



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

**COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



EDUARDO ANDREWS DUARTE SILVA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE FORNO ROTATIVO

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2017

EDUARDO ANDREWS DUARTE SILVA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE E FORNO ROTATIVO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Outubro/2017

S586d Silva, Eduardo Andrews Duarte.
Desenvolvimento de Sistema de Automação e Controle de Forno Rotativo
[manuscrito] / Eduardo Andrews Duarte Silva. - 2017.

45f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Fornos metalúrgicos. 2. Automação industrial. 3. Controladores programáveis. I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

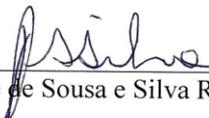
Monografia defendida e aprovada, em 11 de outubro de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador



Prof. Dr. Paulo Raimundo Pinto – Professor Convidado



Profa. M. Sc. Regiane de Sousa e Silva Ramalho – Professora Convidada

RESUMO

O forno rotativo linder é utilizado em diversos ensaios envolvendo materiais em que se deseja estudar a abração dos mesmos ao serem submetidos à uma determinada rotação e temperatura. Juntamente com a rotação e um patamar de temperatura, o material, que pode ser aglomerado ou em natura, pode ser exposto à uma atmosfera de uma combinação específica de gases, possibilitando assim, um estudo minucioso do comportamento fisico-químico do material em situações extremas e hostis, favorecendo o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas tecnologias. Este trabalho tem como finalidade, a automação de um forno metalúrgico rotativo. As atividades realizadas serão o desenvolvimento do programa do controlador lógico programável utilizando a linguagem LADDER, sintonia da malha de controle dos controladores de temperatura, o desenvolvimento do sistema supervisório SCADA e a amarração dos componentes da planta via protocolo MODBUS RS-485.

ABSTRACT

The rotative furnace Linder is applicable in various metallurgical essays involving materials there is need to study the abrasion when they are submitted to a determined rotation and temperature. Together with the rotation and high temperature the material, that could be agglomerated or in nature, can be exposed to an atmosphere composed with a combination of specific gases, making possible a detailed study of pshysicochemical behavior of material in extreme and hostile situations, favoring the improvement and development of new technology. This work have main goal the automation of a metallurgical rotative furnace. The performed activities will be the development of PLC program, tuning of the control mash, development of supervisory system SCADA and the integration of all components of plant via MODBUS RS-485 protocol.

SUMÁRIO

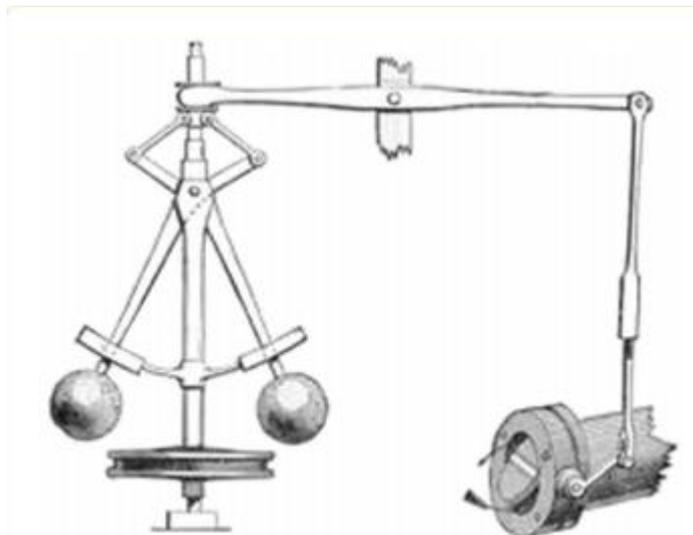
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
2. MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1 Controlador Lógico Programável – CLP	3
2.2 Interface Homem-Máquina – IHM	5
2.2.1 Sistema SCADA	5
2.3 Controlador e Fluxômetro Mássico	6
2.4 Motor Trifásico de Gaiola	8
2.4.1 Lei de Faraday	8
2.4.2 Lei de Lenz	8
2.4.3 O Campo Magnético Girante.....	9
2.4.4 O Motor de Indução de Gaiola	9
2.5 A Resistência Elétrica	10
2.6 Materiais Refratários	11
2.7 Controlador PID	12
2.8 O Termopar	13
2.9 O Relé.....	13
2.9.1 Relé de Estado Sólido.....	14
2.10 Válvula Solenóide	14
2.11 Atuador Linear	15
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	16
3.1 Engenharia do Processo	16
3.2 Memorial Descritivo	16
3.3 Fluxograma de operação	17
3.4 Relação de I/O	18
3.5 Descritivo Dos Componentes de Instrumentação e Automação Utilizados	19
3.5.1 CLP Delta DVP20SX2	19

3.5.2 Controlador de Temperatura Delta DTC1000	20
3.5.3 Relé de Estado Sólido CONTEMP CR- 148060DC	21
3.5.4 Inversor de Frequência Rockwell PowerFlex 4m	21
3.5.5 Atuador Linear LINAK LA31	22
3.5.6 Controlador e Fluxômetro Mássico ALICAT	22
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SCADA	23
4.1 Confeção das Telas	23
4.1.1 Tela de Abertura	23
4.1.2 Tela de WatchList	24
4.1.3 Tela de Representação Gráfica	24
4.1.4 Tela de Alarmes	25
4.1.5 Tela de Relatórios	25
4.1.6 Tela de Data Sources	26
5. ESTUDO DE CASO	26
5.1 Resumo do Processo	26
5.2 Parametrização	27
5.3 Resultados.....	29
5.3.1 Controle de Temperatura	29
5.3.2 Análise de Desempenho do Sistema	30
5.3.2.1 Controladores de Temperatura	30
5.3.2.2 Programação LADDER e CLP	30
5.3.2.3 Sistema SCADA	31
5.3.2.4 Controle e Medição de Fluxo de Gases.....	31
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios o homem busca incessantemente formas de organizar, otimizar e facilitar o trabalho, de modo a reduzir o uso de mão de obra humana e mecanizar os processos produtivos. As primeiras iniciativas do homem para mecanizar atividades manuais ocorreram na pré-história. Invenções como a roda, o moinho movido por vento ou força animal e as rodas d'água demonstram a criatividade do homem para poupar esforço. Porém, a automação só ganhou destaque na sociedade quando o sistema de produção agrário e artesanal transformou-se em industrial, a partir da segunda metade do século XVIII, inicialmente na Inglaterra. (Bayer; Eckhardt; Machado, 2011).

Uma notória invenção para o desenvolvimento da automação de sistemas em malha fechada foi desenvolvida por James Watt em meados de 1788, o sistema é baseado em uma haste vertical acoplada a uma roldana em sua extremidade inferior por onde a potência é transmitida através de uma correia ou corrente. Nesta haste são anexados dois braços com um determinado grau de liberdade, onde são anexadas bolas pesadas em suas extremidades, de modo que possam se mover para cima e para fora de acordo com a velocidade angular. No topo da haste, um pistão sobe e desce de acordo com a abertura dos braços, o mesmo é conectado mecanicamente com um mecanismo que abre e fecha uma válvula de combustível, possibilitando assim a abertura e o fechamento da válvula de acordo com a velocidade da máquina a ser regulada. Esse regulador recebe também o nome de governador centrífugo, e permite que o sistema mantenha uma velocidade aproximadamente constante de forma automática.



(WIKIPEDIA, 2017)

Figura 1: Governador Centrífugo

Os sistemas de controle e automação vem impactando de forma muito positiva o setor industrial de modo a propiciar a produção em larga escala, com alta precisão e utilizando o mínimo de mão de obra humana, o que compõe um grande aumento de produtividade e segurança do trabalho.

Sistemas de automação industrial em geral são apresentados em malha fechada com realimentação negativa, permitindo que o próprio sistema forneça ao controlador os dados necessários para que o mesmo realize os cálculos necessários para manter o sistema estável e que siga a referência fornecida pelo usuário, como pode ser visto na figura 2.

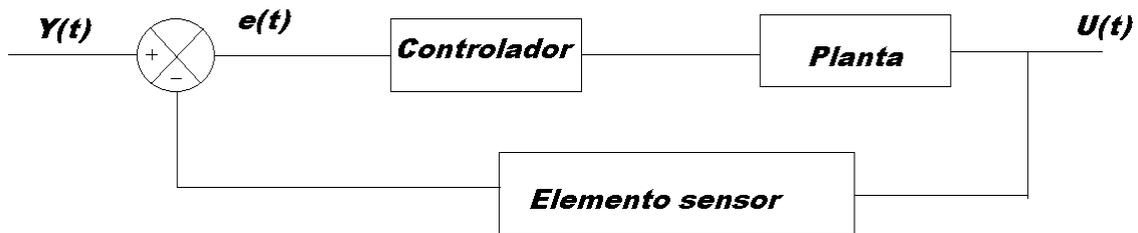


Figura 2: Controle em malha fechada

Neste trabalho será apresentado um sistema de controle desenvolvido a partir da necessidade de operacionalizar uma máquina com problemas de funcionamento, com poucos recursos disponíveis e aproveitando o máximo de dispositivos e instrumentos do projeto original. O projeto de automação original foi realizado pela empresa Toledo & Souza em parceria com a empresa FORTELAB. O desenvolvimento deste trabalho foi resultado de uma parceria com a Fundação Gorceix.

