

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

Antônio Cabó

Universidade Estadual do Rio Grande do Norte, Universidade Federal Rural do Semi-Árido/Brasil
antonioeuc@gmail.com

Rommel Lima

Universidade Estadual do Rio Grande do Norte/Brasil
rommel.lima@gmail.com

Daniel Lopes

Universidade Federal Rural do Semi-Árido/Brasil
daniel@ufersa.edu.br

Luis Bezerra

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará/Brasil
luiscarlozilvabezerra@gmail.com

Resumo: A indústria de cerâmica vermelha contribui de forma significativa com o avanço socioeconômico do Brasil, mas ela enfrenta sérios problemas. Entre eles, está à ausência do monitoramento da temperatura nos fornos de grande parte das microempresas deste setor, devido a questões financeiras e falta de mão de obra qualificada. É nesse ponto que o trabalho de pesquisa pretende atuar, disponibilizando um sistema microcontrolado de baixo custo capaz de monitorar o processo produtivo e elaborar um modelo ideal com os valores da temperatura versus tempo para o processo de sinterização. O rendimento alcançado com o sistema foi de 82,81% na produção de produtos de primeira qualidade.

Palavras-chaves: Sinterização; Sistema; Microcontrolador; arduino, cerâmica; Forno; Sensores; Temperatura.

Abstract: The industry of red ceramic contributes significantly with the advancement socioeconomic of Brazil, but she faces serious problems. Between them, is to the absence of the monitoring temperature in ovens large part of microenterprises of this sector, due to financial matters and lack of skilled labor. Is that point that the research work plans to act, providing a system microcontrolled low cost able to monitor the production process and draw up an ideal model with the temperature values versus time to the sintering process. Income reached with the system was of 82,81% in the production of first quality products.

Keywords: Sintering; System; Microcontroller; Arduino; ceramics; Oven; Sensors; Temperature.

I. INTRODUÇÃO

Materiais cerâmicos são todos os materiais inorgânicos não metálicos de emprego em engenharia (materiais de construção) ou produtos químicos inorgânicos (exceto os metais e suas ligas) obtidos

após o tratamento em temperaturas elevadas [1]. Esses materiais são constituídos de argilas e possuem grande emprego na construção civil [1].

No Brasil existe uma considerável quantidade de jazidas de argilas, com importância e aplicações em diversas áreas, sendo uma delas na indústria de cerâmica vermelha. Este segmento abrange a fabricação de itens a base de argila pelo processo de sinterização. Produtos como: tijolos, blocos cerâmicos, lajotas e telhas. Contudo, essa parcela da indústria enfrenta sérios problemas. Entre eles, está à ausência do monitoramento da temperatura nos fornos de grande parte das microempresas deste setor, devido a questões financeiras e falta de mão de obra qualificada [2].

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 [3]. É na sinterização que está a maior importância, porque é onde o produto cerâmico recebe a maioria das suas qualidades comerciais.

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

É nesse ponto que esse trabalho de pesquisa atua, apresentando um Sistema Microcontrolado de Baixo Custo (SMBC) capaz de monitorar o processo produtivo em fornos das indústrias de cerâmica vermelha. O SMBC informa o valor da temperatura em um dado momento, tornando possível um maior controle do processo de fabricação para a obtenção de produtos com maior qualidade e valor agregado.

O sistema também contribui com a redução da quantidade de resíduos gerados a partir da quebra ou deformação de artefatos cerâmicos. A condução da sinterização com o aumento gradativo da temperatura diminui a possibilidade de quebra, devido à evaporação brusca da umidade contida na argila, e a perda da resistência mecânica, em razão da expansão dos produtos no interior do forno.

Para se chegar ao SMBC foi utilizada, como ponto de partida, a plataforma arduino. Essa plataforma disponibiliza um conjunto de Sistemas Embarcados (SE) especializados capazes de reduzir o tempo de desenvolvimento de protótipos. Segundo [4], um SE ou sistema embutido é um computador com baixa capacidade computacional encapsulado em um dispositivo, capaz de realizar um conjunto de tarefas predefinidas com fins específicos.

A base de funcionamento do sistema é o microcontrolador, esse possui várias funções em um único chip, entre elas estão: gerador interno de *clock*, memória 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 [5].

Os microcontroladores também 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 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 e *flash* são usadas para armazenar o programa e os dados gravados, 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 na memória EEPROM são conhecidos como *firmware* [6].

A Fig. 1 mostra os principais componentes presentes em um microcontrolador, independente do seu fabricante.

