



CEFET-MG

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

PAULO CESAR LEAL BERNARDES

**SISTEMAS SUPERVISÓRIOS E REDES INDUSTRIAIS: UM
ESTUDO DE CASO APLICADO À FABRICAÇÃO DE PÓ DE
ALUMÍNIO**

ARAXÁ/MG

2016

PAULO CESAR LEAL BERNARDES

**SISTEMAS SUPERVISÓRIOS E REDES INDUSTRIAIS: UM
ESTUDO DE CASO APLICADO À FABRICAÇÃO DE PÓ DE
ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Automação
Industrial, do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG,
como requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia de Automação
Industrial.

Orientador: Prof. Me. Leandro Resende
Mattioli

ARAXÁ/MG

2016



Serviço Público Federal
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL/ ARAXÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC – ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL do aluno ***Paulo César Bernardes***

Às 14h do dia 03 de agosto de 2016, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Sistemas Supervisórios e Redes Industriais: Um Estudo de Caso Aplicado à Fabricação de Pó de Alumínio** como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Me. Leandro Resende Mattioli, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado: aprovado Com nota final de: 93 / 100.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar a violar direitos de terceiros.

Paulo César Bernardes
Nome do aluno

PAULO CESAR CECIM BERNARDES
assinatura

Araxá, 03 de agosto de 2016.
local e data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 03 de Agosto de 2016.

Leandro Resende Mattioli
Prof. Me. Leandro Resende Mattioli (Orientador)

Prof. Dr. Natal Júnio Pires

Renata Calciolari
Prof. Ma. Renata Calciolari

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Primeiramente a Deus, pois sem ele, nada seria possível, e meus sonhos não seriam concretizados. A minha mãe, que sempre me deu apoio, e esteve presente acreditando em meu potencial. Aos meus professores e colegas de classe que a cada dia me incentivaram a prosseguir nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por iluminar os meus caminhos com a presença de pessoas tão especiais. Por me dar forças para vencer os momentos difíceis; coragem para continuar superando as dificuldades e paciência para não me entregar ao desânimo diante das minhas fraquezas.

À minha mãe por não medir esforços em apoiar-me, e por sempre estar ao meu lado em meio às dificuldades encontradas.

À empresa Fábrica Brasileira de Metais pelo auxílio com informações técnicas necessárias para a elaboração e conclusão do mesmo.

Em especial ao professor orientador Leandro Mattioli, demonstrando paciência e compreensão, sendo assim, de suma importância, tanto na minha formação acadêmica quanto na elaboração desse trabalho.

EPÍGRAFE

Nunca deixe que alguém te diga que não pode fazer algo. Se você tem um sonho, tem que protegê-lo. As pessoas que não podem fazer por si mesmas, dirão que você não consegue. Se quer alguma coisa, vá e lute por ela.

À Procura da Felicidade (2006)

RESUMO

Uma fábrica, localizada na cidade de Araxá, produz pó de alumínio a partir do processo de atomização a ar. Atualmente, sua linha de produção não dispõe de nenhuma automação, sendo assim, necessária intervenção humana em todas as etapas. No geral, a planta possui poucos equipamentos, sendo os principais os dois compressores da marca sueca Atlas Copco. A função destes equipamentos é justamente fornecer ar comprimido para a etapa de atomização, uma vez que a granulometria do pó varia de acordo com a pressão e vazão de ar comprimido disponíveis para operação. Em vista do exposto, este trabalho propõe a concepção de um sistema supervisório baseado em rede industrial Modbus e camada física de comunicação RS-485. Configurado por meio das plantas de pressão, de vazão e de temperatura, presentes no Laboratório de Automação do CEFET-MG / Unidade Araxá, e através de microcontroladores com interface analógica apropriada, emulou-se o funcionamento real de um dos compressores da fábrica. Logo, verificou-se que os objetivos foram alcançados, enquanto que uma futura implantação do sistema supervisório proposto, melhoraria a uniformidade do produto final, e auxiliaria a operação e o setor de manutenção.

Palavras-chave: Compressor. Modbus. RS-485. Pó de Alumínio. Sistema Supervisório. Microcontroladores.

ABSTRACT

A factory located in Araxá, Minas Gerais, Brazil, produces aluminum powder from air atomization. Currently, production line does not have any automation, needing human intervention at all stages. Overall, the plant has no many equipments, and main ones being two compressors of Swedish brand Atlas Copco. The function of these devices is provide compressed air for atomization, because particle size of the powder varies with pressure and flow of compressed air available for operation. In view of the foregoing, this work proposes to design a supervisory control and data acquisition, using Modbus industrial network and RS-485 physical communication. Configured through pressure, flow and temperature plants, presents in the Automation Laboratory of CEFET-MG / Unit Araxá, and through microcontrollers with appropriate analog interface, was possible emulate the actual operation of the compressors. Thus, the objectives were achieved, while a future implementation of the proposed SCADA, will improve the uniformity of the final product, and will help the operating and maintenance.

Keywords: Compressor. Modbus. RS-485. Aluminium Powder. SCADA. Microcontrollers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação esquemática do processo de obtenção do pó na FBM	16
Figura 2: Fluxograma do processo produtivo da fábrica	16
Figura 3: Compressor VSD da FBM	17
Figura 4: Forma construtiva do forno rotativo da FBM.....	21
Figura 5: Moinho de bolas	23
Figura 6: Processo de atomização.....	24
Figura 7: Classificação dos compressores.....	25
Figura 8: Processo de succão (a), compressão (b) e descarga (c) de um compressor parafuso	26
Figura 9: Visor do controlador Elektronikon Graphic	27
Figura 10: Exemplo de uma tela de supervisório	29
Figura 11: Evolução das redes industriais.....	30
Figura 12: Formato de um sistema de comunicação.....	30
Figura 13: Modelo OSI	31
Figura 14: Pirâmide de Automação	32
Figura 15: Pilha de comunicação MODBUS	35
Figura 16: RS-485 HALF-DUPLEX (2 FIOS + terminal comum)	36
Figura 17: RS485 FULL-DUPLEX (4 FIOS + terminal comum).....	36
Figura 18: Distância do cabo versus velocidade de comunicação.....	37
Figura 19: Vista frontal do controlador eletrônico de pressão	40
Figura 20: Vista frontal do controlador eletrônico de vazão.....	41
Figura 21: Vista frontal do controlador eletrônico de temperatura	42
Figura 22: Bornes banana 2 mm.....	43
Figura 23: Vista Superior do Arduino Mega.....	44
Figura 24: Vista Superior do Arduino Nano	45
Figura 25: Montagem inicial	46
Figura 26: Vista traseira do controlador	48
Figura 27: Shield RS-485.....	48
Figura 28: Montagem em Placa Padrão	49
Figura 29: Esquemático.....	50
Figura 30: Circuito impresso e Placa Final	50

Figura 31: Cabo AWG 4x22 com malha	51
Figura 32: Representação esquemática da montagem	51
Figura 33: Máquina de Estados do Módulo Mestre.....	52
Figura 34: Máquina de Estados do Módulo Escravo	53
Figura 35: Gráfico comportamento pressão x vazão	54
Figura 36: Gráfico temperatura do elemento e temperatura ambiente	54
Figura 37: Plano de Fundo da Tela de Supervisão	55
Figura 38: Widget de temperatura	56
Figura 39: Indicação das válvulas de controle manual da planta de vazão.....	57
Figura 40: Indicação das válvulas manuais da planta de pressão.....	58
Figura 41: Válvula manual da planta de temperatura	59
Figura 42: Associação dos Resultados Obtidos: Planta de Vazão.....	60
Figura 43: Leitura de Vazão Calibrada	60
Figura 44: Associação de Resultados Obtidos: Planta de Pressão	61
Figura 45: Leitura de Pressão Calibrada	61
Figura 46: Associação dos Resultados Obtidos: Planta de Temperatura.....	62
Figura 47: Leitura de Temperatura Calibrada	62
Figura 48: Tela de Ajuste: Pó tipo 01	63
Figura 49: Tela de Ajuste: Pó tipo 02	63
Figura 50: Tela de Ajuste: Pó tipo ATR	64
Figura 51: Alarme de Pressão Baixa.....	64
Figura 52: Alarme de Temperatura Alta	65
Figura 53: Alarme de Manutenção	65

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Propriedades do Alumínio	20
Tabela 2: Principais diferenças entre os módulos	26
Tabela 3: Características técnicas do Arduino Mega.....	44
Tabela 4: Características técnicas do Arduino Nano	45
Quadro 1: Formato do <i>frame</i> Modbus RTU	34
Quadro 2: Endereçamento dos Escravos.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AD/DA	Analógico-Digital/Digital-Analógico
AVR	Alf and Vegard Risc processor
AWG	American Wire Gauge
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
DPI	Dots per Inch
ETC	Et cetera
FBM	Fábrica Brasileira de Metais
GND	Ground
ICSP	In-Circuit Serial Programming
LAN	Local-area Network
PIC	Peripherical Interface Controller
PMW	Pulse Width Modulation
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SP	Set Point
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
Vin	Tensão de Entrada
WAN	Wide Área Network

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Objetivos	18
1.2	Organização do trabalho	19
2	Revisão Bibliográfica.....	20
2.1	Processos Metalúrgicos	20
2.1.1	Características do Alumínio	20
2.1.2	Fundição.....	21
2.1.3	Processos de produção do pó	22
2.2	Compressores	24
2.3	Sistemas Supervisórios	27
2.4	Redes Industriais	29
2.4.1	MODBUS.....	33
2.4.2	Protocolo RS-485	35
2.5	Microcontroladores	37
2.5.1	Arduino e AVR	37
2.5.2	PIC	38
3	Metodologia.....	39
3.1	Plantas Didáticas de Controle	39
3.1.1	Planta de Pressão	39
3.1.2	Planta de Vazão	40
3.1.3	Planta de Temperatura	41
3.2	Aquisição de dados e definição de <i>set points</i>	42
3.3	Escolha dos microcontroladores	43
3.4	Conexão serial com as plantas	46
3.5	Camadas física e lógica da rede industrial.....	47
3.6	Construção dos protótipos	49
3.7	Projeto dos módulos mestre e escravo para a rede industrial	50
3.8	Análise de requisitos para a tela de supervisão e concepção do sistema supervisório	
	53	
4	Resultados e Discussão	57
4.1	Regulagem Física	57

4.2	Calibração de Leitura.....	59
4.3	Telas do Sistema Supervisório	62
5	Considerações Finais	66
	Referências	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o mercado global torna-se cada vez mais competitivo, e a redução de mão de obra, o controle da qualidade total e o aumento da produtividade são intenções comuns no que se refere à permanência e ao crescimento das empresas no mercado. Sendo assim, o uso de novas tecnologias aplicadas à automação deixa de ser um luxo passando a ser uma necessidade.

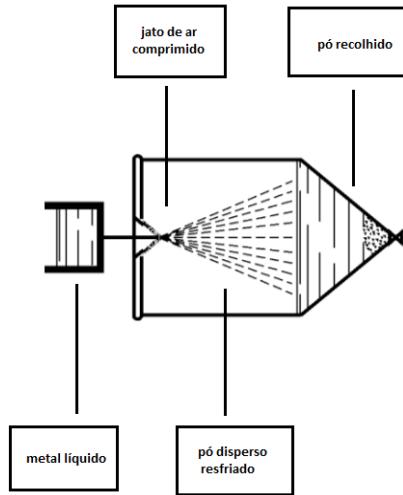
Uma metalúrgica de médio porte, chamada FBM – Fábrica Brasileira de Metais – recém instalada em Araxá/MG, possui como matérias primas: (i) o lingote de alumínio primário (pureza acima de 99%) e (ii) o lingote de alumínio mole (pureza entre 97% e 99%), que são enviados pelo próprio cliente, uma mineradora localizada na mesma cidade. Após o processo de industrialização desses lingotes, a FBM retorna o material em formato de pó de alumínio com o rendimento de 98% do material bruto recebido.

A mineradora possui vários fornecedores de pó de alumínio, espalhados entre os estados de Minas Gerais e de São Paulo. Seu produto final é o nióbio em suas diversas formas (sólido, grãos *etc.*). Esse elemento químico possui uma elevada temperatura de fusão (2468 °C), que pode ser alcançada com o auxílio do pó de alumínio, com o qual o processo de aluminotermia é realizado. Nos processos aluminotérmicos, o pó de alumínio age como redutor de óxidos metálicos e fonte geradora de calor para a obtenção de outros metais, como ligas de ferro, ligas não-ferrosas e metais puros. Dentre estes materiais destacam-se ferro-nióbio, ferro-vanádio, ferro-molibdênio, ferro-titânio e cromo metálico.

O pó de alumínio é feito a partir do processo de atomização¹. O metal fundido é vazado por um orifício, formando um filete líquido que é “bombardeado” por jatos de ar comprimido. Estes jatos produzem a pulverização do filete e seu imediato resfriamento. Depois, o pó é recolhido, peneirado, embalado e finalmente destinado a expedição. A figura 1 indica como é produzido o pó de alumínio na FBM.

¹ Apesar de não ocorrer a fragmentação do átomo de alumínio, o termo “atomização” é comumente utilizado na metalurgia do pó.

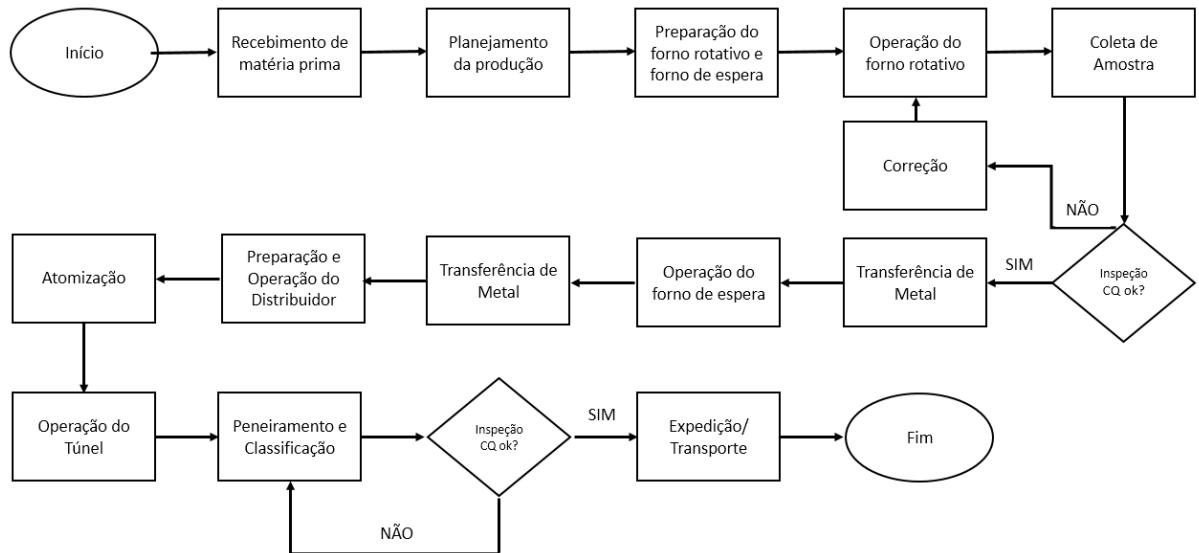
Figura 1: Representação esquemática do processo de obtenção do pó na FBM



Fonte: Autoria Própria

A FBM possui um processo produtivo simples e não dispõe de automação em sua linha de produção, fato que exige muito cuidado e atenção de seus colaboradores, sendo necessária a intervenção humana em todos as etapas. A figura 2 ilustra as fases de todo o processo, desde a obtenção da matéria prima, até a expedição do produto acabado.