O forno rotativo, máquina a ser re-automatizada durante o desenvolvimento deste trabalho, oferece várias possibilidades de testes metalúrgicos em diferentes patamares de temperatura, podendo utilizar atmosfera para óxido-redução ou não, dependendo das necessidades do cliente.

1.1 Objetivos

O projeto apresentado tem como objetivo projetar um sistema de automação controle de baixo custo a partir de um sistema previamente automatizado mas com grandes problemas de funcionamento.

A máquina a ser automatizada é um forno horizontal rotativo com três zonas de aquecimento. Através da operação deste forno é possível simular o comportamento de materiais advindos da mineração em ambientes hostis, sob atmosfera oxidante ou redutora, altas temperaturas e impacto mecânico.

A automação original do forno foi realizada pela empresa Toledo & Souza em parceria com a empresa FORTELAB. A maior parte dos equipamentos de instrumentação, automação e controle do projeto original foram reaproveitados.

Com a escassez de recursos e como a IHM, que tinha importante papel no controle do forno, queimou, foi necessário buscar novas possibilidades de interface homem-máquina para que o processo pudesse prosseguir. Após a pesquisa de mercado, foi decidido utilizar o software SCADABR para realizar o controle do processo, para isso todo o projeto foi reestruturado e um novo sistema foi desenvolvido, visto que boa parte do sistema de controle original era desempenhado pela IHM queimada.

O maior foco do novo projeto era o pelo funcionamento, com estabilidade e interfaceamento gráfico acessível a operadores com pouco ou nenhum conhecimento em automação industrial. O custo reduzido também foi um conceito importante, por isso utilizar um software open source foi uma boa opção.

Neste trabalho é possível perceber o foco geral na automação, interfaceamento e controle do forno, porém o mesmo se estende a diversas áreas, afins ou não, que poderão utilizar o mesmo para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os diversos materiais e as técnicas de controle aplicadas ao projeto apresentado neste trabalho.

2.1 Controlador Lógico Programável – CLP

O controlador lógico programável ou CLP é um dispositivo projetado e construído a fim de controlar máquinas e equipamentos de forma dedicada. É amplamente utilizado na indústria para fins de controle de diversos níveis de complexidade. Possui processadores de alto desempenho executando sistemas operacionais de tempo real.

Os componentes de um CLP são basicamente:

- CPU: A unidade central de processamento é o cérebro do CLP, tem a função de ler os valores lógicos presentes nas entradas, executar as instruções que constituem o programa e transferir para as saídas as ordens provenientes dessas instruções. É formada por duas partes fundamentais: o(s) processador(es) e as memórias. Pode conter também outros elementos, como portas de comunicação, circuitos de diagnóstico, fontes de alimentação.
- Fonte de alimentação: Tem por função fornecer as tensões adequadas ao funcionamento do CPU (geralmente ligada aos 220 V da rede). Normalmente as fontes são projetadas para fornecer várias tensões de alimentação para os módulos. O processador normalmente necessita de uma alimentação de 5 V. Cartões de entradas e saídas digitais precisam de alimentação auxiliar para os elementos de chaveamento e conversão.
- Processador: O processador possui como tarefa principal a execução do programa realizado pelo usuário, entretanto possui também outras tarefas, como o gerenciamento da comunicação e execução dos programas de auto-diagnósticos. Para poder realizar todas estas tarefas, o processador necessita de

um programa escrito pelo fabricante, denominado sistema operacional. Este programa não é acessível pelo usuário e se encontra gravado na memória não volátil que faz parte da CPU. Existem atualmente CLP's que utilizam mais de um processador, conseguindo assim, dividir tarefas e com isso ganhar maior velocidade de processamento e facilidade de programação.

- Memória: O processador possui como tarefa principal a execução do programa realizado pelo usuário, entretanto possui também outras tarefas, como o gerenciamento da comunicação e execução dos programas de auto-diagnósticos. Para poder realizar todas estas tarefas, o processador necessita de um programa escrito pelo fabricante, denominado sistema operacional. Este programa não é acessível pelo usuário e se encontra gravado na memória não volátil que faz parte da CPU. Existem atualmente CLP's que utilizam mais de um processador, conseguindo assim, dividir tarefas e com isso ganhar maior velocidade de processamento e facilidade de programação.
- Módulo de Entradas e Saídas: Os CLPs antigos tratavam apenas de entradas e saídas discretas e isso acarretava em um controle parcial dos sistemas. Com o passar dos anos, e devido a necessidade de melhorar o controle dos processos acontecendo no chão de fábrica, foram implementadas ao mercado os chamados módulos de entradas e saídas analógicas e então possibilitou-se um melhor controle do que se queria mensurar/atuar, pois entradas e saídas analógicas permitem um número infinito de valores, enquanto as discretas limitam a significância das informações que podem ser tratadas tanto na entrada quanto na saída. No controlador lógico programável (CLP), existe um componente que é tão fundamental quanto o processador e a memória, este componente é chamado de módulo de entradas e saídas. Este módulo pode ser separado em duas partes: a parte das entradas de sinais e a parte das saídas de sinais. E cada uma dessas duas partes pode ainda ser subdividida em dois grupos: o módulo específico que trata dos dados digitais, e o módulo específico que trata das informações analógicas. (PETRULZELLA, 2017)



(DELTA, 2017)

Figura 3: Controlador Lógico Programável

2.2 Interface Homem-Máquina – IHM

As interfaces homem-máquina são dispositivos projetados e construídos a fim de aumentar a superfície de contato entre humanos e máquinas. Existem diversos modelos nos mais variados graus de complexidade. Desde simples elementos de controle com um pequeno display de segmentos a IHM com alto grau de complexidade e interfaces gráficas e alta resolução e interação.



(DELTA, 2017)

Figura 4: Interface Homem-Máquina

2.2.1 Sistema SCADA

A sigla SCADA significa “*Supervisory, control and data acquisition*”, ou “Supervisório, controle e aquisição de dados”, é um tipo de IHM mais robusto, com a possibilidade de geração de gráficos e relatórios, linhas de códigos embarcadas, macros, telas gráficas, controle de I/O em tempo real, confecção de alarmes, dentre outras soluções.

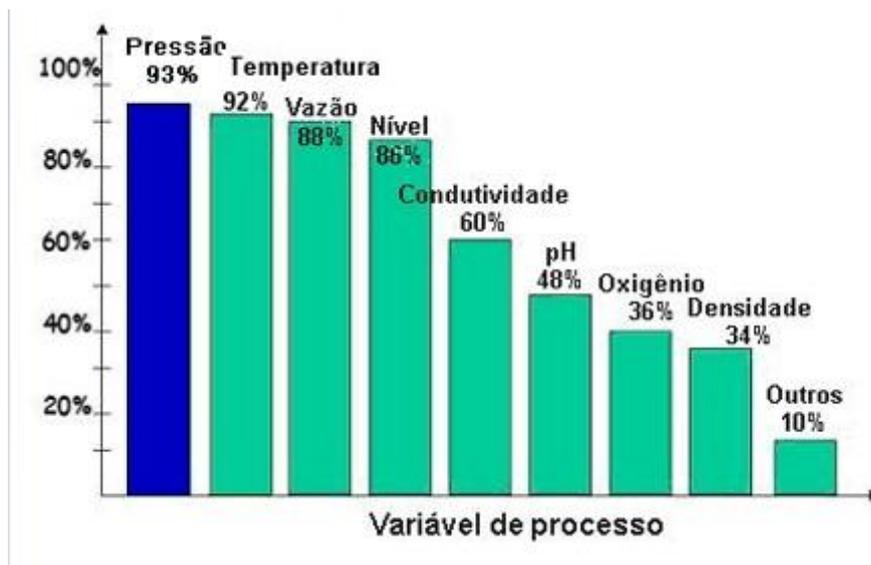


(ELIPSE, 2017)

Figura 5: Representação gráfica de sistema SCADA

2.3 Controlador e Fluxômetro Mássico

A vazão é uma importante variável de processo a ser medida quando tratamos de automação industrial. As aplicações são diversas que variam desde medições simples de vazão de água em residências, até aplicações robustas como a medição de vazões de gases industriais e combustíveis, desse modo a escolha do instrumento adequado para medição desta grandeza é de extrema importância para o bom controle do processo a ser controlado.