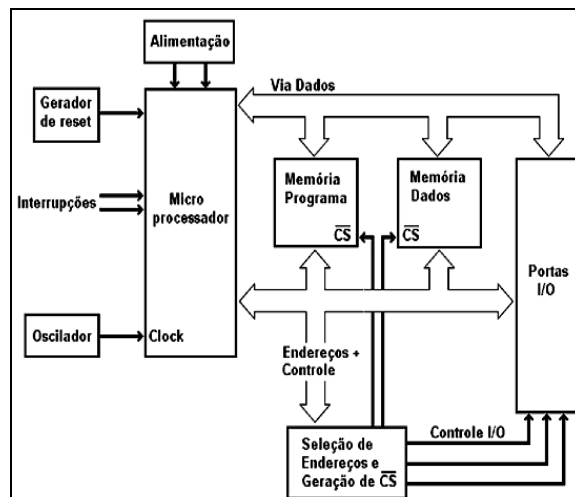


Figura 1 – Componentes de um microcontrolador [7].

Os fabricantes de microcontroladores estão tornando os seus produtos mais rápidos, com mais 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 ser tornado um atrativo no desenvolvimento de sistemas eletrônicos devido as suas dimensões reduzidas, capacidade de controlar e processamento de dados. Devido essas vantagens, eles estão sendo utilizados em aplicações industriais, domésticas, entretenimento, telecomunicações, automotivas, transporte, brinquedos e aviação [6].

O avanço tecnológico necessita cada vez mais de circuitos eletrônicos com componentes mais versáteis e com maior capacidade de processamento de dados. A facilidade de uso de sistemas microcontrolados em amplas faixas de aplicações tem proporcionado o projeto rápido e fácil de novos equipamentos controlados digitalmente, reduzindo assim, o custo de produção para tornar as novas tecnologias mais acessíveis ao mercado consumidor [5].

Este artigo está ordenado em seções que serão descritas a seguir. A seção II mostra a arquitetura do sistema. Na seção III são descritos os tipos de calibração e o procedimento de aferição do SMBC. Na seção IV podemos conhecer o forno da indústria de cerâmica vermelha e o processo de sinterização dos produtos cerâmicos. A seção V mostra o SMBC instalado no forno. Na seção VI podemos analisar os resultados obtidos com a utilização do sistema. Na seção VIII temos um levantamento sobre trabalhos relacionados com o estudo proposto. Para finalizar, nas seções IX e X temos as considerações finais e os trabalhos futuros.

II. ARQUITETURA

O sistema é composto por dois módulos: um microcontrolado, formado por uma placa Arduino Mega2560 para a recepção e processamento dos dados, e outro com a função de medir a temperatura

nas partes superior e inferior do forno, conforme a Fig. 2.

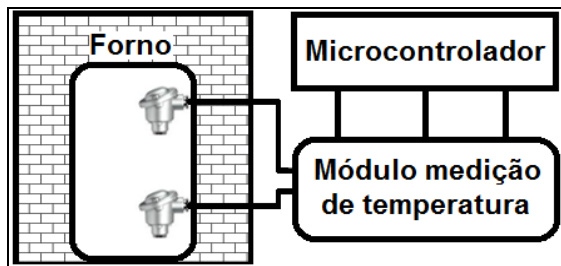


Figura 2 - Sistema Microcontrolado de Baixo Custo.

A. Módulo microcontrolado (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 [8].

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 [9].

O arduino é disponibilizado na forma de placas para o desenvolvimento de dispositivos diversos, constituindo uma plataforma de computação física, onde sistemas digitais, ligados a sensores e atuadores, formam uma placa de circuito impresso, podendo medir grandezas do meio físico, realizar cálculos numéricos e tomar decisões lógicas no ambiente computacional [9].

O modelo de placa selecionada é a Arduino Mega2560, conforme a Fig. 3, devido seu baixo custo e capacidade de atender as necessidades do projeto. Esse modelo 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 usada para gravar o *software* no microcontrolador e um botão de *reset* [10].

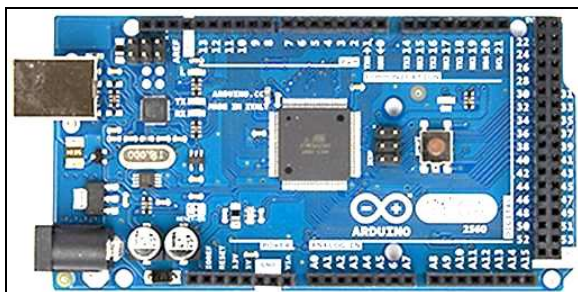


Figura 3 – Arduino Mega2560 [10].

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 saída. Eles operam com 5 volts para nível alto e 0

volts para nível baixo. Cada pino pode fornecer ou drenar no máximo uma corrente elétrica de 40mA (Miliampères) [10]. Porém a soma das correntes não pode ultrapassar 200mA.

B. Módulo para medição de temperatura

O módulo é constituído de 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 com cartão SD para armazenar os valores das temperaturas coletados pelos sensores, uma placa com uma bateria e um circuito integrado DS1307 com relógio de tempo real e um visor de LCD (*liquid crystal display*) para informar os valores da temperatura. A seguir serão descritos, de forma detalhada, os componentes utilizados no módulo e a metodologia para a escolha dos mesmos.