Figura 2: Fluxograma do processo produtivo da fábrica



Fonte: Autoria Própria

No geral, a planta possui poucos equipamentos, sendo os principais os dois compressores da marca sueca Atlas Copco. Ambos são compressores de parafuso de um estágio, injetados a óleo, acionados por um motor elétrico. A função desses compressores é justamente produzir o ar comprimido para a etapa de atomização. A granulometria do pó varia de acordo com essa

pressão de ar disponível para trabalho, pois influencia diretamente na pulverização. Em outras palavras, a pressão e a vazão de ar, geradas pelos compressores são um dos fatores responsáveis pela qualidade do produto final. Nos dias atuais, na referida fábrica, esse controle é feito de forma manual, podendo ocasionar em esquecimentos dos colaboradores ou em erros de operação. A figura 3 representa um dos compressores da FBM.

Figura 3: Compressor VSD da FBM



Fonte: Autoria Própria

Durante a compra do pó de alumínio, a mineradora sempre exige de seus fornecedores que o material esteja dentro de padrões que ela necessita, tendo em vista suas aplicações internas. Para o pó de alumínio, as exigências são: granulometria (tamanho dos grãos) e química, como, por exemplo, teor de cobre, manganês, ferro, chumbo, entre outros elementos. Obviamente, a qualidade do produto de cada fabricante está intimamente ligada à capacidade em atender a essas exigências.

O Brasil possui 7 fabricantes de pó de alumínio, tornando o mercado da metalurgia do pó competitivo, e um erro na qualidade de produto acabado poderia resultar, em larga escala, no fechamento de uma fábrica. Em vista desse contexto, com este estudo, intenta-se criar um protótipo de sistema supervisório com a finalidade de monitorar, em tempo real, os parâmetros de exercício dos compressores da fábrica. Para tanto, são utilizadas algumas plantas presentes no Laboratório de Automação do CEFET-MG / Unidade Araxá, de forma a emular a operação de um deles. Integrando as plantas de vazão, pressão e temperatura, é

possível imitar o funcionamento básico do compressor, uma vez conhecidas as relações entre as grandezas. Estas, por sua vez, podem ser medidas e enviadas a uma ou mais telas de supervisão. Desta maneira, o protótipo fornece a base para a verificação da aplicabilidade do sistema no equipamento. Logo, neste trabalho, parte-se da seguinte pergunta de pesquisa: é possível implantar um sistema supervisório que possibilite monitorar o compressor a longa distância e que determine ajustes pré-definidos, tendo em vista as variáveis mencionadas?

Tendo em vista o exposto, este trabalho se justifica, haja vista a proposta de implantar um sistema supervisório na FBM. Com a instalação de um sistema supervisório específico para os dois compressores, a referida fábrica daria o primeiro passo para sua modernização, e, através do monitoramento das variáveis do processo produtivo, seria possível determinar níveis ótimos de trabalho. Além disso, os dados apresentados pelo supervisório auxiliaria na manutenção. Ademais, devido à rapidez da leitura dos parâmetros de campo, as intervenções necessárias poderiam ser feitas precocemente, isso porque problemas de parada de máquina por defeitos seriam diagnosticados mais pontualmente e os *setups* de máquina também seriam agilizados.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo interligar as plantas do laboratório, já mencionadas, para emular o funcionamento do compressor, monitorando e definindo seus parâmetros através de um sistema supervisório. Para o alcance deste objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram delimitados:

- conhecer o processo de fabricação de pó de alumínio;
- estudar e analisar o funcionamento dos compressores;
- conceber uma rede industrial, definindo a camada física e a camada lógica;
- prototipar um sistema microprocessado para interface com as plantas de pressão, de vazão e de temperatura;
- conceber uma tela de supervisão para o monitoramento do estado do compressor e definição de pontos de operação;
- emular o funcionamento do compressor, deixando algumas variáveis do processo em função de outras, mesmo as plantas estando separadas fisicamente;
- proceder com testes e validações a fim de verificar a qualidade da solução desenvolvida.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo aborda a motivação para o trabalho e delimita os principais objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2, os fundamentos teóricos dos principais temas associados ao trabalho e à sua aplicação são apresentados.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada para alcançar os resultados.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos durante os testes da solução concebida.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos Metalúrgicos

2.1.1 Características do Alumínio

O alumínio possui ponto de fusão de 660°C (quando na pureza de 99,80%), o que é relativamente baixo comparado ao do aço, que é da ordem de 1540°C. Ligas de alumínio, devido à presença de outros metais, possuem, em grande parte, um ponto de fusão mais baixo que o alumínio puro. A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é cerca de 2,70 g/cm³, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.

Quando o alumínio líquido é exposto à atmosfera, forma-se imediatamente uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção, eleva sua resistência à corrosão. O alumínio é altamente resistente ao tempo, mesmo em atmosferas industriais, que frequentemente corroem outros metais, como por exemplo, o zinco (ABAL, 2007). A tabela 1, compara algumas propriedades do alumínio com outros elementos.

Tabela 1: Propriedades do Alumínio

	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm ³)	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de Elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coeficiente de Dilatação Térmica (L/°C)	23×10^{-3}	$11,7 \times 10^{-3}$	$16,5 \times 10^{-3}$
Condutibilidade Térmica a 25 °C (cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94

Fonte: Adaptado de Manual do Alumínio (ABAL, 2007)

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato do alumínio poder combinar-se com a maioria dos elementos de liga, e a partir dessa combinação ser possível obter características ajustadas de acordo com a

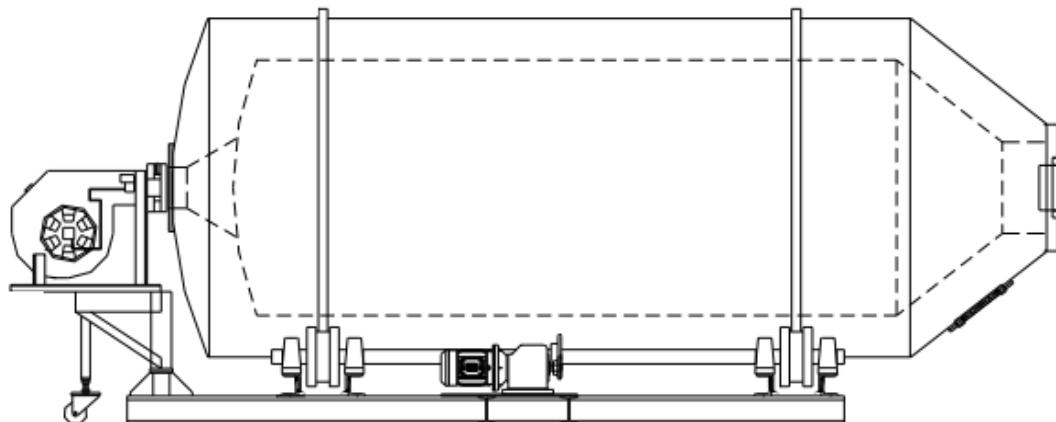
aplicação do produto final. Naturalmente, uma só liga não pode combinar todas as propriedades ótimas para cada aplicação, sendo necessário conhecer-se as vantagens e limitações de cada uma delas para que se possa fazer a melhor seleção.

2.1.2 Fundição

A fundição é um dos procedimentos mais antigos utilizados na produção de artigos de metal. Ainda que antigamente era uma arte e a qualidade do produto dependia da habilidade dos artesãos, a tecnologia moderna do alumínio fornece excelente condição qualitativa com controles científicos adequados para que se possa produzir grandes quantidades de peças, mantendo-se uma boa qualidade uniforme.

Os principais equipamentos para fusão de metais na fundição são: o forno elétrico de indução, o forno elétrico a arco, e o forno cadiño. Cada um destes equipamentos tem uma aplicabilidade industrial específica. Esta aplicabilidade depende da escala de produção e do controle metalúrgico do processo. A FBM possui um forno do tipo cadiño, rotativo, e à GLP, com capacidade fundição de 1200 quilos por hora. A figura 4 representa o forno rotativo da fábrica.

Figura 4: Forma construtiva do forno rotativo da FBM



Fonte: Material FBM

Revestidos internamente por tijolos refratários, devem ser mantidos bem ajustados na forma circular do forno, para que não produzam rachaduras ou formação de irregularidades na parte interna, as quais podem produzir perda de calor. Além disso, a incidência da chama com

maior intensidade em determinados pontos do forno, pode causar a sua queima desigual, diminuindo consideravelmente a vida útil do equipamento.

No queimador ocorre a mistura do ar com o GLP. Quando aceso, tem-se a chama circulando nas paredes internas do forno. Quando há queima completa do combustível, tem-se uma chama dita neutra e uma queima dita estequiométrica. Quando tem-se excesso de ar a chama é dita oxidante. Quando tem-se falta de ar ou excesso de combustível, existe uma chama dita redutora. Distingue-se a chama oxidante quando a cor é brilhante, de cor verde amarelada. A chama redutora, por sua vez, aparece com uma coloração amarelo e com a presença de fumaça preta e densa. Uma chama redutora gera desperdício de combustível e maior impacto ambiental. Por outro lado, a chama oxidante tem mais ar do que o necessário, elevando a quantidade de gases que saem de dentro do forno, diminuindo a temperatura de chama e consequentemente aumentando o consumo de combustível.

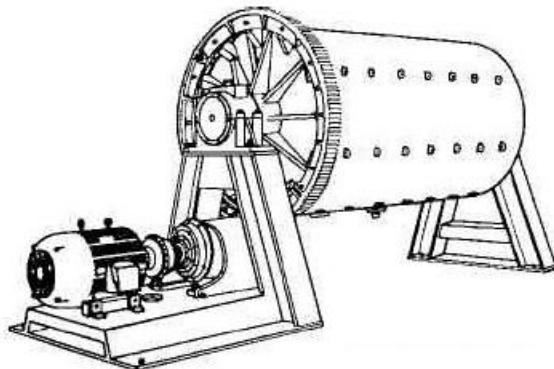
A pressão do ar para combustão é fornecida por um motor elétrico de elevada rotação afixado ao lado do forno. O ar é conduzido ao queimador por tubulações e a pressão do ar é ajustada por um controle manual de uma válvula borboleta.

2.1.3 Processos de produção do pó

Existem vários processos para obtenção de pó metálico, sendo que sua escolha depende do conjunto de propriedades do material e das características requeridas para o pó, em função da aplicação pretendida. Os principais são:

Métodos mecânicos (quebra e moagem): indicado para materiais frágeis ou fragilizados por algum processo anterior, consiste em fragmentar o material com o auxílio de martelos ou moinhos até um determinado tamanho de partícula. Os moinhos mais comuns são de bolas, vibratórios e de atrito (MORO; AURAS, 2007). A figura 5 ilustra um moinho de bolas.

Figura 5: Moinho de bolas

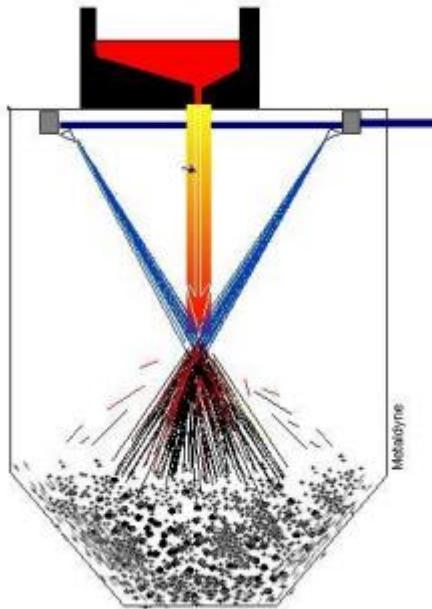


Fonte: MORO; AURAS, 2007

Cold-stream: aumenta a fragilidade dos metais em temperaturas baixas para sua transformação em pó. O pó ainda grosso é arrastado por um fluxo de gás sob alta pressão, através de um tubo, alcançando uma câmara grande, que é mantida sob vácuo. Ao atingir a câmara, o gás sobre uma expansão com consequente diminuição brusca de temperatura. O pó em alta velocidade, colide com um alvo instalado dentro da câmara, e como encontra-se relativamente frágil por causa da baixa temperatura, partem-se em partículas menores. O pó que já apresenta um tamanho suficientemente pequeno é separado da fração gasosa, a qual é novamente reconduzida ao processo (MORO; AURAS, 2007).

Atomização: neste processo o metal fundido é vazado através de um orifício apropriado a essa operação, formando um filete líquido que é atacado por jatos de ar. Esses jatos provocam a pulverização do filete e seu imediato resfriamento. O pó recolhido é reduzido e peneirado, estando pronto para ser usado. O tamanho e a forma das partículas variam em função da espessura do filete, e da pressão do fluido (MORO; AURAS, 2007). Existe também atomização a água, que não se aplica à FBM. Nesse tipo de processo, a água normalmente conduz a partículas irregulares, enquanto que a atomização ao ar produz partículas mais esferoidais. Muito utilizado para produção de pó de ferro. A figura 6 ilustra o processo de atomização a ar.

Figura 6: Processo de atomização



Fonte: Alcoa

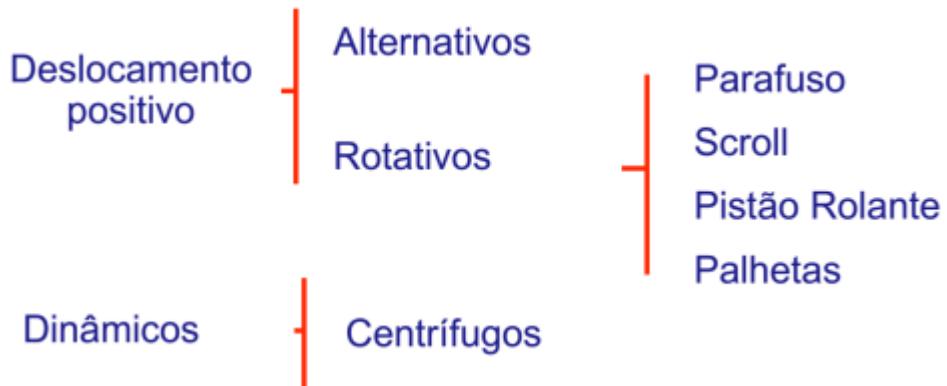
Processo de redução química: Os processos de redução de compostos de metais com agentes redutores gasosos ou sólidos representam o grupo de processos mais significativos para obtenção de pós. Os agentes redutores mais utilizados são o carbono e o hidrogênio. A redução com o carbono só é utilizável para elementos metálicos que não formam carbonetos muito estáveis a não ser que deseja-se obter pó de carboneto como produto final e não o pó metálico, como no caso o carboneto de tungstênio (MORO; AURAS, 2007).

Processo de eletrólise: Os pós produzidos por esse processo, apresentam elevada pureza, baixa densidade aparente e tem grãos de estrutura nitidamente dendrítica. Após recolhido dos tanques de eletrólise, a massa de pó sob a forma de uma lama é secada e classificada por peneiramento (MORO; AURAS, 2007).

2.2 Compressores

Compressores são máquinas responsáveis por admitir o ar da atmosfera, comprimi-lo e enviá-lo para um reservatório de armazenamento. Quando o ar atmosférico entra no compressor, é comprimido pela máquina a uma pressão maior que a externa e descarregado em um sistema de tubos. Os compressores podem, em geral, ser divididos em dois tipos: os compressores de deslocamento positivo e o compressor dinâmico. A figura 7 representa a classificação dos compressores e suas divisões.