(REVISTA CONTROL ENGINEERING, 2002)

Figura 6: Pesquisa sobre a utilização futura de transmissores em controle de processos

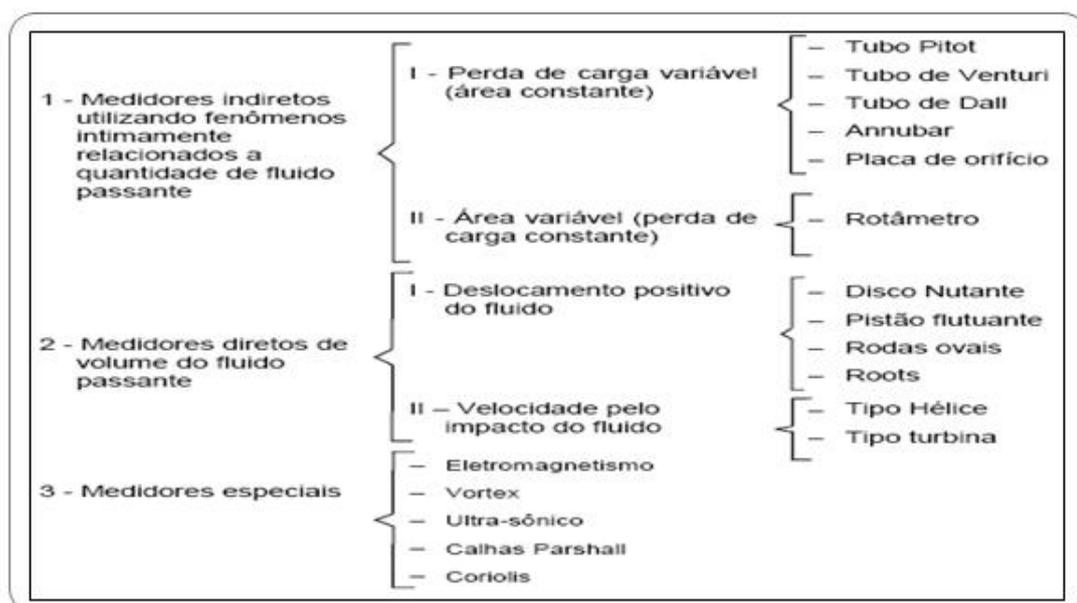
O controlador e fluxômetro mássico é um dispositivo capaz de aferir e controlar a vazão de um determinado fluido. O princípio da medição de vazão é feito através de um sistema de pressão diferencial laminar, o mesmo é baseado em forçar o fluido a passar por uma barreira em meio ao seu percurso em direção ao misturador, após atravessar a barreira, uma diferença de pressão é medida, e a partir desta diferença é possível calcular de forma muito precisa a vazão mássica. De forma concomitante, o dispositivo controla uma válvula, que por sua vez, limita a passagem de fluido, possibilitando assim o controle total da vazão em malha fechada, de acordo com o valor de referência pré estabelecido pelo usuário. (ALICAT, 2017)



(ALICAT,2017)

Figura 7: Controlador e Fluxômetro mássico

Outras formas de medir vazão são apresentadas na figura 8.



(SMAR, 2017)

Figura 8: Formas de medir vazão

2.4 Motor Trifásico de Gaiola

A máquina de indução pode ser vista como uma máquina de dupla excitação, uma vez que uma tensão CA é aplicada em ambos os rolamentos (estator e rotor). A frequência e o potencial aplicados na armadura são (normalmente) constantes enquanto a tensão aplicada no rotor (induzida) possui frequência e potencial variáveis. (WEG, 2017)

Para se entender o funcionamento do motor de indução CA, é preciso primeiramente ter a clareza de como é produzido o torque eletromecânico no rotor do motor de indução. Para tal compreensão, se faz necessário conhecer as leis de Faraday e Lenz.

2.4.1 Lei de Faraday

A lei de Faraday relaciona a força eletromotriz ε induzida em uma espira, com a taxa de fluxo magnético que está atravessando a espira. Matematicamente a lei de Faraday pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \frac{-d\phi_b}{dt}$$

Onde: ε é a força eletromotriz induzida em uma espira. (V);

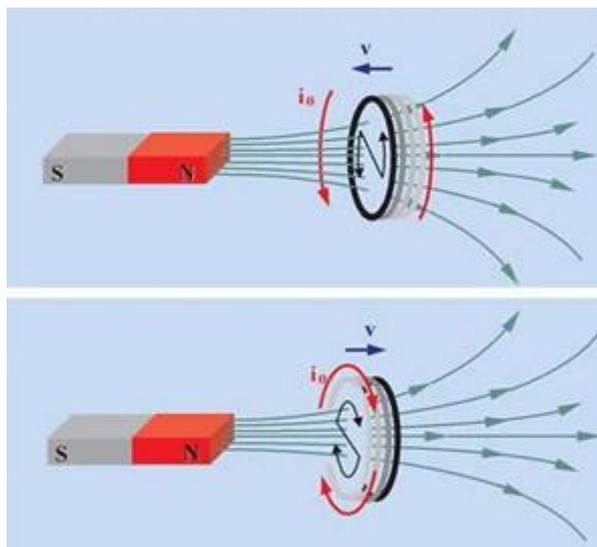
Φ_b é o fluxo magnético que atravessa a espira. (Wb);

t é o tempo. (s);

Detalhe ao sinal negativo que representa a oposição a qual o sistema se refere, porém da maioria dos casos apenas o valor absoluto é desejado. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009)

2.4.2 Lei de Lenz

Após Faraday propor a lei de indução, Lenz postulou uma regra que determina o sentido da corrente induzida em uma espira. A mesma determina que a corrente induzida em uma espira tem um sentido tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009)

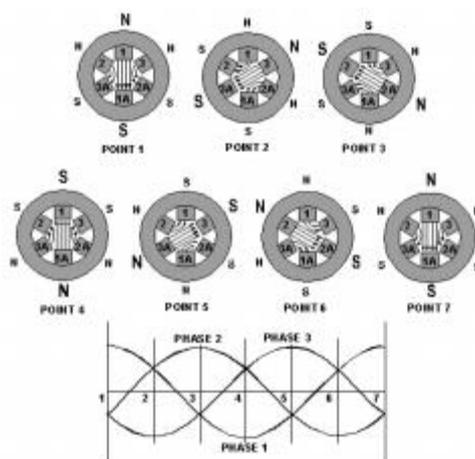


(BRASIL ESCOLA, 2017)

Figura 9: Aplicação da lei de Lenz

2.4.3 O Campo Magnético Girante

Como constatou Tesla (1882), “Três correntes alternadas senoidais, com mesma amplitude e defasadas de 120° , circulando por três bobinas fixas, cujos eixos magnéticos distam 120° entre si, produzem um campo magnético girante de intensidade constante”, a partir desta descoberta, diversas patentes no âmbito das máquinas de indução foram criadas, o que gerou uma revolução em nível mundial nos processos industriais.



(WEG, 2017)

Figura 10: Campo magnético girante

2.4.4 O Motor de Indução de Gaiola

O grande diferencial do motor de indução em gaiola é o seu rotor confeccionado em forma de “gaiola de esquilo”, onde a gaiola possui anéis metálicos presentes em

sua tampa e na base, que formam um curto-circuito em suas barras dispostas de forma transversal, permitindo assim a circulação de corrente entre elas. O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são inseridas barras de cobre, dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto-circuitam as barras. As barras da gaiola de esquilo podem ainda ser fabricadas de alumínio injetado ou liga de latão. As barras do rotor tipo gaiola de esquilo nem sempre são paralelas ao eixo do rotor. As mesmas podem ser deslocadas ou colocadas segundo um pequeno ângulo em relação a ele, para produzir um torque mais uniforme e para reduzir o ruído magnético durante a operação do motor. O estator do motor é também constituído por um núcleo ferromagnético laminado, nas cavas do qual são colocados os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica. Voltando aos princípios de Faraday, quando temos uma variação do fluxo magnético com o tempo em uma bobina, surge uma tensão na mesma, e consequentemente surge uma corrente circulando por ela. (WEG, 2017)



(WEG, 2017)

Figura 11: Rotor de gaiola de esquilo

2.5 A Resistência Elétrica

Como constata Teixeira (2017), A resistência elétrica é definida como a capacidade que um corpo tem de se opor à passagem de corrente elétrica, cuja unidade no Sistema Internacional é o Ohm (Ω). Quando algum elemento é submetido à uma diferença de potencial, uma corrente começa a percorrer seu meio físico, essa corrente é constituída pelo movimento de elétrons livres no interior do elemento. De acordo com as características físico-químicas do elemento, existirá uma dificuldade maior ou menor à passagem de corrente por meio do mesmo. A resistência elétrica pode ser definida matematicamente por:

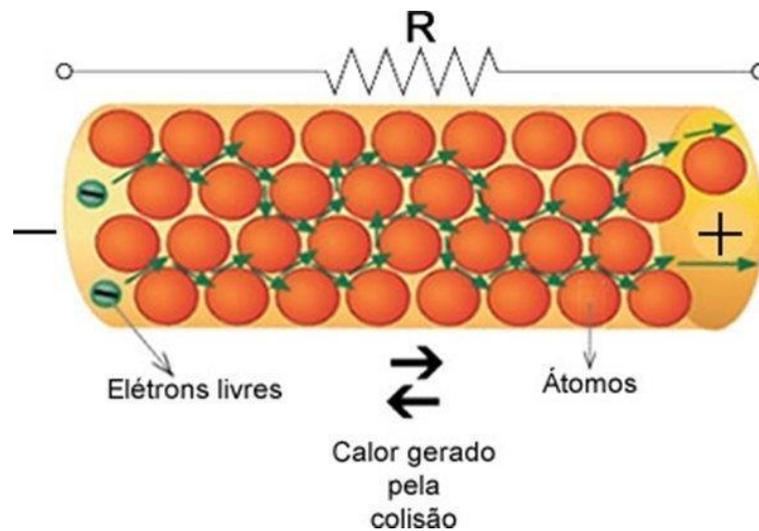
$$R = \frac{\rho l}{A}$$

Onde: R = Resistência elétrica em (Ω)

ρ = Resistividade, característica de cada material em ($\Omega \cdot m$)

l = Comprimento do condutor (m)

A = Área da seção transversal do condutor (m^2)



(MUNDO ELÉTRICA, 2017)

Figura 12: Resistência elétrica.

