com.br/produtos-detalle.php?id=10>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

APÊNDICE A – COMPONENTES DO SISTEMA MICROCONTROLADO INTELIGENTE

Os componentes do sistema microcontrolado inteligente para o monitoramento de altas temperaturas nos fornos da indústria de cerâmica vermelha são disponibilizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Custo estimado do sistema microcontrolado inteligente.

Item	Descrição	Quantidade
1.	Termopar metálico inox 310 com comprimento total de 1100mm.	02
2.	Cabo de Extensão/Compensação KX ANSI ASTM E230	30m
3.	Módulos nanoshield thermocouple tipo K da Circuitar Eletrônicos	02
4.	Placa Arduino Mega2560	01
5.	Módulo SD Card	01
6.	LCD 16x2 de 16 colunas e 2 linhas	01
7.	Módulo de tempo real DS1307	01
8.	LED verde de alto brilho com tamanho 5 milímetros, tensão elétrica: de 3 a 3,3 volts e corrente elétrica máxima de 25mA	03
9.	LED vermelho de alto brilho com tamanho 5 milímetros, tensão elétrica: de 3 a 3,3 volts e corrente elétrica máxima de 25mA	03
10.	Resistores de 150Ω	06
11.	Sirene de 6 tons; 12V	01
12.	Caixa metálica de 200x180x90mm	01
13.	Placa perfurada com uma das faces banhada em cobre	02
14.	Carregador de 12V	01

Fonte: Elaborada pelo autor.