Figura 7: Classificação dos compressores

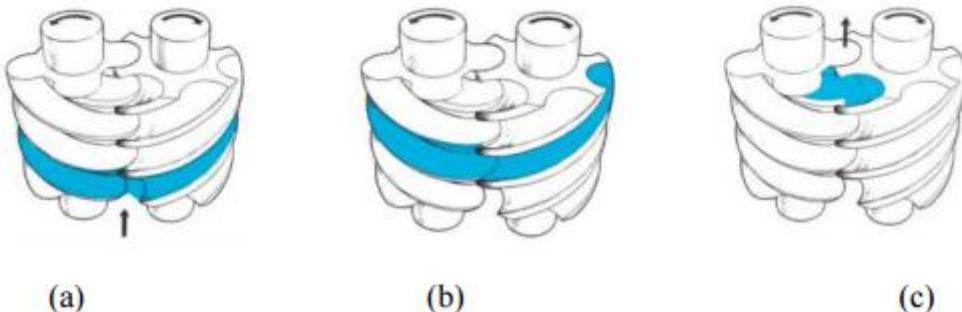


Fonte: (Neto, 2000)

Os compressores de deslocamento positivo aumentam a pressão do vapor do refrigerante, através da redução do volume da câmara de compressão. Exemplos desses compressores são os alternativos e os rotativos. Os compressores dinâmicos aumentam a pressão do vapor do refrigerante através da transferência contínua de momento angular pelas pás do rotor, acelerando o refrigerante, seguido de uma conversão desse momento em um aumento de pressão, isso é, a conversão da energia cinética em energia de pressão. Os compressores centrífugos são exemplos de compressores dinâmicos.

O compressor da FBM, é do tipo parafuso. Possui dois rotores em forma de parafusos que giram em sentidos contrário, mantendo entre si uma condição de engrenamento. A conexão do compressor com o sistema se faz através das aberturas de sucção e descarga, diametralmente opostas. O ar penetra pela abertura de sucção e ocupa os intervalos entre os filetes dos rotores. A partir do momento em que há o engrenamento de um determinado filete, o ar nele contido fica encerrado entre o rotor e as paredes da carcaça. A rotação faz então com que o ponto de engrenamento vá se deslocando para frente, reduzindo o espaço disponível para o ar, provocando sua compressão. Finalmente, é alcançada a abertura de descarga, e o ar é liberado. A figura 8 ilustra esse processo.

Figura 8: Processo de sucção (a), compressão (b) e descarga (c) de um compressor parafuso



Fonte: (Neto, 2000)

A Atlas Copco, marca fabricante dos compressores da FBM, é uma empresa sueca que foi fundada em 1873, tendo sua sede em Estocolmo. É altamente especializada nos campos de compressores e possui uma vasta série de equipamentos. Um dos compressores da fábrica é denominado GA 55VSD (Accionador de Velocidade Variável), o qual possui um inversor de frequência que modula o funcionamento do motor, ajustando automaticamente o suprimento de ar a sua demanda com uma grande faixa operacional. De forma breve, o inversor nada mais é do que um equipamento eletrônico capaz de variar a velocidade de giro de motores elétricos trifásicos, ao contrário do compressor GA 75FF (Full Feature), que não possui o inversor de frequência e trabalha sempre com seu motor a 100% da capacidade de potência. Aqui o modo de operação nada mais é do que um controle on/off: quando há necessidade de ar na linha, o motor permanece ligado no máximo, caso contrário, totalmente desligado.

Os dois compressores acima citados possuem módulos avançados de controle e monitoramento, denominados Elektronikon®² Graphic e Elektronikon® Standard. Trata-se de um módulo de interface homem-máquina que mostra o estado geral de desempenho do equipamento, com indicações proativas de assistência e alarmes de avarias, além de possibilitar a integração do sistema de controle de processo. A tabela 2 mostra algumas diferenças entre os módulos, e a figura 9 ilustra o visor do Elektronikon® Graphic.

Tabela 2: Principais diferenças entre os módulos

	Standard	Graphic

² Marca registrada da Atlas Copco.

	Display	Ícones	Gráfico
Entradas Digitais	4	10	
Entradas Analógicas	4	7	
Saídas Digitais	6	9	
Conexões CAN	1	2	
RS-485	N/A	1	

Fonte: Adaptado manual Atlas Copco GA 30-55 VSD

Figura 9: Visor do controlador Elektronikon Graphic



Fonte: Manual Atlas Copco

2.3 Sistemas Supervisórios

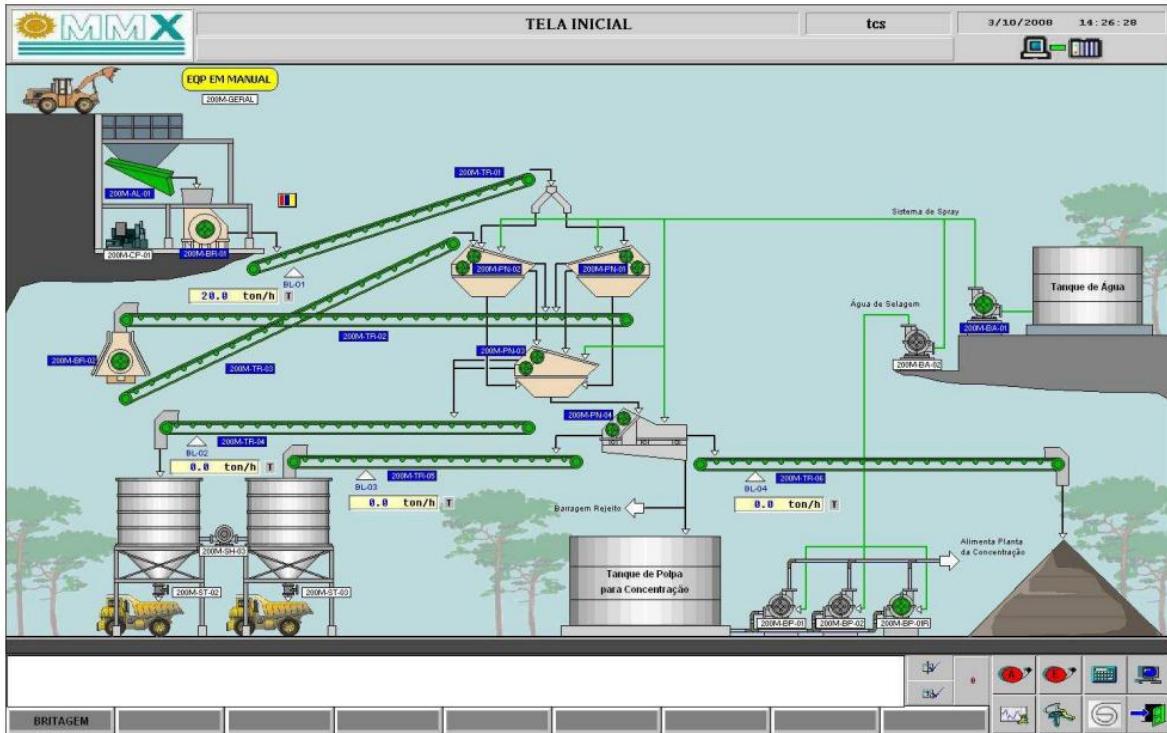
Há alguns anos todos diriam que a função do sistema supervisório era permitir a visualização e a operação de um processo de maneira remota, através de uma interface homem máquina. Certamente essa continua sendo a função primordial do supervisório ou sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), mas definitivamente não é a única.

O uso do supervisório abriu um universo de possibilidades. Ao tornar a operação de suas plantas mais eficiente e confiável, através da visualização dos dados de processo em tempo real, as indústrias passaram a basear seus relatórios e ferramentas gerenciais nos dados provindos do sistema de supervisão. Essa demanda, aliada à evolução tecnológica dos computadores e à acirrada concorrência entre os fabricantes, fez com que a tecnologia SCADA passasse continuamente por melhorias e modificações em sua estrutura.

Hoje, os sistemas SCADA podem ter uma arquitetura aberta, ligada em rede, de forma a permitir que o fluxo de dados do processo ultrapasse o limite das paredes da empresa e percorra o mundo através dos meios de comunicação existentes. Nos dias de hoje, os softwares supervisórios mais utilizados no mercado são: Elipse, WinCC, Intouch, ScadaBR e o Laquis.

Num ambiente industrial, esses sistemas auxiliam na gestão da produção, porque possibilitam: comunicações significativamente melhores entre todas as áreas da operação, um melhor planejamento da produção; um melhor rastreamento das ordens de produção, incluindo listas de materiais, além de uma melhor administração do plano de produção; um acompanhamento mais preciso dos níveis de estoque alocado e real de matérias-primas e produtos acabados; uma melhor administração e manutenção dos equipamentos da planta, incluindo o acompanhamento de defeitos e a programação de ordens de trabalho para manutenção. A figura 10 ilustra a tela de um sistema supervisório.

Figura 10: Exemplo de uma tela de supervisório

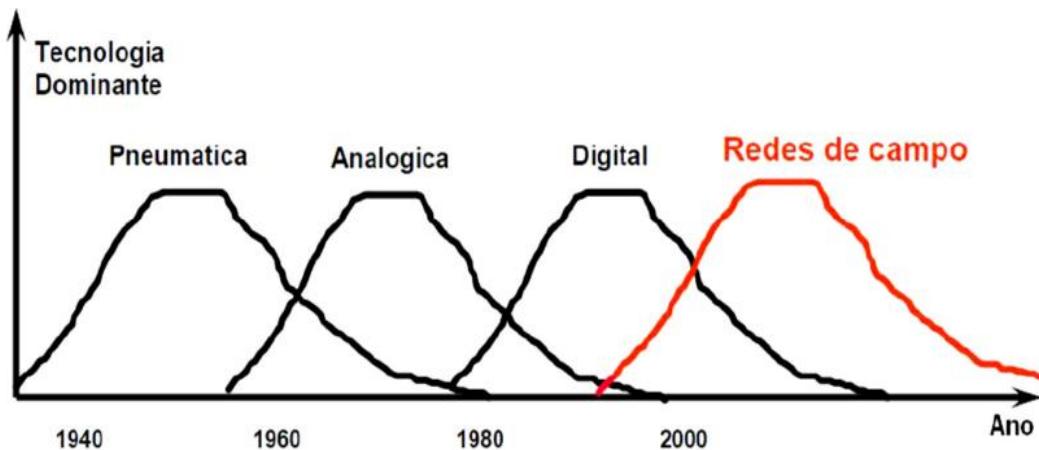


Fonte: SMAR

2.4 Redes Industriais

Os sistemas para controle de processos foram desenvolvidos de forma a maximizar a produção e minimizar seus custos, além de eliminar possíveis riscos envolvidos na produção. Tarefas que antes implicavam em alto risco para operadores de equipamentos podem ser realizadas remotamente sem qualquer risco. Surgiram em meados de 1940, baseados primariamente em tecnologia mecânica e pneumática. Posteriormente foram substituídas no ambiente industrial por sinais elétricos analógicos, abordagem que ganhou grande impulso nos anos 1950, com o surgimento dos controladores eletrônicos, que permitiam maiores distâncias de transmissão. A figura 11 mostra a evolução das redes industriais.

Figura 11: Evolução das redes industriais



Fonte: Aula III – redes industriais (Escola Politécnica)

Um sistema de comunicação simples é formado por: fonte de informação, transmissor, canal (ou meio) de transmissão, receptor e destino. Representado pela figura 12, o objetivo é enviar o conteúdo de uma mensagem (informação) de um local (transmissor) para outro (receptor). Os sistemas de comunicação podem ser classificados quanto à natureza da informação transmitida em analógico ou digital. Uma fonte de informação analógica pode ser convertida para digital por um processo chamado conversão A-D (analogico-digital). O termo “analógico” está relacionado à palavra análogo, pois o sinal que ele representa tenta transmitir de modo fiel o processo físico correspondente. Para a obtenção de um sinal digital a partir de sua representação analógica é preciso realizar um processo conhecido como conversão analógico-digital.

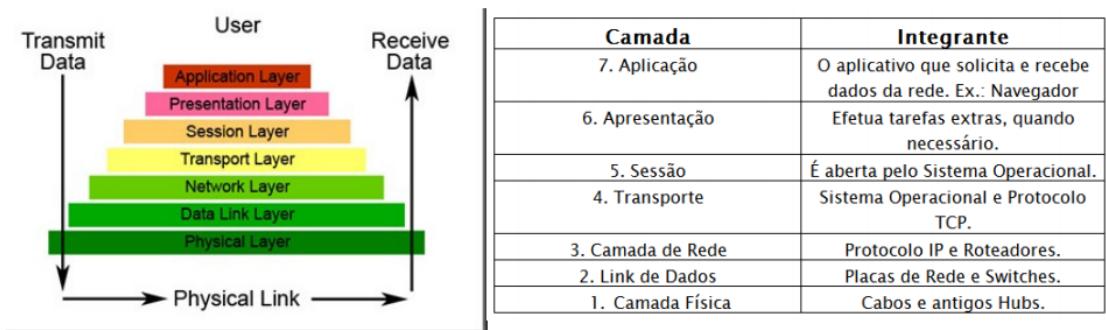
Figura 12: Formato de um sistema de comunicação



Fonte: Aula III – redes industriais (Escola Politécnica)

O modelo OSI (Open Systems Interconnection), representado pela figura 13, foi definido com o objetivo de padronizar o modo de conexão de redes de dados, possibilitando a interconexão entre redes de diferentes padrões e protocolos. O padrão define sete camadas, cada uma com funções próprias e bem definidas. As camadas adjacentes se comunicam através de interfaces específicas.

Figura 13: Modelo OSI

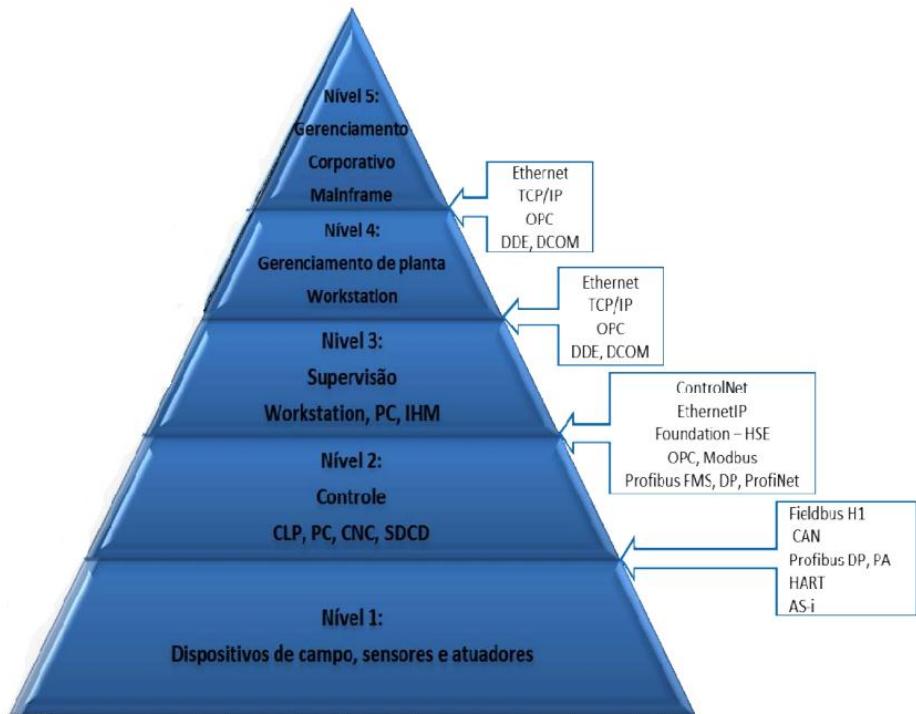


Fonte: Aula III – redes industriais (Escola Politécnica)

Os sistemas de automação industrial utilizam tecnologias de computação e de comunicação para automatizar o monitoramento e o controle dos processos industriais, efetuando coleta de dados em ambientes dispersos geograficamente, e a respectiva apresentação de modo amigável para o operador. A rede de comunicação é a plataforma por meio da qual as informações fluem (Silva e Salvador, 2014). De forma sucinta, a utilização da rede industrial permite a comunicação rápida e confiável entre equipamentos e o uso de mecanismos padronizados, que hoje em dia, são fatores indispensáveis no conceito de produtividade industrial.