2.6 Materiais Refratários

Materiais refratários são aqueles que conseguem manter sua resistência térmica à altas temperaturas. São amplamente empregados em fornos, incineradores e reatores. O termo refratário é atribuído a materiais, que em sua imensa maioria tem origem cerâmica, que são capazes de suportar altas temperaturas e manter-se o mais imune possível à perturbações físico-químicas. (ASTM, 2017)



(REFRATIL, 2017)

Figura 13: Manta refratária

2.7 Controlador PID

Como constata Chagas (2012), “O controle proporcional é utilizado para minimizar a característica de oscilação do controle de ligar/desligar. O Controle PID vai um pouco além para reduzir erros e fornecer precisão e estabilidade em um processo. Ele faz isso usando a ação integral e ações derivativas para eliminar erros de desvio de controle e para gerenciar movimentos rápidos do processo. Todos os três termos PID precisam ser ajustados adequadamente com os requisitos da aplicação para alcançar o melhor controle”, Podemos dizer que o controlador PID se baseia nas propriedades proporcionais, integrais e derivativas para moldar a dinâmica de um determinado sistema em função das necessidades do usuário.

A ação proporcional: A ação proporcional produz um sinal de saída que é proporcional à amplitude do erro $e(t)$.

$$S = k_p \cdot e(t)$$

Traçando um paralelo com a ação on-off, obtemos a vantagem de acabar com oscilações, porém, essa ação por si só não é capaz de eliminar o erro do sistema.

Ação Integral: A ação integral produz um sinal de saída que é proporcional à magnitude e à duração do erro, ou seja, ao erro acumulado. Isso fornece uma alternativa para corrigir o erro de off-set gerado pela ação integral e acelera a resposta do sistema, permitindo-o chegar ao valor de referência mais rapidamente. O sinal de saída do controlador PI pode ser descrito por :

$$S = k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Onde k_i é a constante integral.

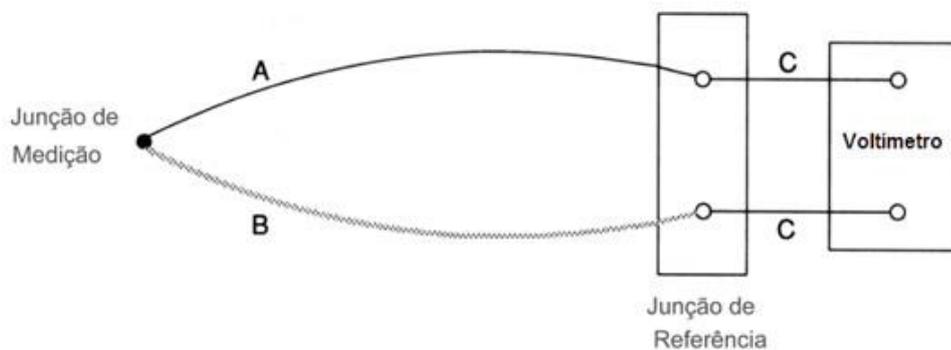
Ação derivativa: A ação derivativa produz um sinal de saída que é proporcional à velocidade de variação do erro:

$$S = k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

A ação derivativa fornece uma correção antecipada do erro, o que conseqüentemente diminui o tempo de resposta e a dinâmica do processo.

2.8 O Termopar

O termopar é uma junção bimetálica que forma um sensor de temperatura. Seu funcionamento se baseia em a geração de uma diferença de potencial em suas extremidades quando a junção bimetálica é exposta a uma diferença de temperatura.

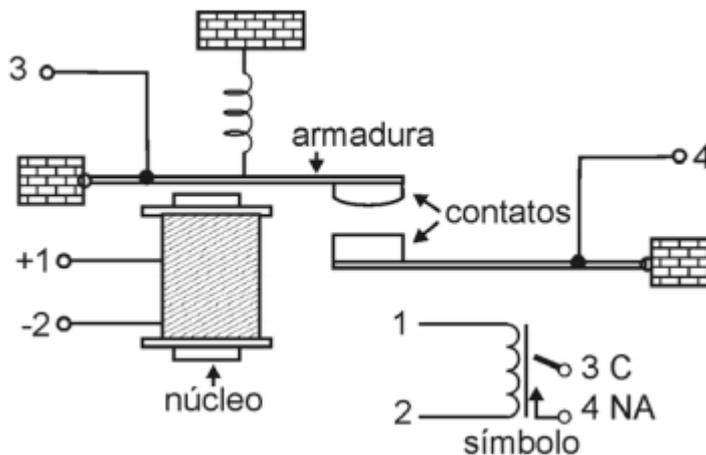


(ECIL, 2017)

Figura 14: Termopar

2.9 O Relé

Os relés são componentes de extrema importância para a evolução da eletrotécnica, eletrônica e automação de modo geral. São compostos de uma estrutura relativamente simples, como constata Braga (2012), nas proximidades de um eletroímã, é posicionada uma armadura que pode se mover, essa armadura é composta por material ferromagnético, quando a bobina é excitada com corrente elétrica, um fluxo magnético é gerado na bobina atrai a armadura e um contato elétrico é fechado, nesse modo permite a passagem de corrente por entre suas extremidades.

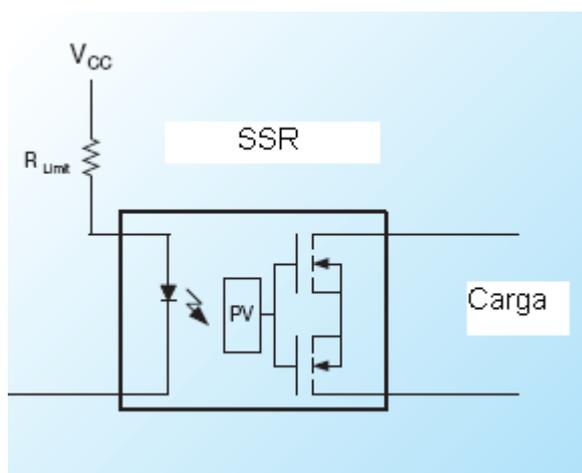


(BRAGA, 2012)

Figura 15: Estrutura de um relé eletromecânico

2.9.1 Relé de Estado Sólido

O relé de estado sólido não possui partes mecânicas, operando por meio de tiristores que comutam quando uma determinada corrente passa por eles, esse é um processo físico que ocorre no tiristor, transistores ou triacs isso elimina a necessidade de contatos metálicos no interior do relé o que aumenta exponencialmente a sua vida útil e a segurança da operação além de eliminar o barulho e requerer cargas menores para a alimentação. (BRAGA, 2012)



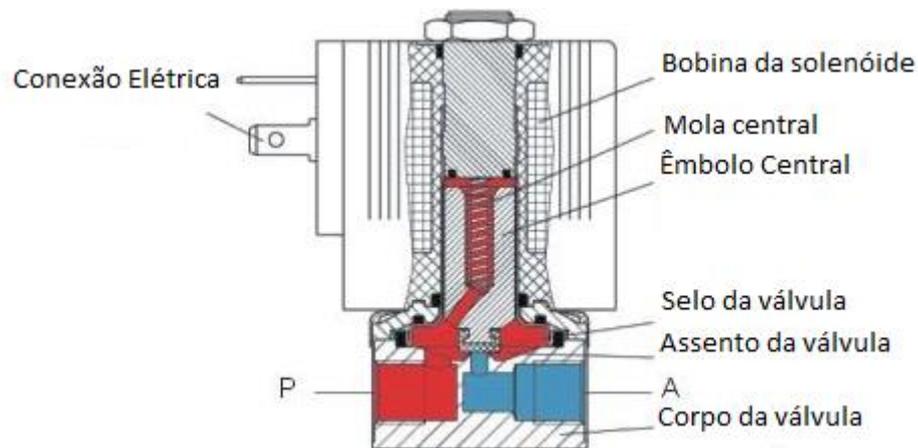
(BRAGA, 2017)

Figura 16: Estrutura de um relé de estado sólido

2.10 Válvula Solenóide

A Válvula solenóide é um mecanismo baseado no eletromagnetismo. Basicamente sua construção é simples formada por um obturador de material ferromagnético capaz

de abrir e fechar a válvula ao se mover. Uma bobina é colocada ao redor do obturador, quando a bobina é energizada, o obturador se move para cima abrindo a válvula e permitindo a passagem do fluido controlado. Ao cortar a energia da bobina, o obturador retorna à sua posição de repouso, a válvula é fechada e interrompe a passagem do fluido controlado.