Após avaliar os diversos tipos sensores, chegou-se a conclusão, que apenas dois poderiam ser usados no sistema: 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°C e 1100°C (Graus Celsius) é o termopar tipo K.

Os termopares são os sensores mais empregados na medição de temperatura em aplicações industriais. 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 Fig. 4, 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 [11].

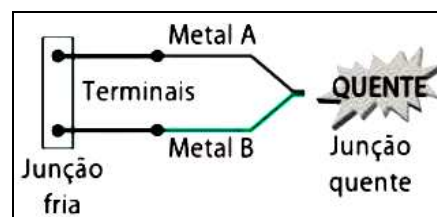


Figura 4 – Princípio de funcionamento do termopar

[11].

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

TABELA I. CARACTERÍSTICAS DE TERMOPARES [12].

Ref.	Materiais	Faixa de temperatura (°C)	Coefficient e 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

O termopar utilizado possui um comprimento total de 1100 milímetros, protegido por um tubo confeccionado em aço inoxidável resistente a temperaturas superior a 900°C e um cabeçote de proteção. A Fig. 5, mostra o termopar.



Figura 5 – Termopar [13].

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

- Segundo [14], a tensão gerada pelo termopar para a determinação da temperatura é baixa, variando aproximadamente $0,05\text{mV}/^\circ\text{C}$ (Milivolts por grau Celsius). Essa característica dificulta a utilização direta dos sensores 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 $1,22\text{mV}$ (Milivolts);
- A tensão gerada pelo sensor em função da temperatura não é linear, podendo variar para mais ou menos o valor de 0,05 milivolts por grau Celsius, por isso, é necessária uma compensação de temperatura, entre a junção quente e a junção fria [14].

Por esses motivos é fundamental a utilização de uma interface entre os termopares e a placa de aquisição de dados Arduino Mega2560. Neste trabalho foram utilizados os módulos *nanoshield thermocouple* tipo K da Circuitar Eletrônicos com Circuito Integrado (CI) Max31855K fabricado pela Maxim Semiconductor [15].

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, converte o sinal

analógico gerado pelo sensor, através de em um conversor A/D com resolução de 14 bits, em um sinal digital capaz de ser interpretado pelo microcontrolador do arduino com uma resolução de $0,25^\circ\text{C}$. Possui uma faixa de medição entre -270°C e 1372°C [15] [16].

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 Fig. 6 [16].

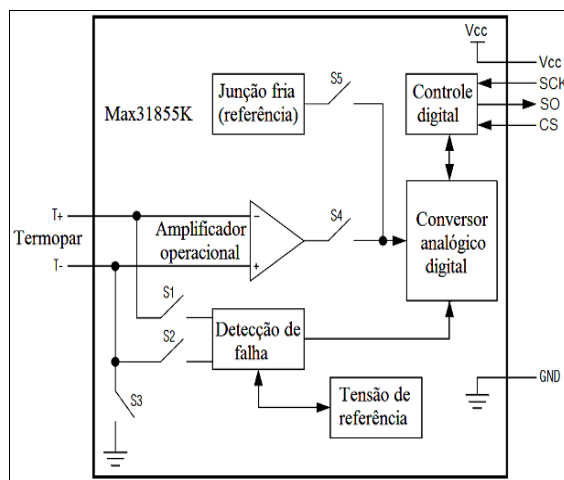


Figura 6 – Max31855K [16].

O CI foi projetado para trabalhar em conjunto com um microcontrolador em sistemas destinados ao monitoramento e controle da 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 [16].

A Fig. 7 mostra o circuito integrado do Max31855K conectado ao microcontrolador ATmega2560 do arduino. O circuito integrado recebe o sinal elétrico do termopar e transmite os dados através de uma ISP (Interface Serial Periférica). 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 [16].

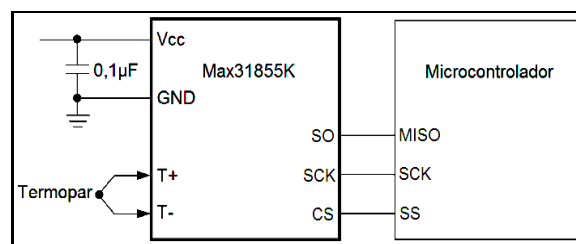


Figura 7 – Interface para a leitura do termopar [16].

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 Fig. 8 pela letra D [16].

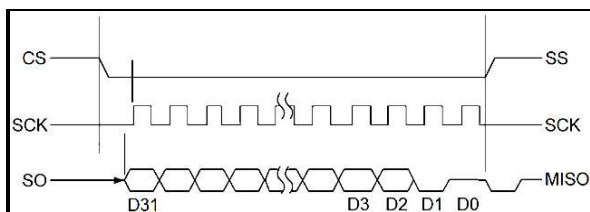


Figura 8 – Comunicação serial [16].

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 [16].