Na atualidade descreve-se os diversos sistemas que coordenam o processo produtivo através de modelos conceituais. Devido à complexidade destes sistemas é comum estruturá-los em níveis hierárquicos para facilitar a compreensão. Cada nível hierárquico tem associado um nível de comunicação com exigências próprias na rede. A pirâmide abaixo apresenta esses níveis existentes dentro das empresas e classifica cada tipo de rede industrial.

Figura 14: Pirâmide de Automação



Fonte: SMAR

O primeiro nível representa o chão de fábrica, máquinas e componentes, além dos equipamentos que executam controle automático distribuído. No segundo nível se encontra equipamentos que executam o controle automático centralizado ou não das atividades da planta. O terceiro nível permite a supervisão e otimização de processo. Normalmente possui banco de dados com informações relativas ao processo. Já o quarto nível é responsável pela programação e pelo planejamento de produção, realizando o controle, agendamento e a logística de suprimentos. E por fim, o quinto nível que administra todos os recursos da empresa. Neste nível encontra-se software para gestão de vendas e financeira.

Cada tipo de rede industrial se encaixa entre as camadas acima conforme demonstrado. A rede SENSORBUS é uma rede de nível mais baixo, geralmente usada para ligar pequenos sensores e equipamentos simples. Se preocupa em manter os custos de conexão o mais baixo possível. Os tempos de reação são da ordem de milissegundos. Distância máxima de operação em torno de 200 metros. São exemplos as redes Seriplex, ASI e CAN (Borges, 2008 e Montez, 2005).

A rede DATABUS possibilita a comunicação entre os sistemas de supervisão e os ERP's. Os tempos de reação são da ordem de segundos até minutos, com distâncias máximas de 100 km. Utiliza rede Ethernet, como LAN, WAN, Internet (Borges, 2008).

Rede DEVICEBUS é encontrada entre as redes Sensorbus e Fieldbus cobrindo cerca de 500m de distância. Os equipamentos conectados a Devicebus possuem pontos discretos, dados analógicos ou uma mistura dos dois. Em algumas dessas redes é permitido transferir blocos em prioridade menor se comparado aos dados no formato de bytes. Possui os requisitos de transferência rápida (ordem das dezenas de milissegundos) de dados como da rede Sensorbus, conseguindo lidar com mais equipamento. São exemplos as redes DeviceNet, e Profibus DP (Montez, 2005).

A rede FIELDBUS interliga os equipamentos de entrada e saída inteligentes e pode cobrir maiores distâncias, chegando a 10 km. Os equipamentos conectados nessa rede desempenham funções específicas de supervisão, como o controle de fluxo de informações e processos. Os tempos de transferência são longos (ordem de centenas de milissegundos), mas, em compensação, a rede é capaz de se comunicar usando vários tipos de dados (discreto, analógico, parâmetros, programas e informações do usuário). São exemplos as redes Modbus Plus, Profibus FMS (Montez, 2005).

2.4.1 MODBUS

O protocolo MODBUS foi desenvolvido pela Modicon Industrial Automation Systems, hoje Schneider Electric. Sua padronização ocorreu em 1979 e é um dos mais antigos protocolos utilizados atualmente. Possui fácil operação e manutenção, o que o torna uma solução de baixo custo. Tais requisitos o colocam entre os protocolos industriais de maior utilização no mercado mundial. É usualmente implementado usando RS-232, RS-422 ou RS-485 sobre uma variedade de meios de transmissão. A tecnologia de comunicação no protocolo é o mestre-escravo, sendo que somente um mestre e no máximo 247 escravos podem ser conectados à rede. O mestre pode transmitir dois tipos de mensagens aos escravos, dentro de uma mesma rede: *unicast* e *broadcast*.

Existem dois modos de transmissão: ASCII onde cada byte de mensagem é enviado como 2 caracteres ASCII e RTU onde cada byte da mensagem é enviado como 2 caracteres hexadecimais de 4 bits.

O modo ASCII usa mensagens textuais (caracteres digitáveis), ao passo que o RTU utiliza modo binário. A principal vantagem deste é a maior densidade de caracteres, permitindo um melhor processamento de dados quando comparado ao modo ASCII, e levando em consideração uma mesma velocidade de comunicação (*baud rate*). Entretanto, por não ser limitado a caracteres textuais (letras, números), dificulta operações de diagnóstico e manutenção. As mensagens são transmitidas em um fluxo contínuo de caracteres para assegurar uma correta transação. O formato define que, para cada 8 bits de informação RTU, são utilizados 3 bits adicionais para formalizar a comunicação serial. Deste modo, cada byte RTU conterá 11 bits.

Ainda, no modo RTU não existe um caractere específico que indique o início ou o fim de uma requisição. A indicação de quando uma nova mensagem começa ou quando ela termina é feita pela ausência de transmissão de dados na rede, por um tempo mínimo de 3,5 vezes o tempo referente à transmissão de um byte de dados. Por isso, comumente utiliza-se *bits* como unidade de tempo. Uma requisição em Modbus RTU tem o formato apresentado no Quadro 1.

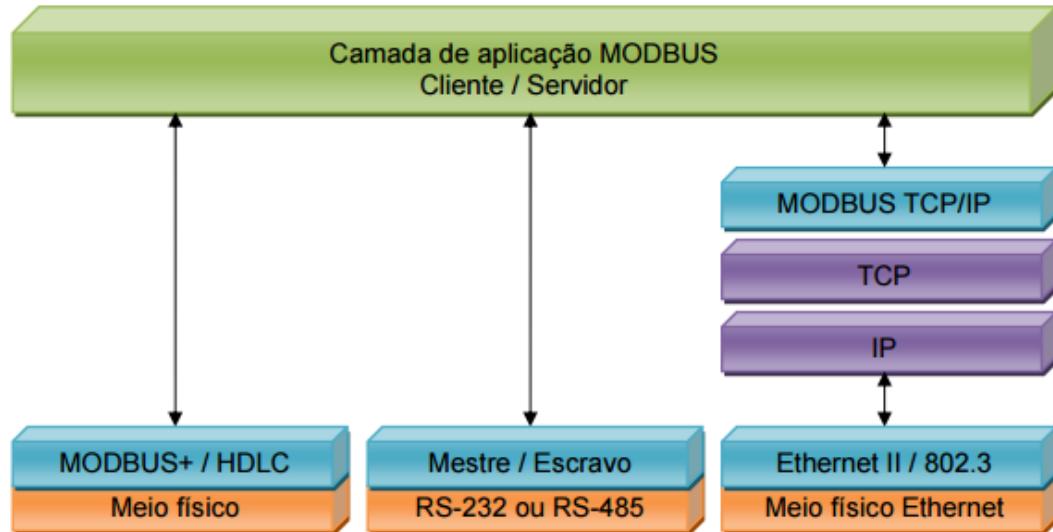
Quadro 1: Formato do *frame* Modbus RTU

Nome	Comprimento (bits)	Função
Início	28	no mínimo 3,5 vezes o tempo de transmissão (<i>mark condition</i>)
Endereço	8	endereço do escravo
Função	8	código da função
Dados	$n \times 8$	bits de dados
CRC	16	verificação de erros
Fim	28	no mínimo 3,5 vezes o tempo entre frames

Fonte: Autoria Própria

Os códigos de funções MODBUS são elementos da Protocol Data Unit (PDU), e pode ser implementado usando: a) Transmission Control Protocol (TCP)/Internet Protocol (IP) sobre Ethernet; b) Transmissão serial assíncrona sobre variados meios físicos; c) MODBUS+ (rede de alta velocidade baseada em token passing). A figura 15 ilustra a pilha de comunicação Modbus.

Figura 15: Pilha de comunicação MODBUS



Fonte: (MELO, 2005)

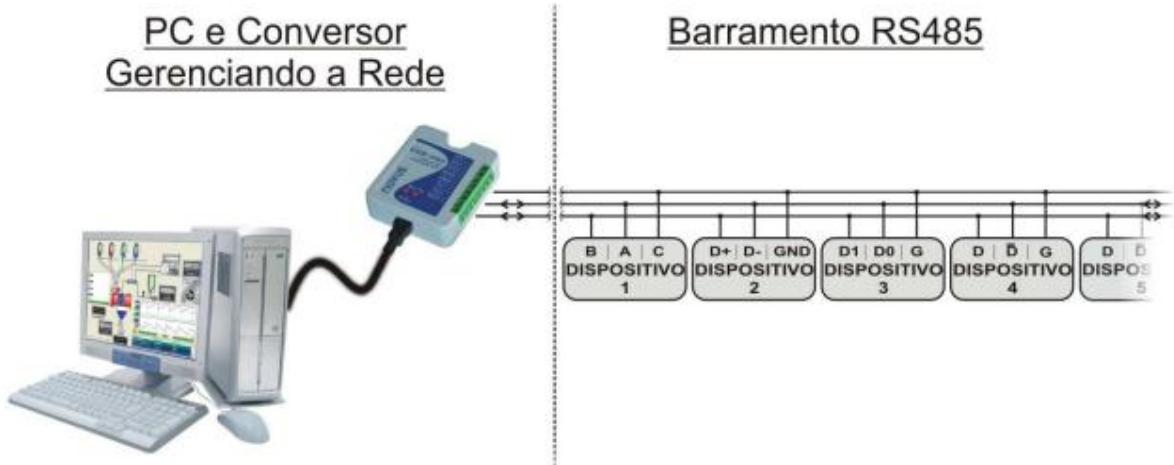
O uso deste protocolo implica num modelo de comunicação baseado em requisições e respostas. A estação responsável por enviar requisições é chamada de mestre, ao passo que os dispositivos que respondem às mesmas são chamados de escravos, sendo diferenciados por endereços únicos.

Ao todo o protocolo Modbus possui 256 endereços. O endereço disponível para os escravos é de 1 a 255 sendo o endereço zero alocado para o *broadcast*. O mestre não possui endereço, somente os escravos possuem endereço definido.

2.4.2 Protocolo RS-485

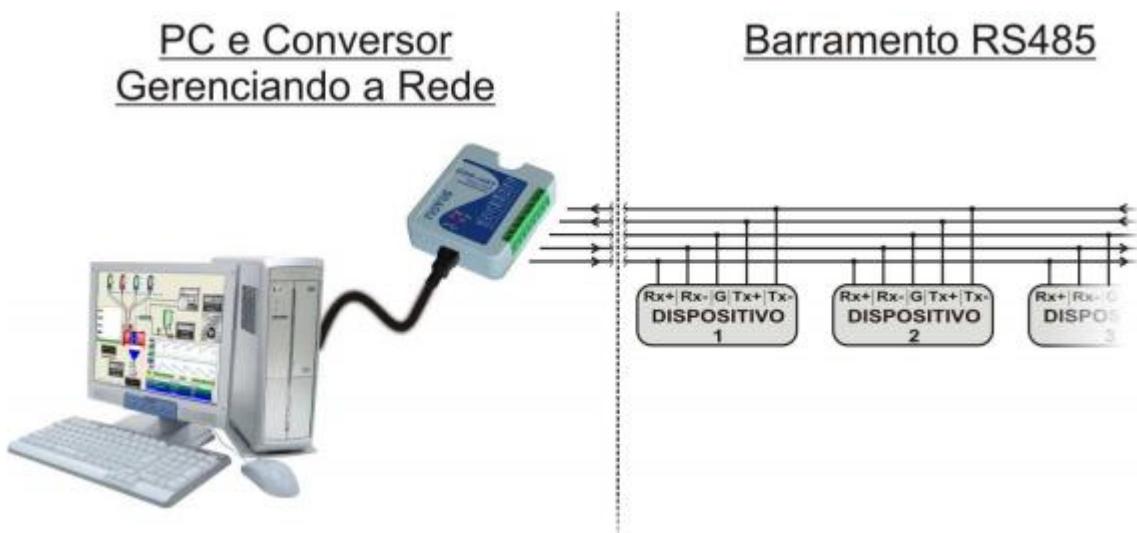
A comunicação RS485 funciona em modo diferencial. Ou seja, a diferença entre as tensões na linha dirão se o mestre está transmitindo 1 ou 0. A RS-485 suporta a comunicação half-duplex e full-duplex, sendo que, para a primeira, há necessidade da utilização de um cabo par-trançado enquanto, na segunda, são necessários dois pares de cabos (Souza, 2014). Os dois tipos de comunicação são ilustrados nas figuras 16 e 17, a seguir.

Figura 16: RS-485 HALF-DUPLEX (2 FIOS + terminal comum)



Fonte: Novus Produtos Eletrônicos

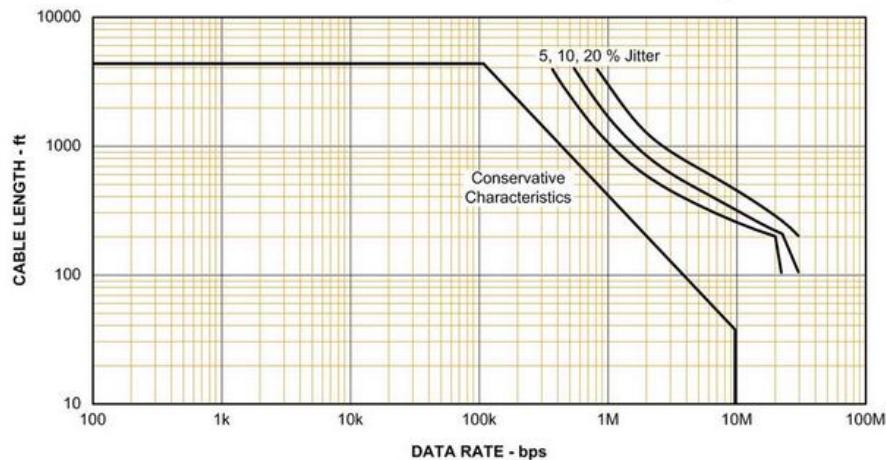
Figura 17: RS485 FULL-DUPLEX (4 FIOS + terminal comum)



Fonte: Novus Produtos Eletrônicos

O alcance do padrão RS-485 especifica um comprimento máximo de 1200 metros para os cabos de comunicação. A velocidade máxima de comunicação (em bits por segundo – bps) depende de características dos equipamentos instalados, da capacidade dos cabos de comunicação e dos resistores de terminação. Como regra geral, quanto mais longos os cabos, menor deve ser a velocidade de comunicação. A figura 18, ilustra o compromisso entre a velocidade da comunicação e o comprimento máximo do cabo.

Figura 18: Distância do cabo versus velocidade de comunicação



Fonte: Scada BR

2.5 Microcontroladores

Um microcontrolador pode ser entendido como um sistema computacional dotado de processador, sistema de memória (dados e programa), *clock*, portas de entrada e saída e outros periféricos, notavelmente conversores A/D e temporizadores, todos integrados no mesmo chip. O que diferencia os diversos tipos de microcontroladores, são as quantidades de memória interna (programa e dados), velocidade de processamento, quantidade de pinos de entrada/saída (I/O), alimentação, periféricos, arquitetura e set de instruções.