(BURKERT, 2017)

Figura 17: Válvula Solenóide

2.11 Atuador Linear

Um atuador linear elétrico é um dispositivo que converte o movimento de rotação de um motor de baixa voltagem de corrente contínua em um movimento linear, ou seja, movimento de empurrar e puxar. Desta forma, é possível levantar, ajustar, inclinar, empurrar ou puxar objetos pesados ou difíceis de alcançar, simplesmente pressionando um botão. Além disso, atuadores lineares elétricos proporcionam uma circulação segura, tranquila e limpa com controle de movimento preciso. Eles são eficientes e têm uma vida longa com pouca manutenção. A instalação de um atuador linear elétrico é muito fácil, em comparação, por exemplo, com a de sistemas hidráulicos e ocupa muito menos espaço, uma vez que não tem bombas ou mangueiras. (LINAK, 2017)



(LINAK, 2017)

Figura 18: Atuador Linear

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo apresentaremos as etapas do projeto e os componentes de controle e automação utilizados no projeto e confecção da malha de controle do forno rotativo.

3.1 Engenharia do Processo

A engenharia do projeto pode ser descrita seguindo os seguintes passos:

- Conhecer o objetivo do processo;
- Conhecer as etapas do processo;
- Identificar quais componentes disponíveis poderiam ser reutilizados;
- Levantamento das variáveis manipuladas;
- Levantamento de periféricos faltantes para conclusão do projeto;
- Estudo da viabilidade econômica do projeto;
- Execução do projeto;
- Testes e correções;
- Realização de ensaios automáticos.

3.2 Memorial Descritivo

O equipamento a ser automatizado é um forno de natureza resistiva, que tem a finalidade de realizar ensaios com minérios. Os ensaios realizados no forno fornecem informações importantes sobre o comportamento do material estudado imerso em uma atmosfera redutora e abrasiva, altas temperatura e impacto mecânico. Para isso é utilizada uma combinação de gases específica para cada tipo de estudo e material. A composição física do forno é:

- O forno é horizontal bipartido, com três zonas de aquecimento. Cada zona possui controle de aquecimento independente em malha fechada. As resistências são do tipo kanthal e são embutidas em placas de fibra cerâmica resistente à

1400°C. Um pistão hidráulico com acionamento elétrico é responsável por abrir e fechar o forno.

- A retorta é uma peça de aço inoxidável austenítico para altas temperaturas AISI 310, o qual é projetado para suportar altas temperaturas em atmosfera oxidante. No interior da retorta, existe um compartimento para a introdução da amostra a ser estudada. Por uma das extremidades da retorta é possível inserir a amostra desejada, na outra extremidade é conectada a mangueira de injeção do fluxo de gases responsável por criar a atmosfera almejada pelo usuário.
- O fluxo de gases é controlado por fluxômetros mássicos automatizados que liberam a passagem de gases na proporção pré-programada pelo usuário para uma câmara de mistura. Após a mistura, o fluxo segue para a retorta.
- O painel elétrico é onde todos os controladores e relés responsáveis pelo controle de todo o processo estão alocados.



(FORTELAB, 2017)

Figura 19: Forno Rotativo Linder

3.3 Fluxograma de Operação

Na figura 20 é possível observar o fluxo de operações genéricas do forno a ser automatizado.

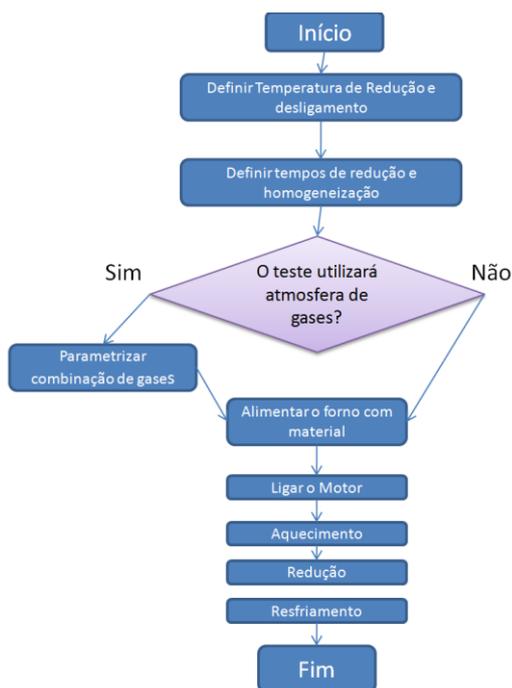


Figura 20: Fluxograma de operações

3.4 Relação de I/O

Variável controlada	TAG	Tipo	I/O
TEMPO DE REDUÇÃO	D450	Real	Saída
TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO	D451	Real	Saída
TEMPERATURA DE RAMPA/REDUÇÃO	D452	Real	Saída
TEMPERATURA DE DESLIGAMENTO	D453	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS N2 - RAMPA	D454	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS N2 - HOMOGENEIZAÇÃO	D455	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS N2 - REDUÇÃO	D456	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS N2 - RESFRIAMENTO	D457	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS CO	D458	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS CO2	D459	Real	Saída
VAZÃO DE GÁS H2	D460	Real	Saída
ETAPA - RAMPA	D24	Real	Virtual
ETAPA - HOMOGENEIZAÇÃO	D25	Real	Virtual
ETAPA - REDUÇÃO	D26	Real	Virtual

ETAPA - RESFRIAMENTO	D27	Real	Virtual
LIGA GERAL	M1	Booleana	Entrada
DESLIGA GERAL	M2	Booleana	Entrada
SET SOLENOIDE CO	Y1	Booleana	Saída
SET SOLENOIDE CO2	Y2	Booleana	Saída
SET SOLENOIDE H2	Y3	Booleana	Saída
SET SOLENOIDE N2	Y4	Booleana	Saída
LIGA MOTOR	M3	Booleana	Entrada
MOTOR	Y5	Booleana	Saída
TEMPERATURA ZONA 1	D461	Real	Entrada
TEMPERATURA ZONA 2	D462	Real	Entrada
TEMPERATURA ZONA 3	D463	Real	Entrada
TEMPERATURA INTERNA	D464	Real	Entrada

Tabela 1: Relação I/O do sistema

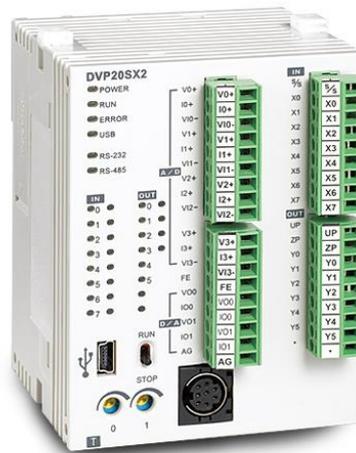
3.5 Descritivo Dos Componentes de Instrumentação e Automação Utilizados

3.5.1 CLP Delta DVP20SX2

O controlador Delta DVP20SX2 possui as seguintes especificações técnicas:

- 08 Entradas Digitais e 04 Saídas digitais
- 04 entradas analógicas (0-10V , -10/-10V e 4-20mA) 12 Bits e 02 saídas analógicas
- Máxima expansão : 512 I/Os
- Capacidade memória: 16K
- Portas Comunicação: USB, RS-485 e RS232
- Maior velocidade de execução: LD: 0,64µs, MOV: 2µs.
- Saída de Pulso de Alta velocidade: Suporta 2 pontos de 100KHz para os modelos a transistor.
- Contadores de Alta Velocidade: 2 Entradas de 100KHz

Este CLP é utilizado no processo para fins de controle de elementos como válvulas solenóide, set-point dos controladores e fluxômetros mássicos, iniciar e finalizar o teste, abrir e fechar o forno e iniciar o motor de rotação. A linguagem utilizada para programar o PLC durante esse trabalho foi o LADDER através da interface de programação e desenvolvimento ISPSOft.



(DELTA, 2017)

Figura 21: CLP DVP20SX2

3.5.2 Controlador de Temperatura Delta DTC1000

O controlador de temperatura DTC1000 é responsável pela lógica de controle de cada zona de aquecimento do forno. O mesmo recebe o sinal dos termopares instalados no forno, realiza os cálculos de uma nova saída de acordo com o sinal de entrada através de um algoritmo de controle PID, o qual as constantes foram calculadas utilizando a função de auto-tuning, e libera o novo sinal de saída através de modulação por largura de pulso para os relés de estado sólido. Controladores dedicados tendem a gerar maior confiabilidade em sua operação.