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 (Microvolts por grau Celsius), que se aproxima da característica do termopar de acordo com a equação“(1)”, [16]:

$$V_s = (41.276 \mu V/^{\circ}C) \times (T_q - T_f) \quad (1)$$

V_s = Tensão de saída do termopar em µV(Microvolts)

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, entre as bibliotecas pesquisadas, a que ofereceu maior facilidade de uso foi a Adafruit MAX31855. Um *link* para a página de *download* da biblioteca esta disponível em [17]. Os *links* para baixar a biblioteca, exemplos de código e as informações para a sua utilização e distribuição estão disponíveis em [18].

Além de monitorar a temperatura interna do forno, o sistema microcontrolado de baixo custo pode ser utilizado para elaborar um modelo ideal com os valores da grandeza durante todo o processo de sinterização, para isso era necessário armazenar esses valores entre 60 e 72 horas. Mas a memória do arduino é limitada, para resolver esse problema foi

necessário instalar um 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.

O modelo obtido através das informações gravadas pode ser usado para montar um gráfico da temperatura versus tempo para a concepção de uma curva de queima ótima e assim reproduzi-la em sinterizações futuras e supervisionar a atuação dos funcionários responsáveis pela adição de combustível no forno. A Fig. 9 mostra o módulo SD Card conectado ao Arduino Mega2560.

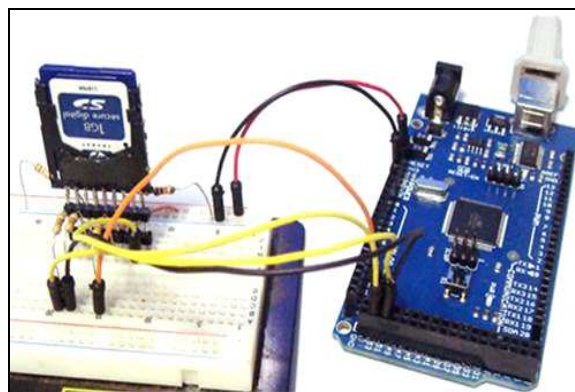


Figura 9 – Módulo SD Card [19].

Para informar os valores da temperatura aos funcionários responsáveis pelo processo de sinterização, utilizou-se um LCD com interface de comunicação paralela. Para mostrar o texto é necessário dispor 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 da informação. A Fig. 10 mostra o LCD 16x2 de 16 colunas e 2 linhas usado no Sistema Microcontrolado de Baixo Custo [20].



Figura 10 – LCD [20].

O Sistema Microcontrolado de Baixo Custo (SMBC) foi programado para: fazer as leituras dos sensores, informar os valores da temperatura nas partes superior e inferior do forno, testar a integridade dos sensores e dos cabos de ligação e gravar os valores da temperatura a cada 30 minutos. Essa metodologia tem o objetivo de treinar os funcionários e avisar possíveis falhas. Mas quando ocorria algum erro na leitura dos sensores ou o sistema era desligado por falha no fornecimento de energia elétrica, ele não conseguia informar o momento da falha ou por quanto tempo o mesmo tinha permanecido desligado.

Para resolver 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 (kilohertz) e uma bateria que mantenha o seu funcionamento caso o fornecimento de energia seja interrompido [21].

Esse módulo fornece as informações dos segundos, minutos, horas, dia, mês e ano. Dessa forma, o sistema é capaz de gravar os valores da temperatura e o instante de cada leitura. A Fig. 11 mostra o módulo de tempo com sua bateria.



Figura 11 – Módulo de tempo real [22].

III. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Um sistema de medição 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 [23].

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 [23].

A. Calibração direta

A calibração é realizada utilizando padrões com medidas materializadas com seus valores convencionais verdadeiramente conhecidos. Esse tipo de calibração é ilustrado na Fig. 12. Os valores informados pelo sistema são confrontados com cada valor padrão para ser calculado o erro de medição [23].

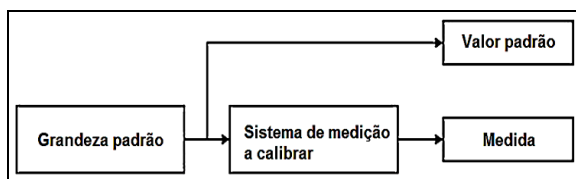


Figura 12 – Método de calibração direta [23].

B. 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 Fig. 13 mostra o diagrama de blocos da calibração indireta [23].

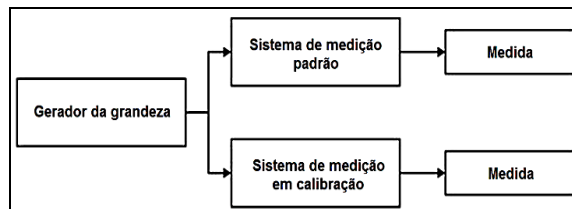


Figura 13 – Método de calibração indireta [23].

C. Seleção do tipo de calibração do sistema

O SMBC a calibrar é ilustrado na Fig. 14.