2.5.1 Arduino e AVR

O Arduino foi projetado para ser de fácil entendimento, de fácil programação e de fácil aplicação, além de ser multiplataforma, podendo ser configurado em ambientes Linux, Mac OS e Windows. Seu ambiente de desenvolvimento integrado é aberto e gratuito, e seu hardware disponível por um preço acessível. Além disso, um grande diferencial deste dispositivo é ser mantido por uma comunidade que trabalha na filosofia *open-source*, desenvolvendo e divulgando gratuitamente seus projetos. Sua linguagem de programação é uma versão simplificada da linguagem C++. O Arduino é originalmente baseado em microcontroladores ATMega, produzidos pela empresa Atmel Corporation. Estes contam com entradas e saídas digitais, entradas analógicas (conversão A/D), saídas analógicas (PWM) e outros periféricos.

2.5.2 PIC

PIC é uma família de microcontroladores produzidos pela Microchip Technology Inc., podendo ser vistos como circuitos integrados, TTL ou CMOS, que contemplam todos os dispositivos típicos de um sistema microprocessado, ou seja: uma CPU, uma memória de programa e uma memória RAM, uma série de linhas de E/S (entrada e saída) e periféricos auxiliares. O PIC está disponível em uma ampla gama de modelos para melhor adaptar-se às exigências de projetos específicos, diferenciando-se principalmente pelo número de linhas de E/S e pelos periféricos presentes. Inicia-se com modelos pequenos identificados pela sigla PIC12Cxx, de 8 pinos, até chegar a modelos maiores com sigla PIC17Cxx, dotados de 40 pinos.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos apresentados previamente, este projeto de pesquisa será norteado metodologicamente pelos seguintes passos:

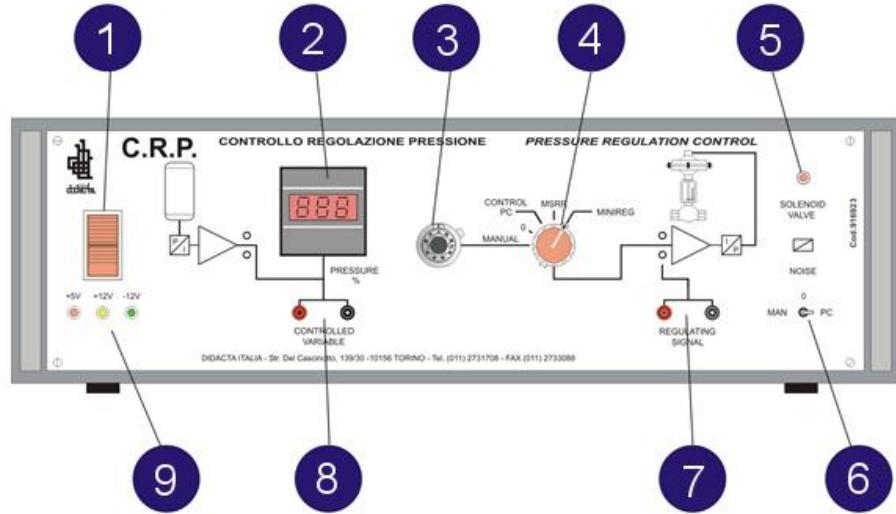
1. estudar o funcionamento das plantas do laboratório do CEFET, notavelmente no que concerne à aquisição de dados e à definição de *set points*;
2. escolher e adquirir microcontroladores com interface analógica apropriada para a comunicação com as plantas;
3. prototipar e testar interface com as plantas, enviando e recebendo informações por um computador, via conexão serial;
4. escolher um padrão para as camadas física e lógica da rede industrial;
5. adquirir componentes para confecção das placas de circuito impresso;
6. projetar módulos mestre e escravo para a rede industrial;
7. estabelecer os requisitos para a tela de supervisão;
8. conceber o sistema supervisório.

3.1 Plantas Didáticas de Controle

3.1.1 Planta de Pressão

Nessa planta, a variável controlada é a pressão, e o *set point* é alcançado por meio de um sinal transmitido à válvula proporcional, existente na saída do tanque, controlando sua abertura e fechamento de acordo com a necessidade. Além disso, é possível ligar um canal de saída de ar auxiliar, para modificar as características do sistema e criar perturbações na ação de controle. A planta possui ainda um controlador eletrônico que executa, dentre outras, as seguintes funções: (i) alimentar todos os componentes elétricos da unidade; (ii) realizar o condicionamento dos sinais elétricos da placa de conversão AD/DA, de modo a adaptar as entradas e saídas da placa às entradas e saídas dos transdutores e atuadores da unidade; (iii) indicar a pressão através de um mostrador digital e (iv) enviar um sinal de tensão proporcional ao valor da pressão e receber outro sinal para a definição de *set point*. O painel do controlador é apresentado na Figura 19.

Figura 19: Vista frontal do controlador eletrônico de pressão (Laboratório de Automação)



Fonte: Manual da planta Didacta Italia

Os principais elementos para leitura e manuseio são:

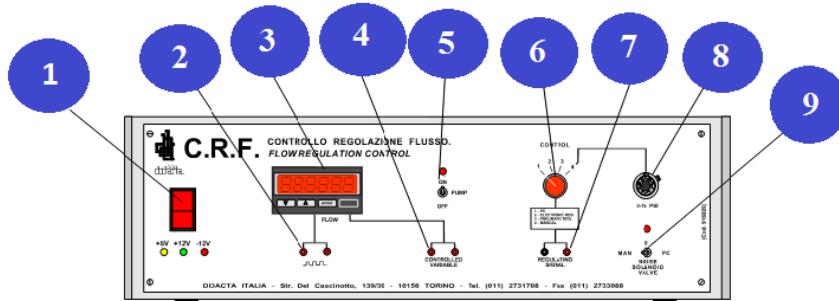
- 1 - Chave liga e desliga;
- 2 - Indicador digital da pressão controlada, como uma porcentagem ($100\% = 2$ barra);
- 3 - Knob para o controle manual da válvula proporcional;
- 4 - Seletor de CONTROLE com modo operacional de cinco posições;
- 5 - Indicador LED para a operação da válvula solenoide de ruído;
- 6 - Seletor de RUÍDO de três posições;
- 7 - Saída auxiliar do sinal de controle;
- 8 - Saída auxiliar da variável controlada;
- 9 - Indicadores de alimentação LED.

3.1.2 Planta de Vazão

A planta de vazão foi projetada para o estudo de técnicas de controle de fluxo em malha aberta ou fechada. A unidade permite a passagem do fluxo de água por um circuito. Neste sistema de controle, a variável manipulada é o fluxo, e o *set point*, analogamente à planta de pressão, é alcançado por meio de um sinal que controla a abertura de uma válvula proporcional. A água é retirada de um tanque coletor com a ajuda de uma bomba centrífuga, e a medição do fluxo é obtida por uma pequena turbina. O propósito da ação de controle é manter o fluxo de água em circulação constante e no nível desejado, mesmo na presença de

eventuais perturbações externas (ruído). O controlador eletrônico dessa planta possui essencialmente as mesmas funções do controlador da planta de pressão, mencionadas no tópico anterior. A figura 20 exibe a vista frontal do painel do controlador.

Figura 20: Vista frontal do controlador eletrônico de vazão (Laboratório de Automação)



Fonte: Manual da planta Didacta Italia

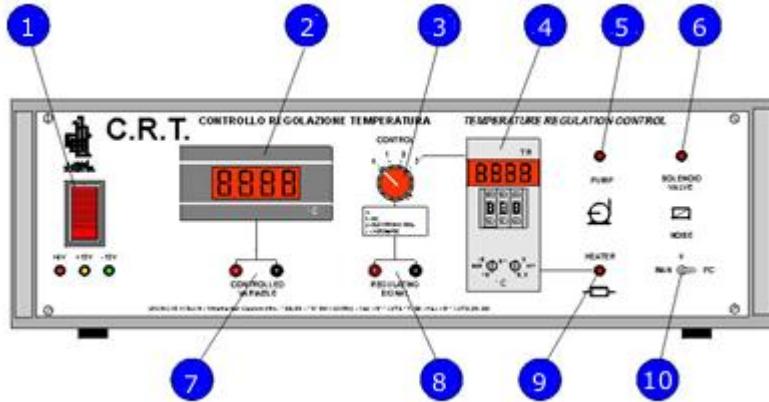
- 1 - Chave Liga - Desliga da unidade, com LED's indicadores;
- 2 - Pontos de teste para o sinal de onda quadrada gerado pelo medidor;
- 3 - Unidade de vídeo, mostrando o fluxo de água da taxa medida (em l/h);
- 4 - Saída auxiliar do sinal que corresponde à variável controlada;
- 5 - Chave Liga - Desliga da bomba centrífuga com LED indicador de operação;
- 6 - Seletor com modo operacional de quatro posições (CONTROLE);
- 7- Saída auxiliar de sinal do controle;
- 8 – Knob para o comando manual direto da abertura da válvula proporcional;
- 9 - Seletor de RUÍDO de 3 posições.

3.1.3 Planta de Temperatura

A planta foi desenvolvida para o estudo de técnicas de controle de temperatura de circuito aberto e fechado. A unidade aquece a água contida em um tanque pequeno até a temperatura desejada e a mantém constante, mesmo na presença de interferência externa. Para alcançar esses propósitos, a água é levada de um tanque coletor, com a ajuda de uma bomba centrífuga, fluindo por um circuito. Durante esta transferência forçada, a água alcança um pequeno tanque de Pyrex, onde é aquecida. Para aquecê-la a uma temperatura pré-determinada, é necessário ajustar a intensidade da corrente que passa através de uma resistência. O controlador eletrônico dessa planta, além de possuir as mesmas funções das

plantas de pressão e vazão, possui um termostato eletrônico de segurança que age como um regulador interno *On/Off*. O painel do controlador pode ser visualizado na figura 21.

Figura 21: Vista frontal do controlador eletrônico de temperatura (Laboratório de Automação)



Fonte: Manual da planta Didacta Italia

- 1 - Chave Liga - Desliga da unidade, com LED's indicadores;
- 2 - Visor que mostra os valores medidos (em °C) da temperatura no tanque de Pyrex;
- 3 - Seletor (CONTROLE) com modo de operação de quatro posições;
- 4 - Controlador (On/Off) operado por termostato;
- 5 - Chave Liga - Desliga da bomba centrífuga;
- 6 - Indicador ativado por válvula de solenoide (presença de ruído);
- 7 - Saída auxiliar da variável controlada;
- 8 - Saída auxiliar do sinal de controle;
- 9 - LED de operação de calor.
- 10 - Seletor de RUÍDO de 3 posições;

3.2 Aquisição de dados e definição de *set points*

Cada um dos controladores previamente descritos possui quatro bornes banana, indicados na figura 22, responsáveis pelo envio dos sinais elétricos referentes às variáveis manipuladas (PV) e pelo recebimento dos sinais de controle (SP). Tanto a entrada como a saída operam com níveis de tensão normalizados entre 0 e 5V. A saída da planta de pressão, por exemplo, possui o valor 0V para 0 bar e 5V para 2,5 bar. O sinal da planta de fluxo, por sua vez, corresponde à variação de 0 a 100 litros por hora. Finalmente, a saída da planta de temperatura possui variação proporcional de 0 a 80 °C.

Figura 22: Bornes banana 2 mm (Laboratório de Automação)



Fonte: Autoria própria

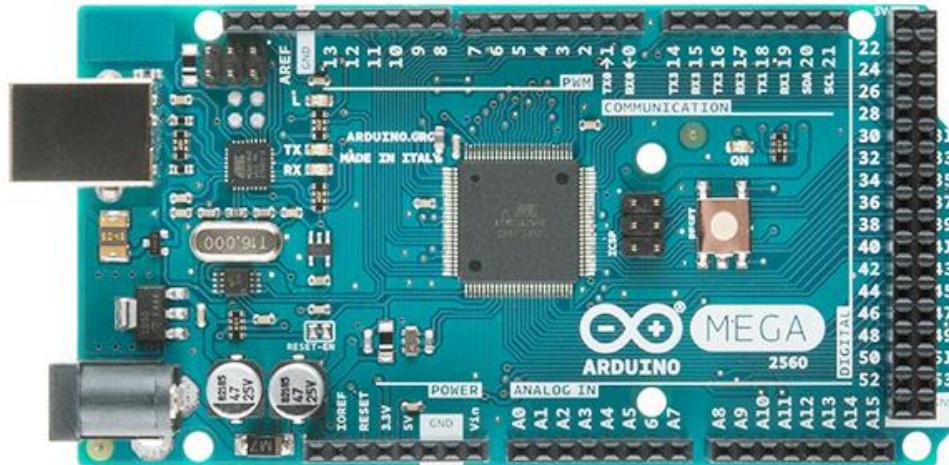
3.3 Escolha dos microcontroladores

Após entender como é feita a aquisição de dados e a definição de *set points* pelos controladores das plantas, foi definido qual microcontrolador seria utilizado. Devido à sua facilidade de uso, ao baixo custo e à grande quantidade de documentação disponível, foi escolhido o Arduino.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dois tipos de placas: Arduino Mega e Arduino Nano. O Arduino Mega 2560, representado na figura 23, possui 54 pinos de entradas/saídas digitais, 16 entradas analógicas, 4 UART's (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP e um botão de reset. Pode ser alimentado pela conexão USB ou com uma fonte externa. A entrada de alimentação é selecionada automaticamente. Alimentação externa (não USB) pode ser tanto de uma fonte como de baterias. A fonte pode ser conectada plugando um conector de 2,1 mm, positivo no centro, na entrada de alimentação. Cabos vindos de uma bateria podem ser inseridos nos pinos terra (Gnd) e entrada de voltagem (Vin) do conector de energia. A placa pode operar com alimentação externa entre 6 e 20 volts. No entanto, se menos de 7 volts forem fornecidos o pino de 5V pode fornecer menos de 5 volts e a placa pode ficar instável. Com mais de 12V o regulador de voltagem pode superaquecer e danificar a placa. A faixa recomendável é de 7 a 12 volts. O Arduino Mega2560 possui um fusível

resetável que protege as portas USB do computador contra curto-circuitos e sobrecorrente. A tabela 3 resume as características principais do Arduino Mega.