(DELTA, 2017)

Figura 22: Delta DTC1000

3.5.3 Relé de Estado Sólido CONTEMP CR- 148060DC

Este relé de estado sólido interrompe uma faze da zona resistiva a qual faz parte do controle. O mesmo recebe de forma pulsante o sinal de controle do controlador de temperatura DTC1000 e fecha o circuito durante o tempo em que o nível lógico é alto. Dessa forma existe condução de energia elétrica e a zona resistiva libera calor.



(CONTEMP, 2017)

Figura 23: Relé de Estado Sólido monofásico

3.5.4 Inversor de Frequência Rockwell PowerFlex 4m

Neste projeto este inversor de frequência recebe do CLP um sinal para iniciar o motor de rotação da retorta do forno. O mesmo também é responsável por controlar a velocidade de rotação do forno através da modulação de frequência.



(ROCKWELL, 2018)

Figura 24: Inversor de frequência Rockwell PowerFlex 4m

3.5.5 Atuador Linear LINAK LA31

Quando se deseja abrir o forno, uma chave é atuada e o atuador linear LINAK LA31 recebe do CLP, através de um relé de estado sólido, um sinal para atuar, abrindo o forno. Quando a chave retorna para sua posição de origem, a energia no atuador é cortada e o forno é fechado.



Figura 25: Atuador Linear
(LINAK, 2017)

3.5.6 Controlador e Fluxômetro Mássico ALICAT

Após receber o set-point via sinal analógico do CLP, este dispositivo realiza de forma autônoma o controle e a medição da vazão dos gases necessários para compor a atmosfera desejada para o teste.



(ALICAT, 2017)

Figura 26: Controlador e fluxômetro mássico ALICAT

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SCADA

A fim de substituir a IHM queimada e projetar um novo sistema de controle e automação do forno apresentado neste trabalho, após uma pesquisa de mercado criteriosa em busca do melhor custo x benefício, o software ScadaBR foi escolhido como a opção de interfaceamento homem-máquina, uma vez que é um software *open source* e possui várias funcionalidades robustas e funcionais compatíveis com as necessidades do processo. Neste capítulo abordaremos como foram desenvolvidas as telas do sistema supervisor.

4.1 Confeção das Telas

4.1.1 Tela de Abertura

Na tela de abertura é possível efetuar o login no sistema, a fim de obter maior segurança e controle de acesso.

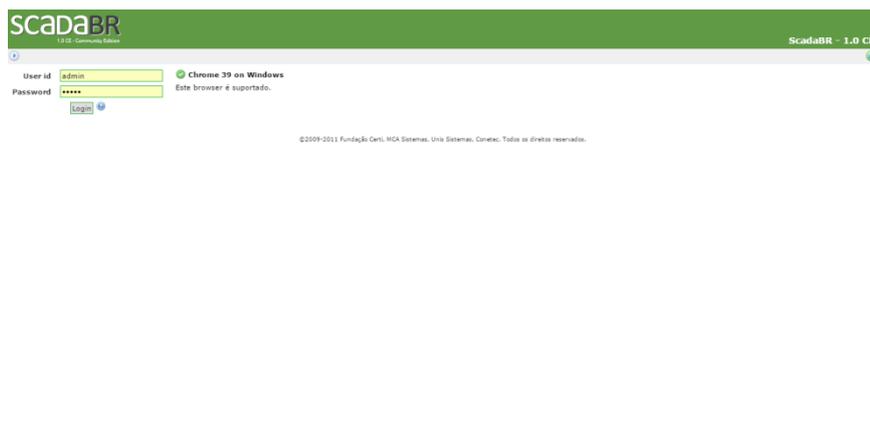


Figura 27: Tela de Abertura

4.1.2 Tela de WatchList

Na tela de WatchList é possível acompanhar, editar e forçar valores em qualquer variável manipulada no sistema, o acompanhamento de todas as entradas e saídas da planta pode ser feito através desta tela em tempo real.

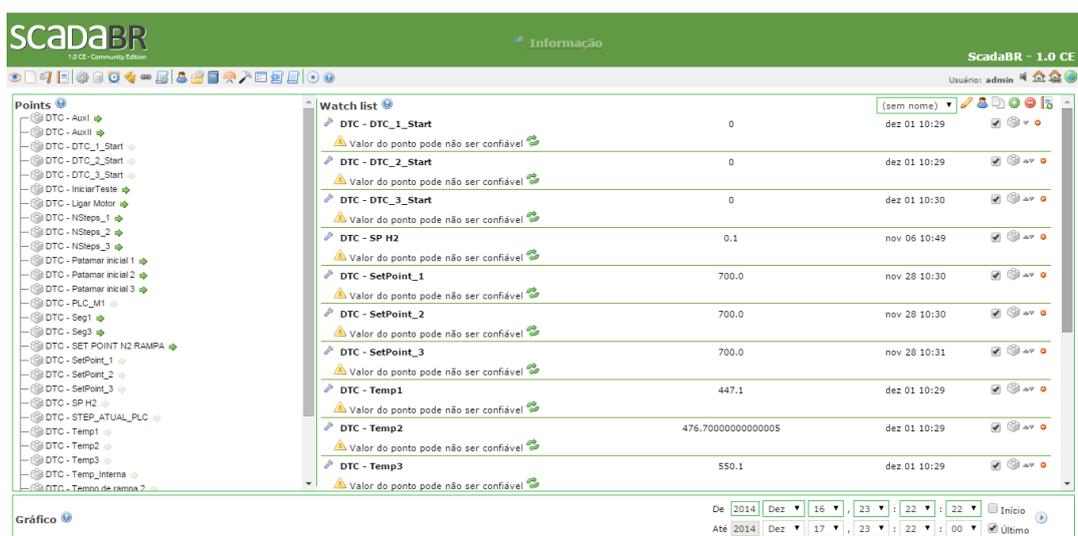


Figura 28: Tela de WatchList

4.1.3 Tela de Representação Gráfica

Na tela de representação gráfica é possível acompanhar os diversos estados do processo, bem como as situações emergenciais, de forma amigável e interativa, a fim de se ter controle pleno e total do processo em questão, além de minimizar os riscos de acidentes e otimizar a produção.

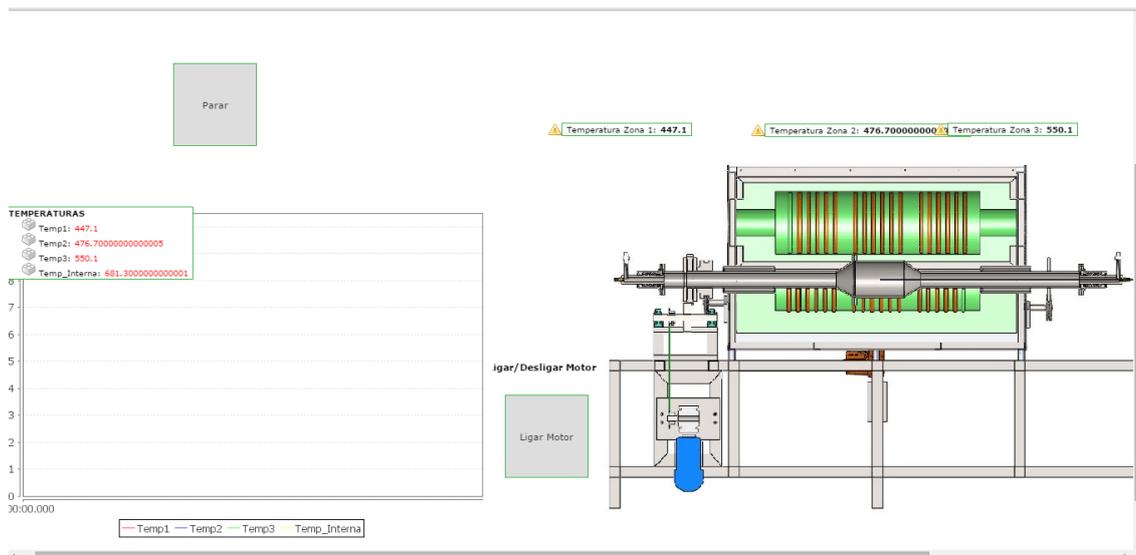


Figura 29: Tela de Representação Gráfica

4.1.4 Tela de Alarmes

Na tela de alarmes é possível controlar todas as situações emergenciais que aconteceram durante o processo, dados esses, que são essenciais para a confecção de relatórios gerenciais.

Id	Nivel de alarme	Tempo	Mensagens	Tempo de inatividade
9508		23:22:18	Usuário admin entrou no sistema	Ativo
9505		23:19:25	Usuário admin entrou no sistema	23:19:35 - Retornou ao normal
9504		dez 15 22:07	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9501		dez 14 17:51	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9499		dez 14 17:49	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9496		dez 13 16:39	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9494		dez 13 16:37	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9491		dez 13 12:14	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9489		dez 12 22:50	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9486		dez 11 10:39	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9484		dez 11 10:37	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9481		dez 10 10:31	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9479		dez 10 10:24	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9476		dez 09 21:03	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9474		dez 09 21:01	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9471		dez 09 14:01	Início do sistema	Retornar ao Normal desabilitado
9469		dez 09 13:57	Desligamento do sistema	Retornar ao Normal desabilitado

Figura 30: Tela de Alarmes

4.1.5 Tela de Relatórios

Na tela de relatórios é possível criar relatórios de várias maneiras, oferecendo a possibilidade de selecionar quais variáveis de processo serão impressas no relatório, bem como o período a ser apreciado.