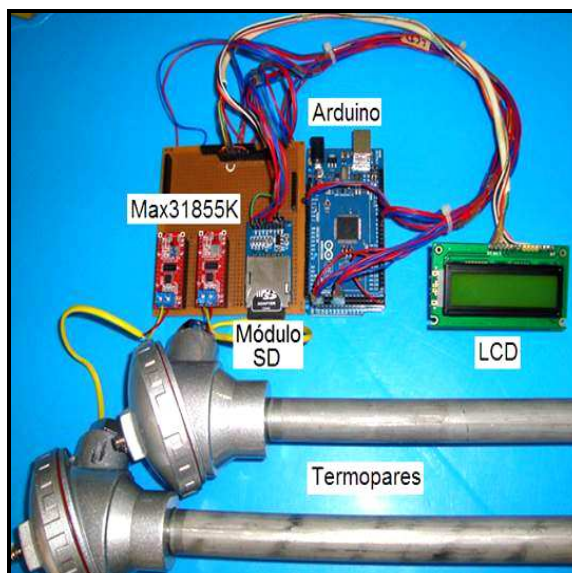


Figura 14 – Sistema microcontrolado de baixo custo (SMBC).

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 de baixo custo 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.

D. 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, conforme a Fig. 15. 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 [24] [25].

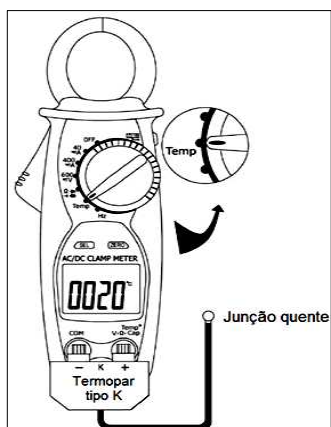


Figura 15 – SMP [24].

E. Procedimento de calibração

O termopar destinado a medir a temperatura no ponto superior (termopar superior) foi conectado ao Max31855K e este ao arduino. Os termopares do SMBC e SMP foram inseridos em uma estufa, com potência de 2400W (Watts) e capacidade de aquecimento de até 200°C, um ao lado do outro de forma que a diferença de temperatura entre os sensores fosse desprezível, de acordo com a Fig. 16.



Figura 16 – Estufa.

Foram obtidas as indicações dos sistemas de medição durante o aquecimento do interior da estufa de 40°C até 190°C. O mesmo procedimento foi realizado com o termopar inferior.

F. Resultados do procedimento de calibração

A Tabela 2 mostra os valores da temperatura indicados pelos sistemas SMP e SMBC. 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.

SMP (°C)	SMBC -Termopar Superior (°C)	SMBC -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
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

Considerando as tolerâncias do SMP e dos termopares, o SMBC, demonstra ser capaz de monitorar a temperatura de forma correta. Mas, se 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. Segundo [26], 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 $f(x) = a + bx$ [27].

Aplicando a RLS aos valores fornecidos pelos sistemas através do *software* GeoGebra [28], obtemos as equações “(2)” e “(3)” para fazer as correções dos valores das leituras obtidas pelo SMBC. Os resultados com as devidas correções são mostrados na Tabela 3:

Equação para os valores do termopar superior:

$$\text{SMBCsc} = 13 + 0,92(\text{SMBCs}) \quad (2)$$

$\text{SMBCsc} =$ Leitura do termopar superior corrigida(C°)

$\text{SMBCs} =$ Leitura do termopar superior(C°)

Equação para os valores do termopar inferior:

$$\text{SMBCic} = 10 + 0,96(\text{SMBCi}) \quad (3)$$

$\text{SMBCic} =$ Leitura do termopar inferior corrigida(C°)

$\text{SMBCi} =$ Leitura do termopar inferior(C°)

TABELA II. LEITURAS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.

TABELA III. LEITURAS DO SISTEMA MICROCONTROLADO APÓS A CORREÇÃO.

SMP (°C)	SMBCsc-Termopar Superior (°C)	SMBCic-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

IV. SINTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS CERÂMICOS

Antes de instalar o SMBC no forno, foi necessário conhecer melhor o forno da indústria de cerâmica vermelha e o processo de sinterização dos produtos cerâmicos.

A. 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. Todo o conjunto é construído com tijolos e argila que durante a primeira queima ou sinterização das telhas, adquire, juntamente com os produtos, a resistência mecânica necessária [29].

A Figura 17 mostra as partes internas do forno.

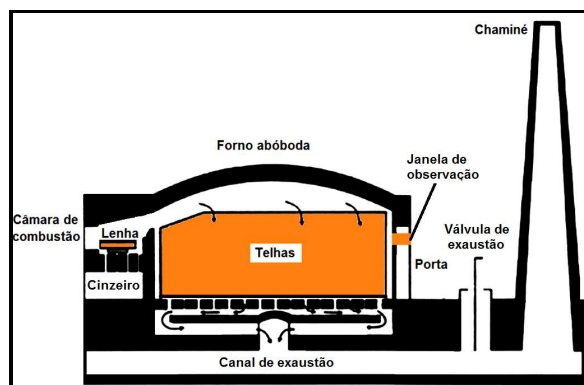


Figura 17 – Estrutura interna do forno [29].