Figura 23: Vista Superior do Arduino Mega



Fonte: <https://www.arduino.cc/>

Tabela 3: Características técnicas do Arduino Mega

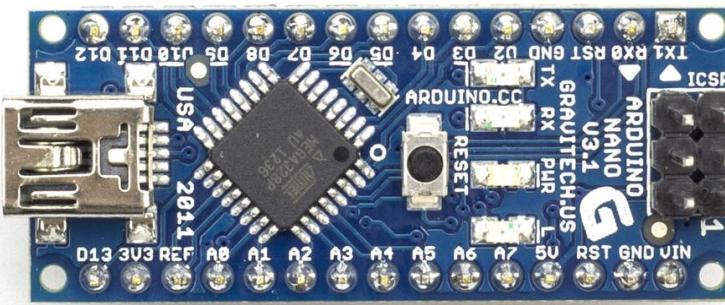
Micro Controlador	ATMega 2560
Tensão de Trabalho	5V
Tensão de Entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de Entrada (limite)	6-20V
Pinos Digitais E/S	54
Pinos de Entrada Analógica	16
Memória Flash	256 kb
SRAM	8 kb
EEPROM	4 kb
Velocidade de Clock	16 MHz
Comprimento	101,52 mm
Largura	53,30 mm
Peso	37 g

Fonte: adaptado de <https://www.arduino.cc/>

O Arduino Nano, por sua vez, representado pela figura 24, é uma placa consideravelmente menor, mas não carece dos recursos necessários para os fins do presente

trabalho. Pode ser alimentado por uma conexão mini USB, por uma fonte externa não regulada de 7 a 12 volts (pino 30), ou por uma fonte externa regulada de 5V (pino 27). A fonte de alimentação selecionada automaticamente é a de maior voltagem. O ATmega328 tem 32 KB (2KB são usados pelo *bootloader*) e 2 KB de SRAM e 1 KB de EEPROM (que podem ser lidos ou escritos com a biblioteca EEPROM). Cada um dos 14 pinos digitais no Nano pode ser usado como uma entrada ou uma saída, usando as funções **pinMode()**, **digitalWrite()**, e **digitalRead()**. Eles operam a 5 volts. Cada pino pode fornecer ou receber um máximo de 40 mA e possui um resistor interno (desconectado por default) de 20-50KΩ. O Nano tem 8 entradas analógicas, cada uma das quais com 10 bits de resolução. Por padrão elas medem de 0 a 5 volts, embora seja possível mudar o limite superior usando o pino AREF e a função **analogReference()**. A tabela 4 resume as características principais do Arduino Nano.

Figura 24: Vista Superior do Arduino Nano



Fonte: <https://www.arduino.cc/>

Tabela 4: Características técnicas do Arduino Nano

Microcontrolador	ATmega328
Voltagem de operação (nível logico)	5 V
Voltagem de entrada (recomendada)	7-12 V
Voltagem de entrada (limites)	6-20 V
Pinos digitais I/O	14
Pinos de entrada analógica	8
Memória Flash	32 kb
SRAM	2 kb
EEPROM	1 kb
Velocidade de Clock	16 MHz
Dimensões	18,50 mm x 43,20 mm

Fonte: adaptado de <https://www.arduino.cc/>

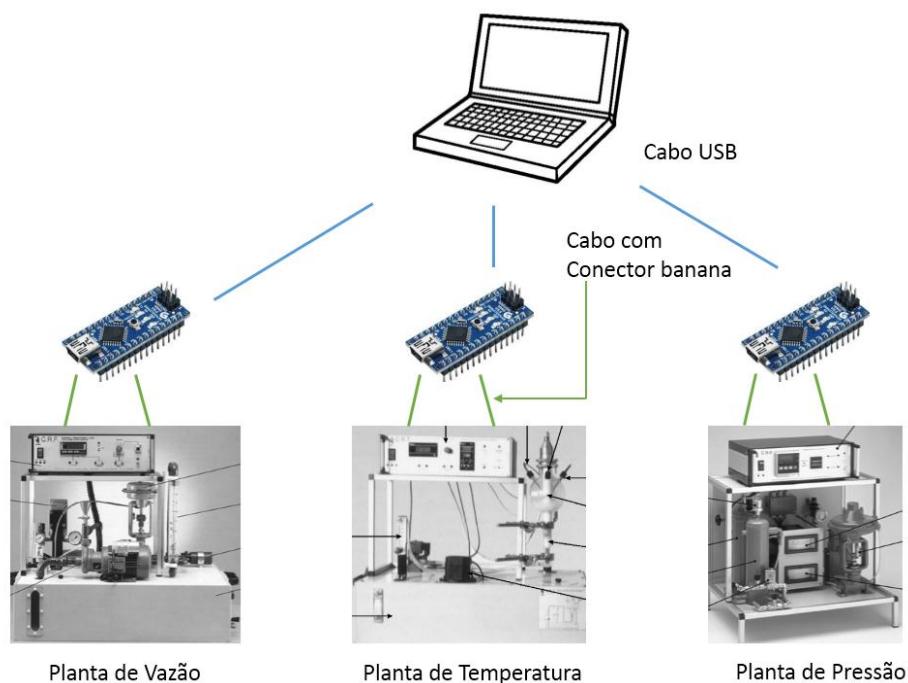
3.4 Conexão serial com as plantas

Inicialmente, uma placa do Arduino Nano foi conectada ao controlador de cada planta e a um computador. Foram feitos testes, por meio de ajustes manuais, a fim de verificar o comportamento da saída. Quando o *set point* era elevado a nível máximo, a planta fornecia aproximadamente 5V na entrada analógica do Arduino, uma vez estável. Em contrapartida, quando movido a 0, a planta parava de fornecer tensão. Regulagens intermediárias resultavam em tensões proporcionais, conforme o esperado.

Depois, foi simulado o controle eletrônico, através da conexão Regulating Signal do controlador das plantas. Nessa etapa, os ajustes de *set point* foram feitos pelo computador, por meio da geração de sinais PWM. Novamente, verificou-se a presença de níveis de tensão condizentes com o ponto de operação recebido.

A função que realiza a leitura da entrada analógica, no Arduino, recebe como parâmetro o pino analógico a ser lido e retorna o valor digital que representa a tensão no pino. Como o conversor analógico-digital do Arduino possui uma resolução de 10 bits, o resultado é limitado entre 0 e 1023 (2^{10} valores distintos) e o número retornado pela função será o valor discreto mais próximo da tensão no pino. A figura 25 ilustra a montagem realizada nessa fase.

Figura 25: Montagem inicial



Fonte: Autoria Própria

3.5 Camadas física e lógica da rede industrial

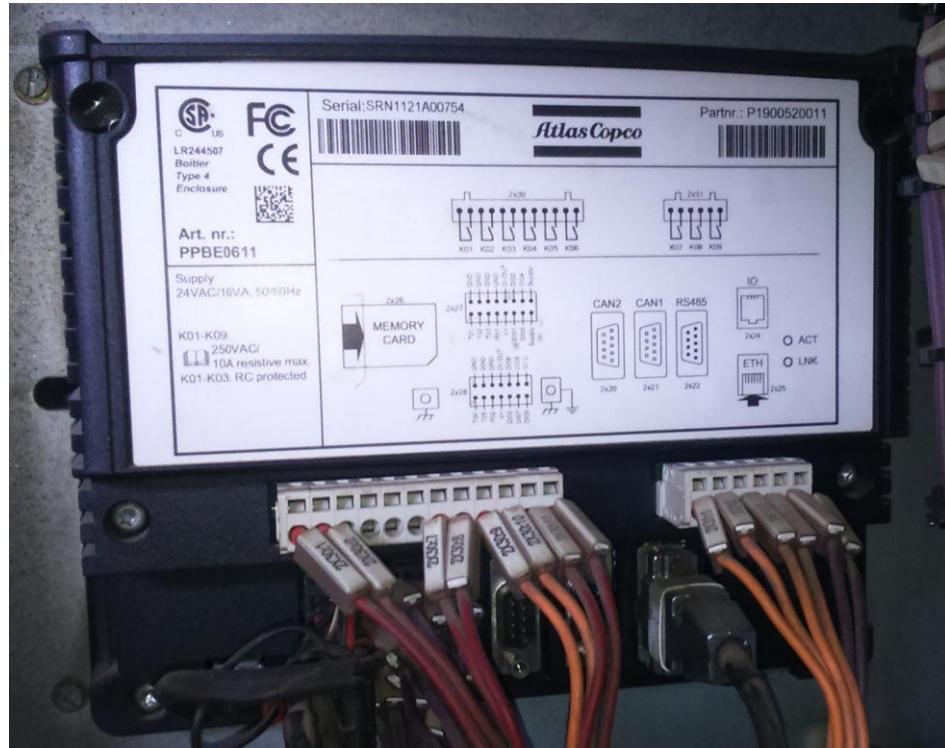
Os compressores da FBM podem ser interfaceados por meio de dois protocolos de comunicação de redes industriais: Modbus ou Profibus. Atualmente, o modelo Modbus é um dos protocolos mais utilizados em automação industrial, graças à sua simplicidade e facilidade de implementação, podendo ser utilizado em diversos padrões de meio físico. Devido a esses motivos, esta rede foi escolhida para realizar a comunicação das plantas com o sistema supervisório, no laboratório.

Para os propósitos deste trabalho, cada planta de controle foi ligada diretamente a um escravo. O mestre, em contrapartida, comunicava com o computador, recebendo e enviando informações na rede.

Como referenciado no Capítulo 2, a rede Modbus possui dois modos de transmissão: ASCII e RTU. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o modo RTU, pela futura compatibilidade com os equipamentos da fábrica.

Com relação à camada física, a escolha foi direcionada, a princípio, pelas opções do controlador Elektronikon Graphic do compressor VSD: Ethernet, RS-485, RS-232 e CAN. A velocidade de comunicação varia em cada um desses padrões, além de determinar o comprimento máximo da rede e o número de dispositivos conectados. A figura 26, representa a vista traseira do controlador, bem como suas conexões. A camada física escolhida foi o padrão RS-485, muito empregado na indústria, principalmente quando é necessária a transmissão de pequenos blocos de dados por longas distâncias. Ainda, por utilizar duas linhas balanceadas, a RS-485 é particularmente se torna imune a ruídos elétricos encontrados em ambientes industriais. A rede industrial é cabeada, sendo a correta instalação da fiação uma etapa crucial do processo.

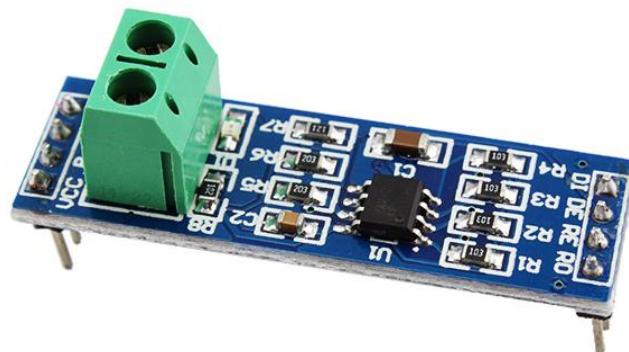
Figura 26: Vista traseira do controlador Elektronikon



Fonte: Autoria própria

Foram adquiridos *shields* para conversão de dados, permitindo interfacear o barramento RS-485 com os pinos Tx e Rx do Arduino (UART). O módulo, ilustrado na Figura 27, opera com tensão de +5V e possui corrente nominal de 300 mA. Além disso, conta com pinos de controle que permitem atuar nas vias barramento ou colocar o dispositivo em modo apenas leitura.

Figura 27: Shield RS-485

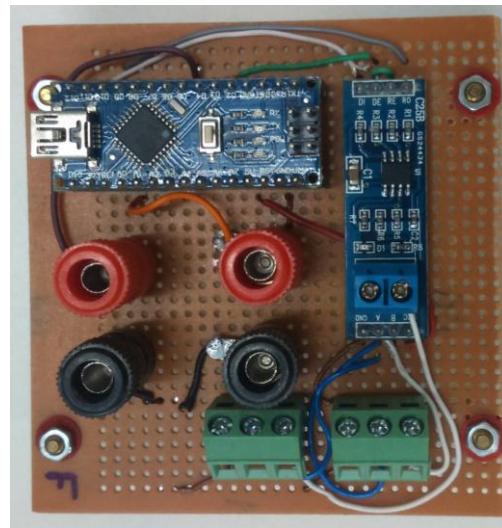


Fonte: Autoria Própria

3.6 Construção dos protótipos

Uma vez definidas as camadas lógica e física, protótipos foram montados, inicialmente em *protoboards* e em seguida em placas padrão (figura 28).

Figura 28: Montagem em Placa Padrão

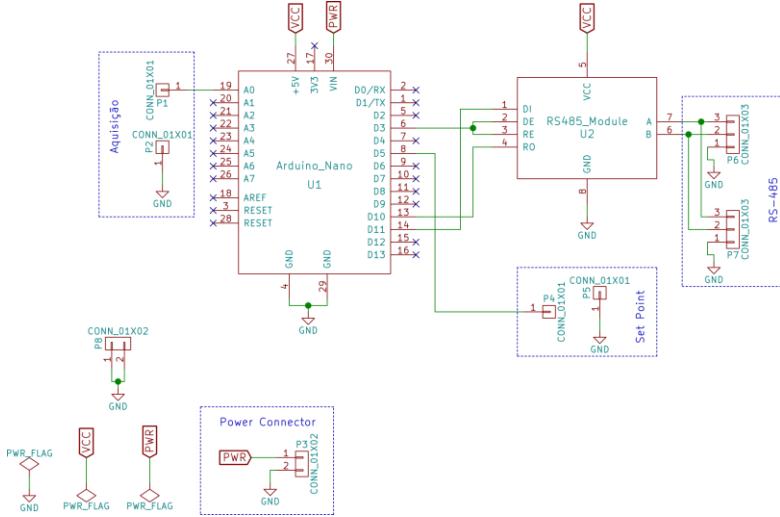


Fonte: Autoria Própria

Com o objetivo de facilitar a montagem física no laboratório e gerar maior confiabilidade na transmissão e recepção dos dados, a solução final foi realizada em placas de circuito impresso.

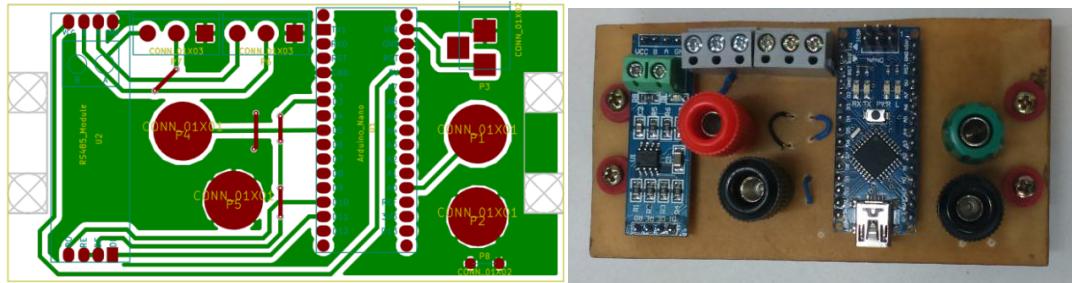
O layout das placas foi feito por meio do pacote de *software* KiCAD, disponível gratuitamente em <http://kicad-pcb.org/>. O primeiro passo foi desenhar o esquemático do circuito (Figura 29). Em seguida, o roteamento foi realizado no módulo PCB. A figura 30 mostra o resultado para a placa dos escravos.

Figura 29: Esquemático do Circuito



Fonte: Autoria Própria

Figura 30: Circuito Impresso e Placa Final



Fonte: Autoria Própria

3.7 Projeto dos módulos mestre e escravo para a rede industrial

As placas foram interligadas entre si, por meio do cabo manga AWG³ 4x22 (Figura 31). O número 4 representa a quantidade de vias, e o número 22 representa o diâmetro das vias. No geral, esses são cabos condutores flexíveis compostos por fiações de cobre nu ou estanhado. A isolação é composta por PVC, assim como sua cobertura. A blindagem é feita em malha trançada com fios de cobre. São comumente utilizados em inúmeras aparelhagens de comunicação, transferência de sinais de máquinas de computador, automação industrial, matrizes de processamento, instrumentação, dentre outros.

³ American Wire Gauge (sigla: AWG) ou escala americana normalizada é o nome da unidade de medida usada para padronização de fios e cabos elétricos.