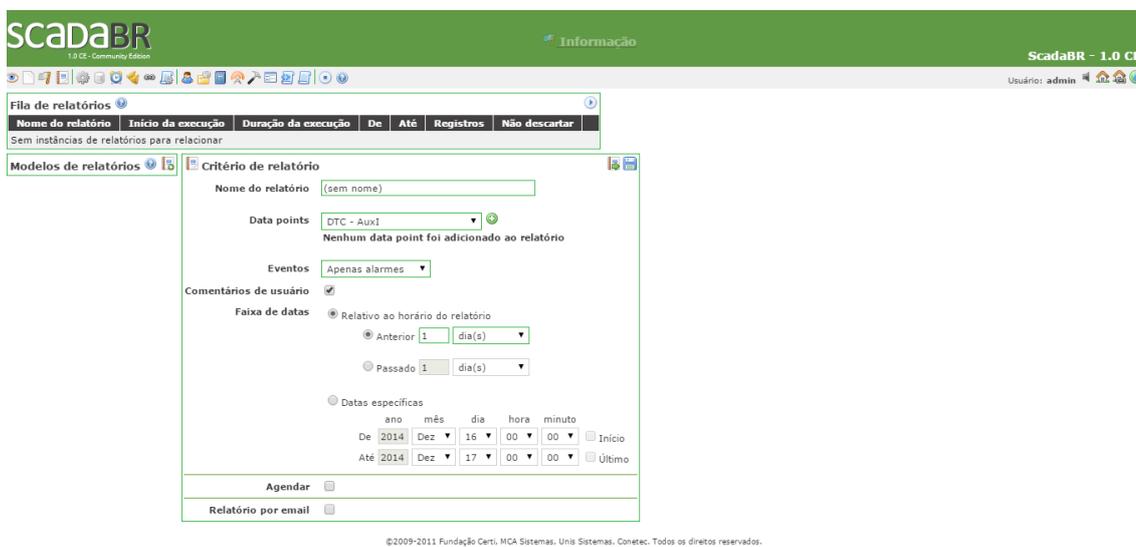


Figura 31: Tela de Relatórios

4.1.6 Tela de Data Sources

A tela de data sources é o ambiente onde são feitas as ligações entre computador e máquinas de campo. Neste ambiente é possível, através de diversos protocolos de comunicação, fazer a conexão com os instrumentos de campo, assim receber e enviar dados. Nesta tela são realizados todos os enlaces de rede, bem como suas configurações. O protocolo de rede utilizado neste trabalho foi o MODBUS RS-485.



Figura 32: Tela de Data Sources

5. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo abordaremos um estudo de caso realizado após a finalização da execução do projeto. Utilizando amostras de pelotas de minério de ferro e seguindo as especificações da norma reguladora ISO 13930 que visa caracterizar o comportamento de minérios de ferro em atmosfera redutora, em um ambiente com temperatura elevada e impacto mecânico, dessa forma é possível verificar ao final do teste o índice de redutibilidade e degradação do material analisado.

5.1 Resumo do Processo

O material é colocado na retorta do forno rotativo que é fechado. Logo após iniciar o processo, o forno é aquecido até uma temperatura parametrizada, enquanto o material é percorrido por um fluxo de nitrogênio de vazão também definida previamente a fim de manter uma atmosfera neutra na amostra.

Após a temperatura externa atingir a temperatura de Set Point, o processo entra em homogeneização. No processo de homogeneização o objetivo é homogeneizar a temperatura interna com a temperatura externa que já atingiu a temperatura de Set Point, o material continua sendo percorrido por um fluxo de nitrogênio contínuo, a fim de manter a atmosfera neutra.

Após a Homogeneização acontece a redução do material, onde o fluxo de nitrogênio contínuo é substituído por um fluxo contínuo de um *blend* de gases, chamado de gás redutor.

Após o final do processo de redução, é feito o resfriamento, onde o fluxo contínuo de gás redutor é substituído novamente por um fluxo contínuo de nitrogênio, a fim de manter uma atmosfera neutra durante o resfriamento da amostra.

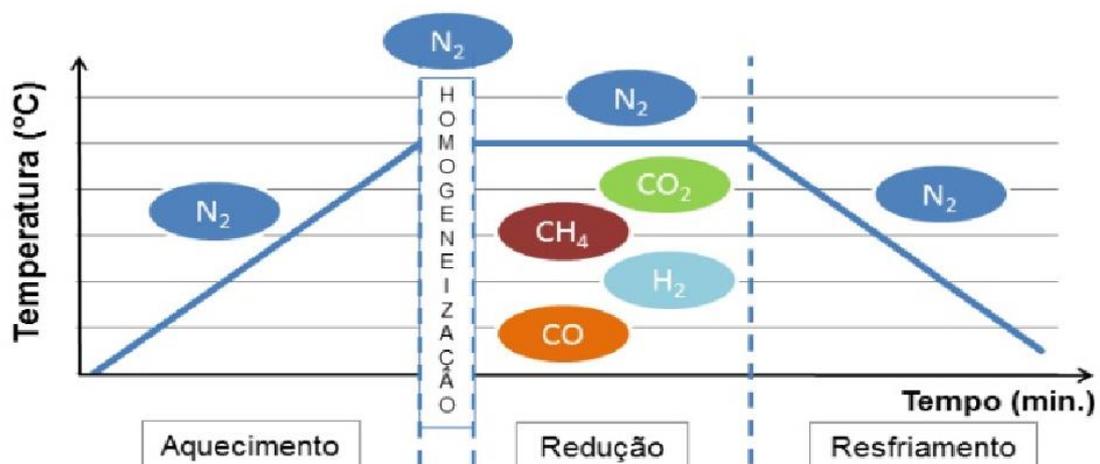


Figura 33: Desenho esquemático do processo.

5.2 Parametrização

Dentro da tela de representação gráfica é possível acessar a tela de parametrização, na qual podemos definir a quantidade de cada gás que será utilizada durante o teste e também os set-points de temperatura e tempo de cada etapa do processo. Neste estudo de caso usaremos a seguinte parametrização:

Set-point de temperatura:

- Redução: 500°C
- Desligamento: 200° C

Set-Point de tempo:

- Homogeneização: 15 minutos
- Redução: 60 minutos

Parametrização de Gases:

Rampa de aquecimento:

- N₂: 20 l/min

Homogeneização:

- N₂: 20 l/min

Redução:

- CO: 4 l/min;
- CO₂: 4 l/min;
- H₂: 0,4 l/min;
- N₂: 11,6 l/min;

Resfriamento:

- N₂: 20 l/min;

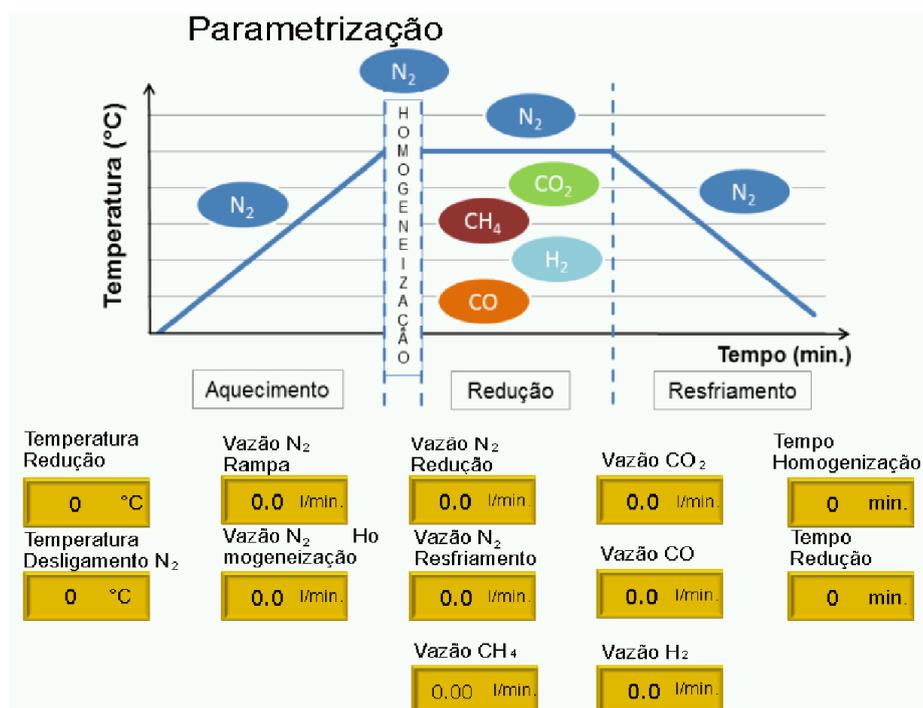


Figura: 34: Tela de Parametrização

5.3 Resultados

5.3.1 Controle de Temperatura

Após a realização do teste, os dados de temperatura foram coletados a cada 5 minutos e apresentados na Tabela 2 e Figura 35.