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 [29].

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 [29].

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 [29].

B. Processo de sinterização

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°C e 1.000°C, em três fases: aquecimento, temperatura constante e resfriamento [30].

A Fig. 18 mostra um gráfico da temperatura em função do tempo correspondente à curva de queima teórica para os fornos. Cada etapa será descrita a seguir.

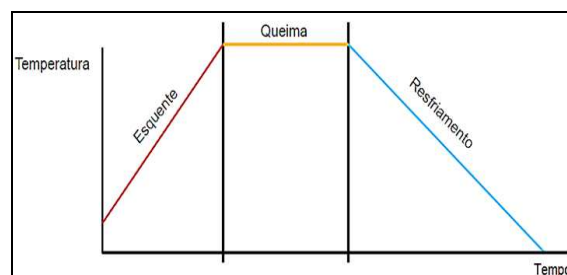


Figura 18 – Curva de queima [30].

No início, o aquecimento do forno deve ser realizado de forma lenta para retirar gradativamente a umidade dos produtos cerâmicos, 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) [30].

A maior parte do aquecimento ou esquentar deve ser feito com as portas das câmaras de combustão e cinzeiros, do forno, fechados após a queima do combustível, que no caso é lenha, para evitar o excesso de oxigênio, que prejudica a velocidade de aquecimento. As válvulas do canal de exaustão devem ficar abertas em 100% até atingir 300°C, após esta temperatura as mesmas deverão ser fechadas gradativamente [30].

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°C e 575°C) [30].

Durante o período 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. Para alcançar um melhor rendimento é necessário fazer um estudo sobre essa faixa de valores para cada tipo de argila e produtos produzidos pela empresa [30].

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.

O resfriamento pode ser acelerado na faixa de temperatura de 850°C a 650°C, abrindo as câmaras de queima e cinzeiros e retirando as brasas e cinzas retidas do cinzeiro durante o processo de queima. O intervalo de temperatura de 650°C 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 [30].

V. INSTALAÇÃO DO SMBC NO FORNO

Após a calibração e estudo do forno e processo de sinterização, o SMBC foi instalado em um forno de uma microempresa de cerâmica vermelha, conforme a Fig. 19.

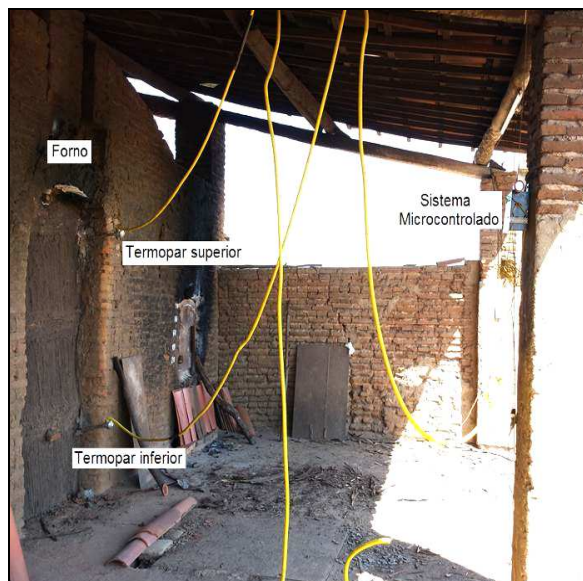


Figura 19 – SM instalado no forno.

Para verificar a eficiência do SMBC foi analisado um produto de cerâmica vermelha, no caso, a telha colonial. Os parâmetros considerados foram: quantidade de telhas sinterizadas durante um processo, a fração de telhas de primeira, que possui maior valor comercial e proporciona lucro ao empresário, segunda e terceira qualidade.

VI. RESULTADOS OBTIDOS

Durante as visitas *in loco*, foram coletados dados sobre os processos de sinterização, realizados sem a utilização do sistema microcontrolado. Assim, 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 demonstrado na Fig. 20 e 21.



Figura 20 – Janelas do forno.



Figura 21 – Emissão de fumaça através da janela do forno.

As informações obtidas conforme esse critério gera incerteza, o que reflete nos resultados da sinterização dos produtos, 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 SMBC foi instalado e logo se identificou um benefício. A redução do índice de insalubridade devido não ser 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 proporcionou um aproveitamento de 82,81% de telhas de 1ª qualidade.

O rendimento é excelente, com essas informações será possível repetir esse processo em sinterizações futuras, se o modelo elaborado pelo SMBC for seguido.

Em seguida o SMBC foi retirado do forno para se analisar o rendimento dos processos sem o sistema. Através do gráfico da Fig. 22 será feita uma análise comparativa.