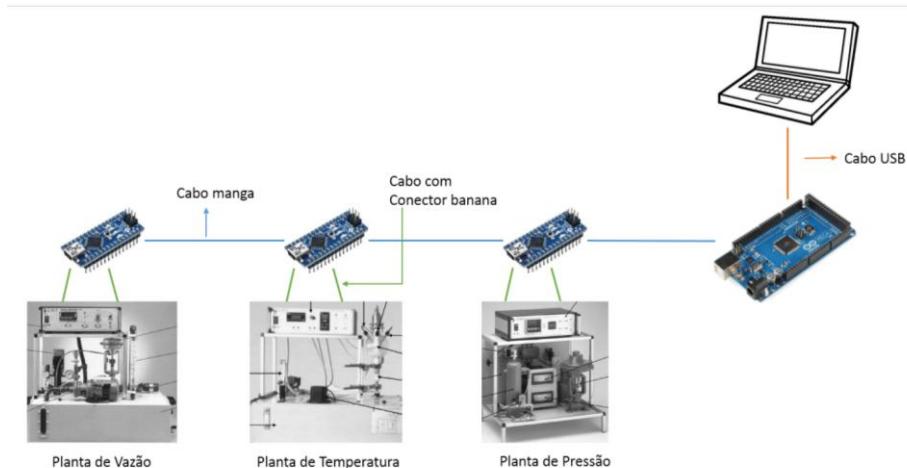
Figura 31: Cabo AWG 4x22 com malha



Fonte: <http://www.tiaflex.com.br/>

Na arquitetura construída, o Mega desempenha a função de mestre e o Nano a função de escravo. A topologia de rede utilizada é chamada de barramento, onde cada uma das placas é ligada em uma mesma linha física de dados. Apenas um dispositivo pode escrever no barramento num dado momento, enquanto todos os outros escutam e recolhem para si os dados a eles destinados. A Figura 32 representa esquematicamente a montagem final realizada.

Figura 32: Representação Esquemática da Montagem



Fonte: Autoria própria

O mestre inicia uma comunicação cíclica, solicitando que os escravos enviem seus dados. Estes, por sua vez, recebem a requisição do mestre e retornam os dados solicitados ou ainda executam alguma função (alteração de *set point*). Um escravo nunca se comunica diretamente com outro.

A comunicação foi desenvolvida em modo *unicast*, ou seja, o mestre envia um pedido para um escravo específico, e aguarda a resposta do mesmo. Os endereços dos escravos foram estabelecidos conforme o Quadro 2.

Quadro 2: Endereçamento dos Escravos

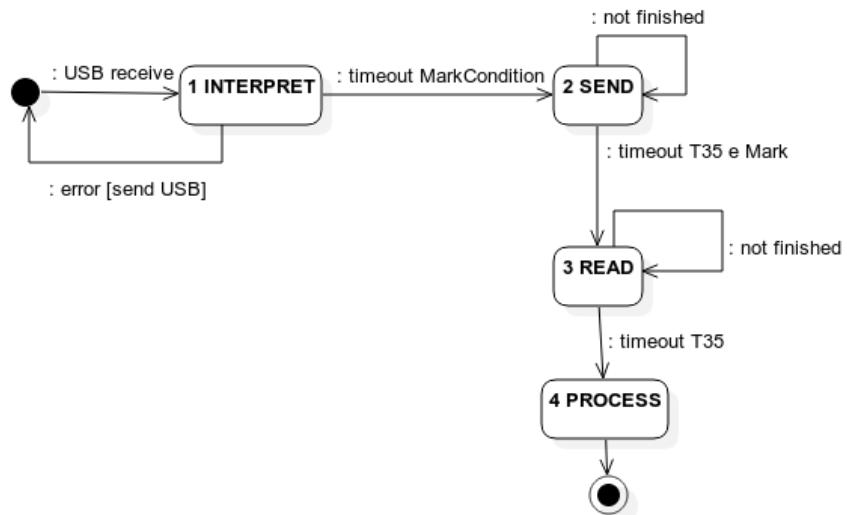
Endereço	Planta de Controle
'F' (0x46)	Planta de Vazão
'P' (0x50)	Planta de Pressão
'T' (0x54)	Planta de Temperatura

Autoria Própria

No Arduino, foram implementadas duas *function codes*: (i) *Read Input Registers* (0x04) e (ii) *Write Single Holding Register* (0x06). A primeira diz respeito à aquisição das variáveis monitoradas, limitadas entre 0 e 1023, como descrito previamente. Já a segunda refere-se à definição de *set points*. O PWM padrão do Arduino tem resolução de 8 bits. Assim sendo, os sinais de *set point* ficaram compreendidos entre 0 e 255.

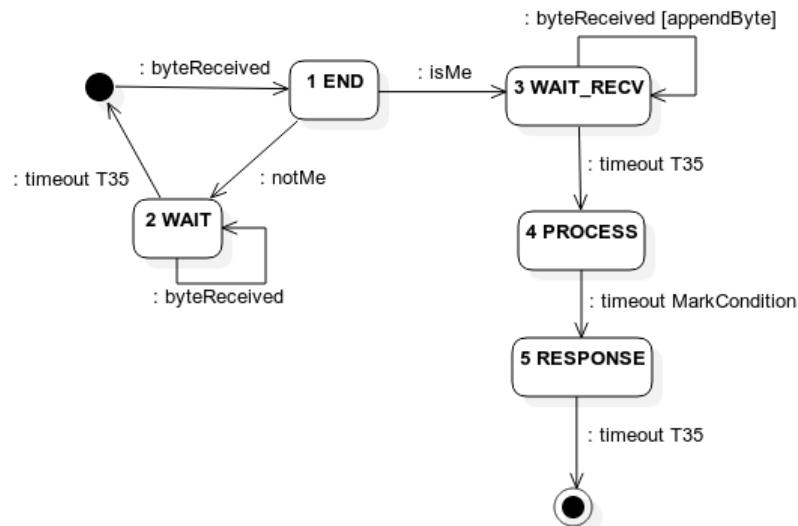
Para facilitar o desenvolvimento, os programas codificados para o Arduino, tanto do módulo mestre, como dos escravos, foram inicialmente modelados em máquinas de estado, apresentadas na Figura 33 e na Figura 34.

Figura 33: Máquina de Estados do Módulo Mestre



Fonte: Autoria Própria

Figura 34: Máquina de Estados do Módulo Escravo



Fonte: Autoria Própria

3.8 Análise de requisitos para a tela de supervisão e concepção do sistema supervisório

O funcionamento do compressor VSD da FBM foi monitorado por um período de 3 meses. Baseado nesses dados coletados, foi possível estabelecer requisitos para a emulação do seu comportamento. Abaixo são apresentados os principais requisitos levantados para criação das telas de alarmes e faixas de regulagens:

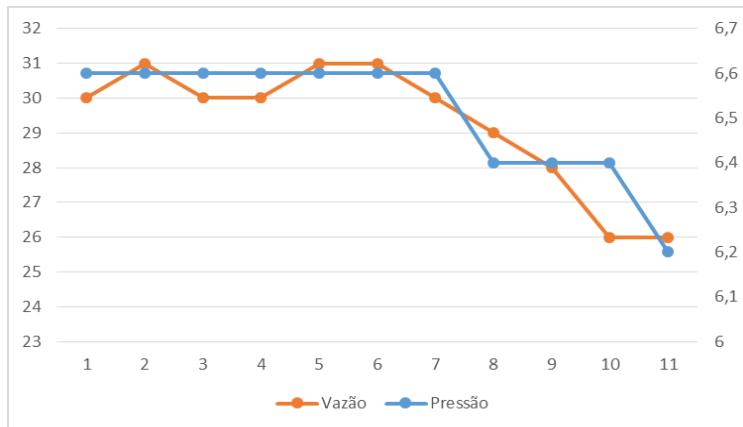
1. Alarmes

- O compressor desarma quando a temperatura do elemento ultrapassa 120 °C;
- O compressor desarma quando a pressão fica inferior a 5 bar;
- A cada 4000 horas em funcionamento, um alarme de manutenção é acionado.

2. Funcionamento

- A temperatura do elemento varia de 70 a 120°C;
- A pressão possui *range* de 5 a 14 bar;
- A vazão possui faixa de operação de 0 a 100%;
- À medida que a pressão é acrescida em 0,1 bar, a vazão aumenta de 2 a 4%;

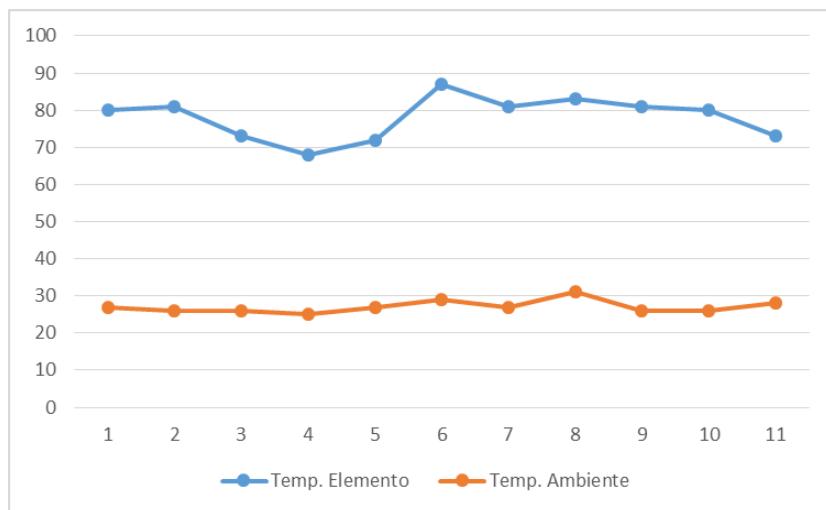
Figura 35: Gráfico comportamento pressão x vazão



Fonte: Autoria Própria

- A temperatura média do elemento gira em torno de 50°C acima da temperatura ambiente;

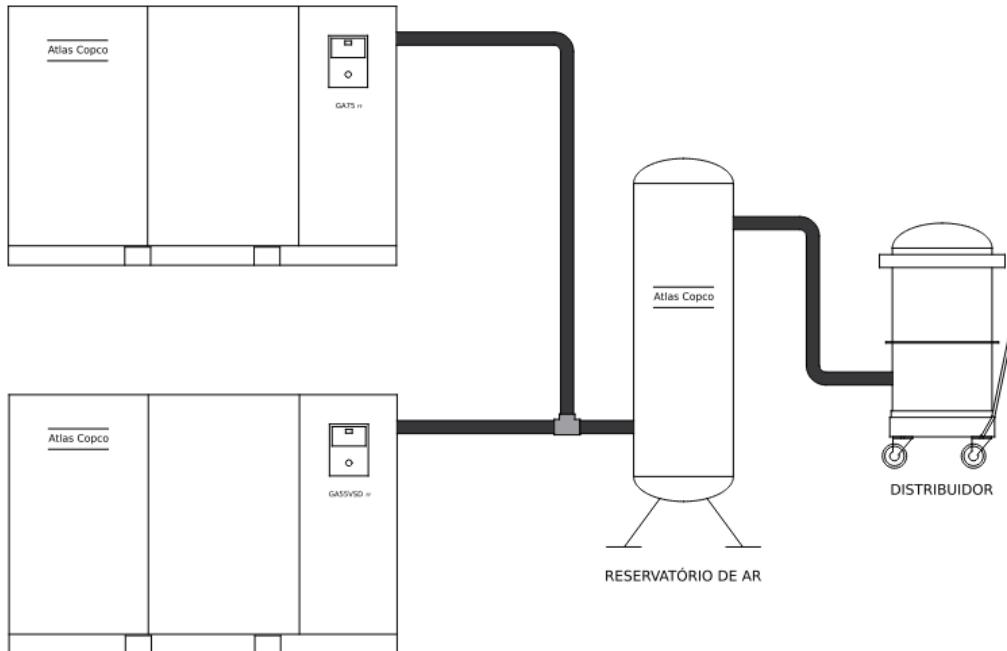
Figura 36: Gráfico temperatura do elemento e temperatura ambiente



Fonte: Autoria Própria

Após a análise dos dados colhidos, o próximo passo foi desenhar os compressores. O software utilizado foi o AutoCAD 2013. As escalas das dimensões foram respeitadas, bem como o posicionamento físico dos componentes da máquina. A imagem obtida pode ser visualizada na figura 37, e será utilizada como plano de fundo da tela de supervisão.

Figura 37: Plano de Fundo da Tela de Supervisão

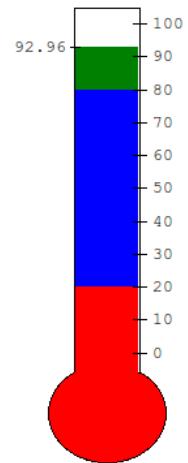


Fonte: Autoria Própria

Por fim, a tela foi acrescida de *widgets*⁴ que seriam empregados na representação gráfica da leitura dos parâmetros de funcionamento do compressor, bem como para o disparo de certas ações, notavelmente a definição dos pontos de operação. A tela do supervisório foi construída com o auxílio de um projeto de código-livre codificado em Python 3, disponível em <https://bitbucket.org/leandromattioli/pyscada>. A figura 38 ilustra o *widget* utilizado para a representação da temperatura.

⁴ Componentes da interface gráfica do usuário, o que inclui janelas, botões, menus, ícones, indicadores etc.

Figura 38: Widget de temperatura



Fonte: Autoria Própria

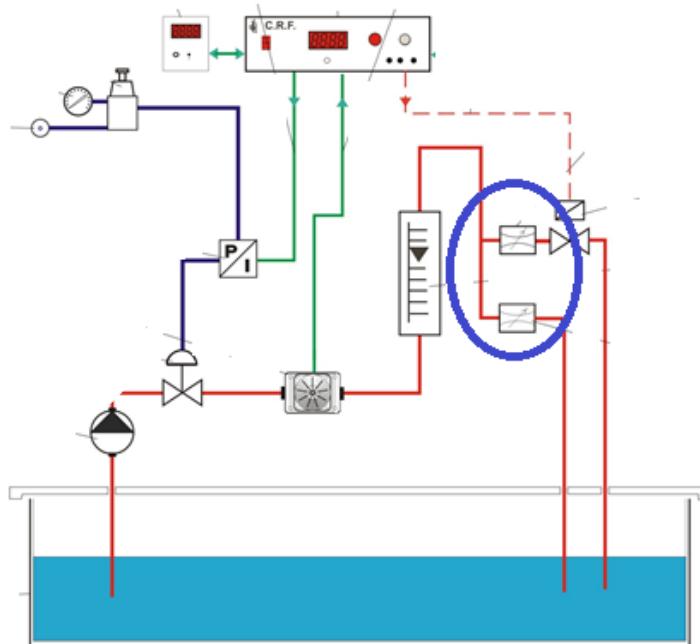
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação dos resultados foi necessário calibrar as plantas, relacionando o *set point* de 0 a 255 (8 bits) enviado pelo supervisório, o sinal de 0 a 1023 recebido pelo SCADA devido ao conversor A/D (10 bits), o valor de tensão de 0 a 5V do sinal PWM gerado pelo Arduino e o valor da escala do controlador. Além disso, foi necessário realizar o ajuste das variáveis físicas de cada unidade.

4.1 Regulagem Física

Inicialmente, foi feito o ajuste físico da planta de vazão. A unidade possui duas válvulas manuais de controle de fluxo de perturbação. A primeira dá acesso direto ao tanque reservatório e a segunda, limitada por uma válvula solenoide. Ambas, foram reguladas com abertura de 6 mm, ou seja, totalmente abertas. A figura 39 indica a posição das válvulas no circuito. O seletor de modo operacional foi configurado em controle por meio de regulador eletrônico externo e o seletor de ruído foi desligado.