	Temperatura °C	Temperatura °C	Temperatura °C	Temperatura °C	
Tempo (hh:mm)	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Interna	Etapa Atual
00:00	23,5	23,3	23,5	23	Rampa
00:05	79,1	80,3	78,2	43,4	Rampa
00:10	133	134,4	133,7	94,2	Rampa
00:15	191,3	190	189,6	145,3	Rampa
00:20	243,4	245,8	244,1	201,7	Rampa
00:25	300,2	301,6	300,6	235,2	Rampa
00:30	355,3	356,1	354,7	298,4	Rampa
00:35	413,4	412,3	412,9	320,6	Rampa
00:40	469,3	467,7	466,8	389,3	Rampa
00:45	501,1	500,3	499,6	410,3	Rampa
00:50	500,1	500,3	500,2	435,5	Homogeneização
00:55	500,2	500,3	500,2	469,2	Homogeneização
01:00	500,1	500,3	500,3	498,6	Homogeneização
01:05	500,3	500,2	500,2	499,9	Redução
01:10	500,2	500,1	499,9	500,2	Redução

01:15	500,2	500,1	500	499,9	Redução
01:20	499,9	499,8	499,9	500,2	Redução
01:25	500,1	499,9	500	500	Redução
01:30	500,1	500,1	500,2	500,3	Redução
01:35	500,3	500	500,2	500	Redução
01:40	500,1	500	500,2	500,1	Redução
01:45	500,2	500,1	500,1	500,3	Redução
01:50	500	500,2	500,2	500,1	Redução
01:55	500,1	500,3	500,4	500,2	Redução
02:00	500,3	500,4	500,3	500,3	Redução

Tabela 2: Dados de temperatura do Teste

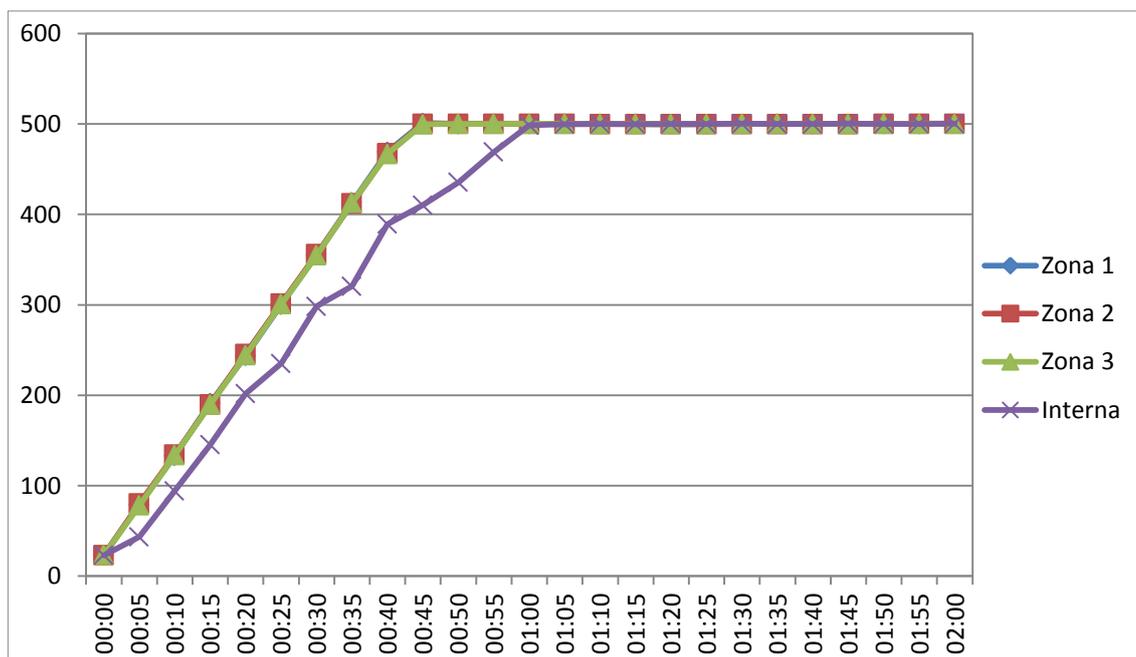


Figura 35: Gráfico Temperatura x Tempo

5.3.2 Análise de Desempenho do Sistema

Após a finalização dos testes foi possível analisar o desempenho dos principais elementos de controle.

5.3.2.1 Controladores de Temperatura

Após analisar os dados adquiridos durante o teste é possível constatar que os controladores de temperatura DTC1000 realizar um controle muito satisfatório, atendendo a norma com excelência e descrevendo uma curva suave de aquecimento conforme desejado. A margem de diferença de temperatura entre zonas foi de no máximo 1°C, e após atingir o set-point, a variação máxima de temperatura foi de 0.4°C, configurando uma ótima estabilidade

Programação LADDER e CLP

A programação se mostrou eficiente e a resposta do CLP ao sistema foi bem rápida e eficaz. Os acionamentos digitais ocorreram de forma instantânea e de forma sempre assertiva. Os set-points analógicos dos fluxômetros mássicos foram configurados com perfeição.

5.3.2.2 Sistema SCADA

O sistema SCADA apresentou algumas limitações de velocidade de comunicação e resposta ao sistema. Aparentemente o software ScadaBR tem dificuldade em trabalhar com vários controladores em paralelo, como é o caso deste trabalho onde o software é mestre de uma rede MODBUS RS-485 e os demais controladores (CLP e DTC1000) são escravos. Muitos dados foram perdidos. Porém, por ser um software *open source* cumpre bem o seu papel.

5.3.2.3 Controle e Medição de Fluxo de Gases

Os fluxômetros mássicos ALICAT forneceram um controle extremamente preciso do fluxo de gases, possibilitando assim uma margem muito alta de confiabilidade no teste, conforme exigido pela norma. São equipamentos altamente tecnológicos e confiáveis.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após concluir este trabalho foi possível compreender melhor o universo da automação industrial como um todo, possibilitando também a aplicação de variados conceitos aprendidos durante o curso.

Quase todos os requisitos do projeto foram cumpridos, com exceção da velocidade e confiabilidade do sistema ScadaBR enquanto trabalhava com múltiplos controladores em paralelo em sua rede MODBUS RS-485, porém por ser um software livre e *open source*, podemos afirmar que cumpriu bem seu propósito e com certeza opera muito bem em sistemas de menor complexidade e robustez.

O sistema em geral se mostrou robusto e estável, os testes posteriores revelaram, após análises químicas, que a qualidade do material testado condizia com os valores teóricos esperados e que estavam dentro dos padrões aceitáveis da norma.

Uma sugestão para trabalhos futuros é a exploração de múltiplos controladores em paralelo utilizando o software ScadaBR com protocolos de rede diferentes como MODBUS RS-232 e MODBUS Ethernet por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WEG: “Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção”. Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em 23 de setembro de 2017

CASSIOLATO, CÉSAR. “Medição de Vazão”. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index40.html>>. Acesso em 23 de setembro de 2017

LINAK.: " ATUADOR LINEAR ELÉTRICO". Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-lei-lenz.htm>>. Acesso em 23 de setembro de 2017

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. "A Lei de Lenz"; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-lei-lenz.htm>>. Acesso em 23 de setembro de 2017

TEIXEIRA, Mariane Mendes. "O que é resistência elétrica?"; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-resistencia-eletrica.htm>>. Acesso em 23 de setembro de 2017.

MUNDO ELÉTRICA. “O que é resistência elétrica? “ Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-resistencia-eletrica/>> Acesso em 23 de setembro de 2017

REFRATIL. “Manta de Fibra Cerâmica” Disponível em: <<http://www.refratil.com.br/produto/fibra-ceramica>> Acesso em 23 de setembro de 2017

ASTM Book of Standards Volume 15.01: Refractories, Activated Carbon; Advanced Ceramics, 2017

D. PETRULZELLA, Frank; Controladores Lógicos Programáveis. 4ª edição. AMGH. 2014, 399p.

C. BRAGA, NEWTON; Relés Circuitos e Aplicações. São Paulo, 2012

HALLIDAY, RESNICK, WALKER; Fundamentos da Física, Vol. 1, 8ª Edição, LTC, 2009

AGUIRRE, L. A.: Enciclopédia de Automática – Controle e Automação, Volume 1 – 1ª Edição, 2007, Blucher. (AGUIRRE, 2007)

OGATA, K.: Engenharia de Controle Moderno – 4ª Edição, 2003, Prentice-Hall. (OGATA, 2003)

GOVERNADOR CENTRÍFUGO. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Governador_centric3%ADfugo&oldid=49577914>. Acesso em: 14 ago. 2017.