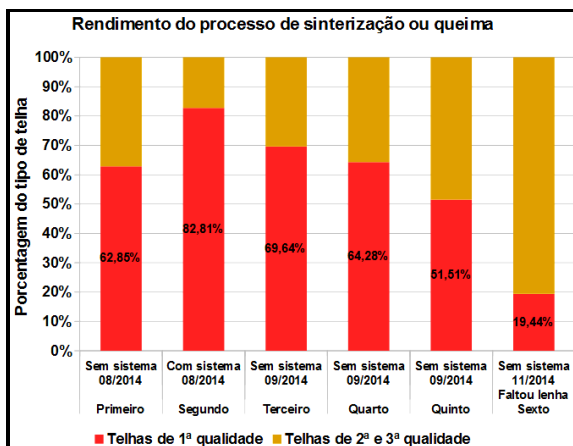


Figura 22 – Porcentagem de telhas de 1ª qualidade.

Ao longo das sinterizações seguintes os mesmos funcionários tentaram alcançar o rendimento proporcionado pelo SMBC, mas sem êxito. A ausência dos valores precisos da temperatura em função do tempo deixou novamente os responsáveis pelo processo de sinterização dos produtos cerâmicos na incerteza a qual eles estavam habituados.

VII. LINEARIZAÇÃO DA CURVA DE SINTERIZAÇÃO IDEAL

O modelo obtido pelo SMBC é muito promissor, mas ele ainda pode receber algumas correções em relação a sua eficiência energética. Os valores que o constituem estão distribuídos de forma dispersa, o que caracteriza redução e elevação de calor no interior do forno de forma excessiva. Se a temperatura reduzir a sua intensidade, será necessário mais combustível para fazê-la retornar ao seu valor considerado ideal e o seu excesso é classificado como desperdício. A Fig. 23 mostra o gráfico com os valores.

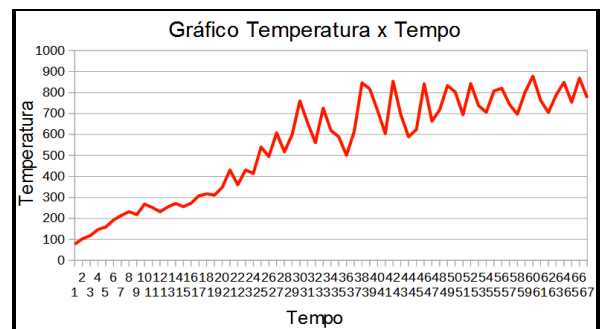


Figura 23 – Curva de sinterização dos produtos cerâmicos.

Antes de usar o modelo ou perfil térmico obtido pelo sistema microcontrolado, pode ser feita uma linearização dos seus dados com os objetivos de: aumentar a sua eficiência e facilitar a sua reprodução.

Seguindo o modelo teórico da curva de sinterização ou queima exposta na seção IV, os valores serão divididos em dois subconjuntos para ser linearizados, valores de temperatura para a fase de aquecimento ou esquentar e valores para a sinterização ou patamar de queima. Para a linearização será utilizada novamente a técnica de Regressão Linear Simples.

Aplicando a RLS aos novos valores encontrados e agora usando o *software* LibreOffice Calc, obtemos a equação “(4)” para fazer as correções dos valores das leituras obtidas.

$$(4) \quad T_i = 17,3079(\Delta t) + 50$$

T_i = Temperatura ideal (C°)

Δt = Variação de tempo (1h)

A Fig. 24 mostra o gráfico com o modelo ideal linearizado. Esse modelo pode sofrer futuras modificações com a realização de novos testes.

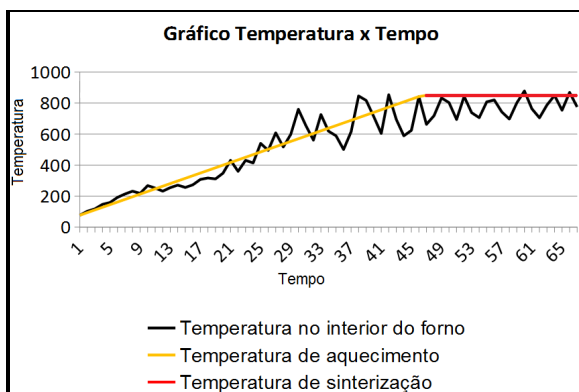


Fig. 24 – Modelo ideal linearizado.

VIII. TRABALHOS RELACIONADOS

O sistema implantado por [31], para o monitoramento da temperatura em fornos tipo caieira, utiliza como parâmetro de sinterização a temperatura padrão de queima da argila na qual a fábrica já adotava para a confecção de seus produtos. O sistema usa seis sensores com 1,5 metros 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. Durante o monitoramento do processo os valores da temperatura foram registradas a cada hora de forma manual.

Outro sistema é anunciado por [32], que confirma a necessidade de monitorar a temperatura em fornos de cerâmica vermelha e apresenta um equipamento constituído de sensores, que proporciona um acompanhamento digital através de gráficos. Os sensores são instalados 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. Estes dados possibilitam a redução do desperdício e diminui significativamente o consumo de lenha.

Conforme exposto no [32], 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 microcontrolado apresentado neste trabalho de pesquisa se distingue dos citados anteriormente, principalmente, devido à utilização de *hardwares* livres de baixo custo com poucos recursos computacionais. O SMBC também apresenta as seguintes vantagens:

- Grava os valores da temperatura em função do tempo de forma automática, não necessitando de um funcionário para isso;
- Os dados são gravados em um cartão SD, dispensando o uso de um computador, um

software específico e uma estrutura física próxima ao forno.

IX. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema desenvolvido por este trabalho de pesquisa demonstra ser promissor no monitoramento da temperatura em fornos das indústrias de cerâmica vermelha. Foi realizada uma calibração indireta através da análise comparativa entre o SMBC 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. O SMBC fornece os valores da temperatura interna do forno e com essas informações foi possível elaborar um modelo térmico para a obtenção de 82,81% de telhas de primeira qualidade, tornando possível uma tomada de decisão consciente para a produção de itens cerâmicos com maior valor agregado.

X. 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*;
- Usar dois LCDs, um para cada sensor, para facilitar a visualizar do valor da temperatura.
- Elaborar um algoritmo inteligente para o sistema microcontrolado ter a capacidade de indicar a quantidade de combustível, mais adequada, a ser adicionado na câmara de combustão do forno.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] REZENDE, Sergio Machado. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.
- [4] JOBSTRAIBIZER, Flávia. **Desvendando as redes sem fio**. São Paulo: Digerati Books, 2010. 96 p.
- [5] LIMA, Charles Borges de; VILLAÇA, Marco Valério Miorim. **Avr e Arduino: Técnicas de Projeto**. 2. ed. Florianópolis: Editora dos Autores, 2012.
- [6] ALCIATORE, David G.; HISTAND, Michael B.. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições**. 4. ed. Porto Alegre - RS: AMGH EDITORA LTDA, 2014. Reservados todos os direitos de publicação, em língua portuguesa, à

- AMGH EDITORA LTDA., uma parceria entre GRUPO A EDUCAÇÃO S.A. e MCGRAW-HILL EDUCATION.
- [7] MONTEBELLE, Sidney José. **MICROCONTROLADOR 805**. 2014. FACENS. Disponível em: <<http://alfa.facens.br/~sidney/MICROCONTROLADOR8051.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2014.
- [8] ARDUINO. **Arduino**. 2013. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 05 dez. 2013.
- [9] 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/sextoestec/art1677.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2013.
- [10] ARDUINO. **Arduino Mega 2560**. 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 05 fev. 2015.
- [11] PETRUZZELLA, Frank D.. **Motores Elétricos e Acionamentos: Série Tekne**. Porto Alegre: AMGH, 2013. Tradução: José Lucimar do Nascimento; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior.
- [12] BOLTON, W. **Mecatrônica - Uma Abordagem Multidisciplinar**. 4. ed. Brasil: Bookman, 2010. 664 p.
- [13] 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.
- [14] ADAFRUIT. **A thermocouple is a kind of temperature sensor**. 2014. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/thermocouple/overview>>. Acesso em: 03 maio 2014.
- [15] CIRCUITAR ELETRÔNICOS. **Thermocouple**. 2013. Disponível em: <<https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/thermocouple/>>. Acesso em: 18 jan. 2015.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] TRENTIN, Paulo Marcos. **Data-Logger SD/MMC com Arduino**. 2011. Disponível em: <<http://www.paulotrentin.com.br/electronica/data-logger-sdmcc-com-arduino/>>. Acesso em: 27 nov. 2014.
- [20] ARDUINO. **LiquidCrystal - "Hello World!"**. 2014. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Tutorial/LiquidCrystal>>. Acesso em: 08 dez. 2014.
- [21] LIMA, Charles Borges de; VILLAÇA, Marco Valério Miorim. **Avr e Arduino: Técnicas de Projeto**. 2. ed. Florianópolis: Editora dos Autores, 2012.
- [22] TECHMOUNT (Org.). **Módulo Relógio Em Tempo Real RTC Ds1307 At24c32**. Disponível em: <<http://www.techmount.com.br/modulo-relógio-em-tempo-real-rtc-ds1307-at24c32>>. Acesso em: 23 dez. 2014.
- [23] SILVA NETO, João Cirilo da. **Metrologia e Controle Dimensional: Conceitos, Normas e Aplicações**. Brasil: Campus, 2012.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] ARAUJO, Marcos Antônio de. **Administração de produção e operações: Uma abordagem prática**. Rio de Janeiro-RJ: Brasport Livros e Multimídia Ltda, 2009. 391 p.
- [27] ROMIO, Cristiane; LORSCHTEIT, 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.
- [28] GEOGEBRA. **O que é o GeoGebra**. 2015. Disponível em: <<https://www.geogebra.org/about>>. Acesso em: 20 fev. 2015.
- [29] 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.
- [30] 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_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2015.
- [31] 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.
- [32] 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.