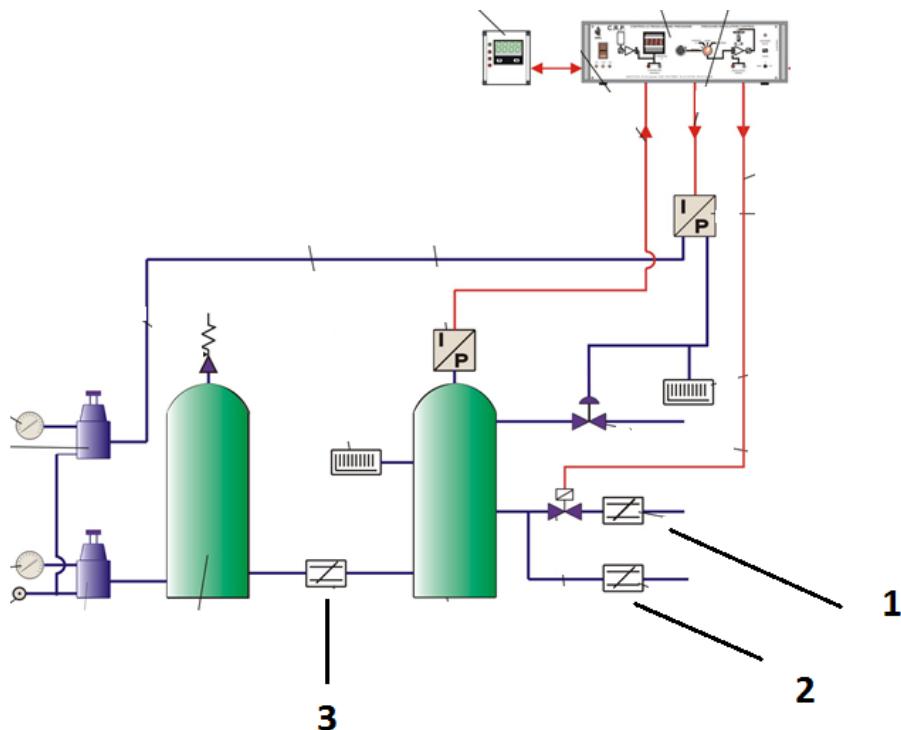
Figura 39: Indicação das válvulas de controle manual da planta de vazão



Fonte: Adaptado do manual da planta Didacta Italia

Em seguida, partiu-se para o ajuste físico da planta de pressão. As válvulas manuais indicadas abaixo pelos números 1 e 2, foram reguladas com aberturas de 1,5 mm e 1 mm, respectivamente, sendo o máximo de 4 mm. A válvula número 3 foi totalmente fechada. O seletor de modo operacional foi configurado em controle manual, e o seletor de ruídos foi desativado. A figura a seguir indica o esquemático funcional do circuito e cada uma das válvulas mencionadas.

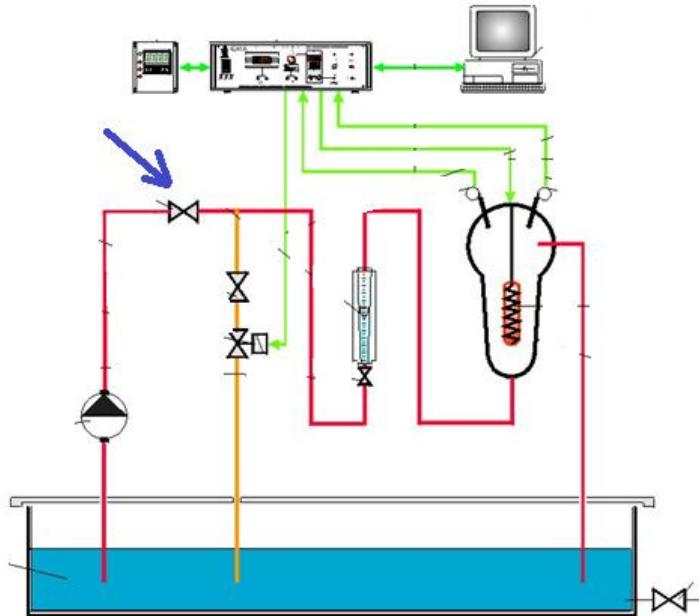
Figura 40: Indicação das válvulas manuais da planta de pressão



Fonte: Adaptado do manual da planta Didacta Italia

Por fim, foi realizado o ajuste físico da planta de temperatura. A regulagem do fluxo de líquido enviado para o tanque de Pyrex, foi ajustada em 30 litros por hora, ao passo que a vazão máxima era de 50. A válvula para efeito desse controle é indicada na Figura 41. O seletor de ruídos foi desabilitado, e o modo de operação foi configurado em controle por meio de controlador eletrônico externo.

Figura 41: Válvula manual da planta de temperatura



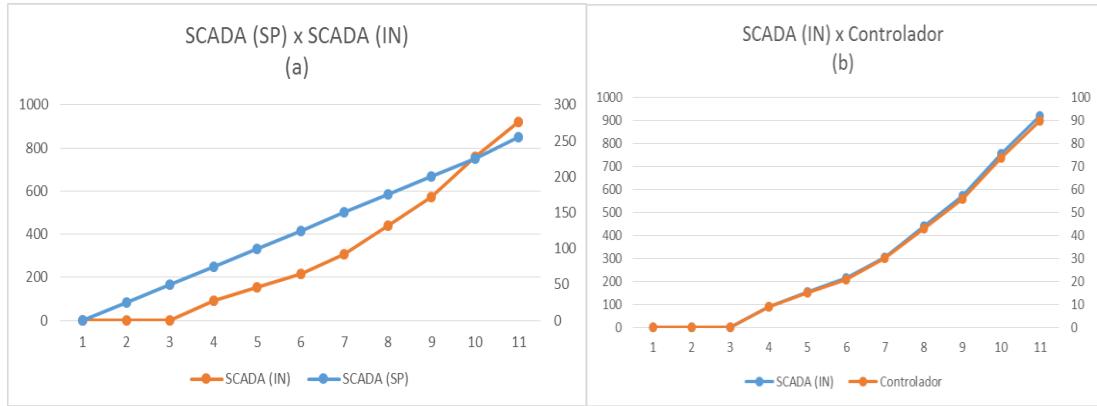
Fonte: Adaptado do manual da planta Didacta Italia

4.2 Calibração de Leitura

Depois de estabelecer as regulagens físicas, iniciou-se a coleta das variáveis manipuladas e o envio de *set points*. Foram enviados, a partir do SCADA, pontos de ajuste de 0 a 255, em passos de 25. A cada valor de PWM, foi associado o valor lido para a grandeza em questão (temperatura, vazão e pressão), tanto no controlador quanto no supervisório, a fim de se estabelecer relações matemáticas entre essas variáveis.

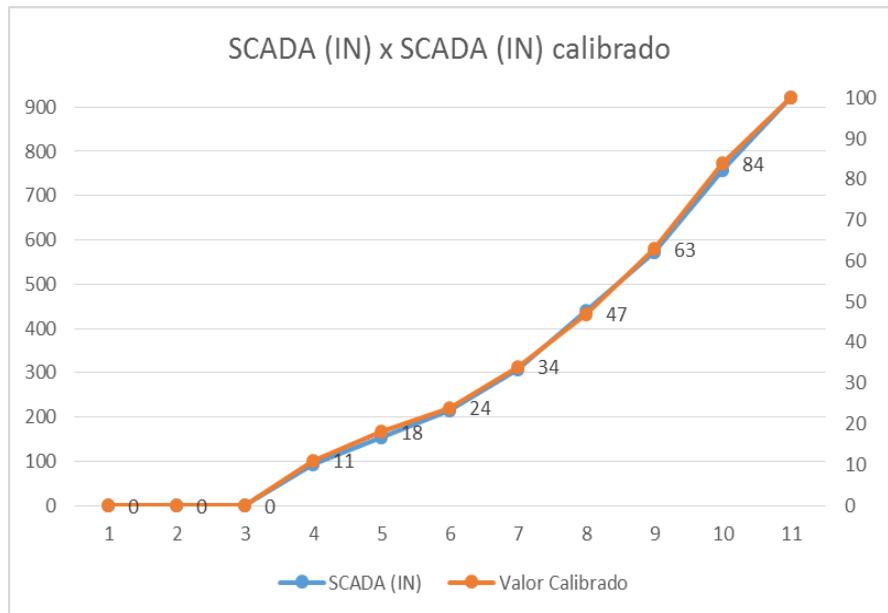
A figura 42 (a) representa o gráfico adquirido no controle e supervisão da planta de vazão, relacionando o sinal de *set point* enviado pelo supervisório, com o resultado obtido de volta na tela. Foi constatado que a bomba só ligou depois de enviado o ponto de ajuste 75. Logo após, as indicações no controlador também foram associados aos valores recebidos no supervisório, podendo ser vistos na figura 42 (b). Uma vez que, esses valores recebidos na tela variaram de 0 a 921, foi necessário dividi-los por 9,21, para que a indicação no SCADA correspondesse a uma leitura de 0 a 100% de vazão (Figura 43).

Figura 42: Associação dos Resultados Obtidos: Planta de Vazão



Fonte: Autoria Própria

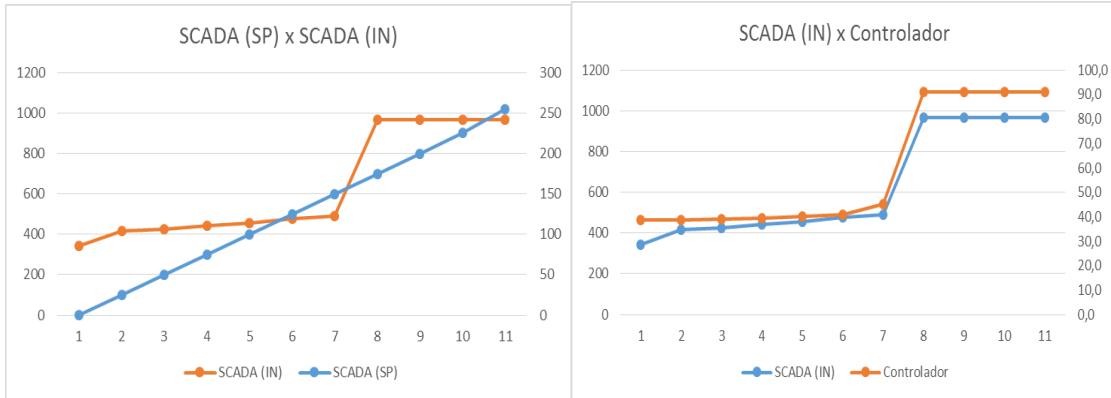
Figura 43: Leitura de Vazão Calibrada



Fonte: Autoria Própria

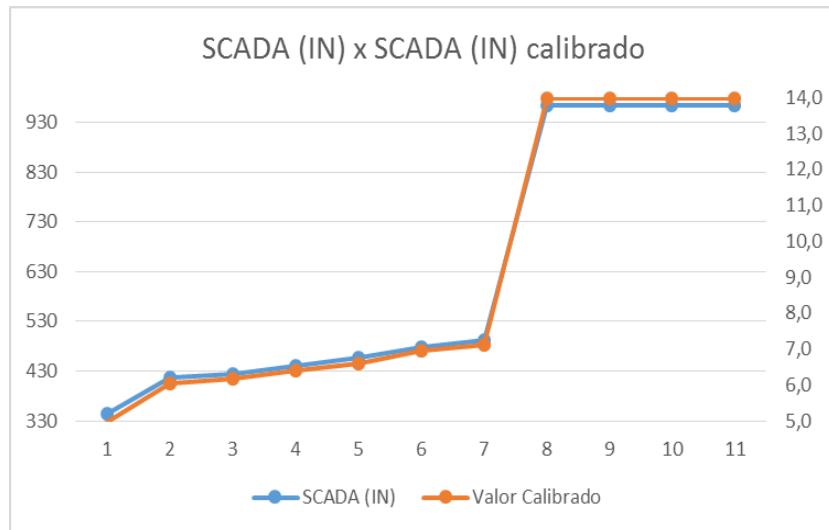
As associações previamente realizadas na calibração da planta de vazão, foram repetidas nas plantas de pressão e de temperatura. A figura 44 ilustra os resultados alcançados para a planta de pressão. Foi verificado que do set point 150 a 175 do PWM, houve uma variação grandemente acentuada. Entretanto, para correta indicação no SCADA, foi necessário dividir os valores de 343 a 965 recebidos na tela de supervisão por 69, gerando uma leitura de 5 a 14 bar (figura 45).

Figura 44: Associação de Resultados Obtidos: Planta de Pressão



Fonte: Autoria Própria

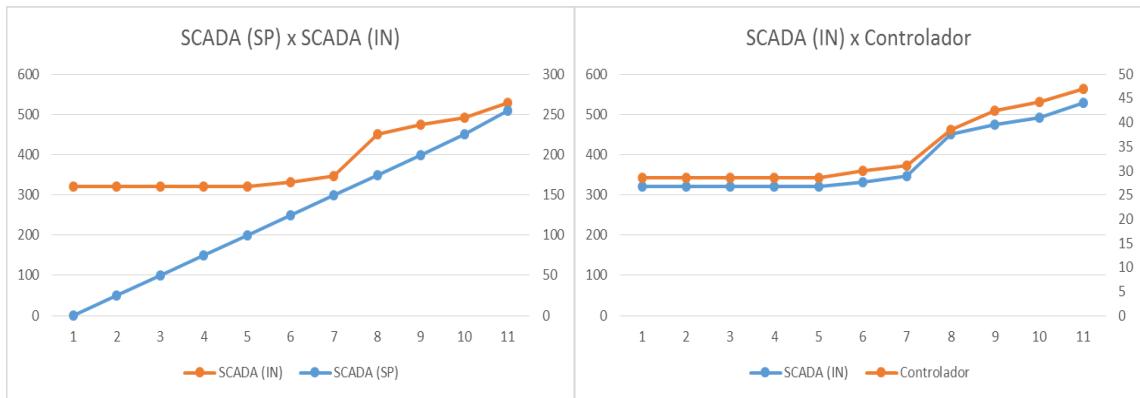
Figura 45: Leitura de Pressão Calibrada



Fonte: Autoria Própria

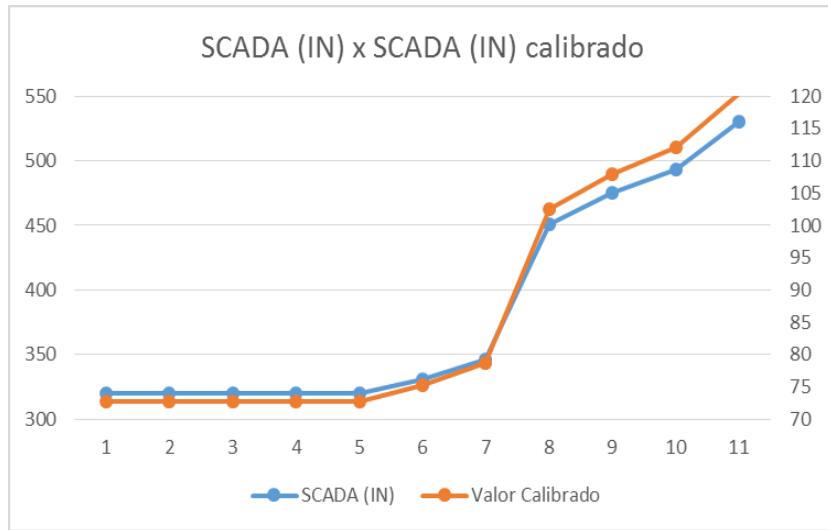
A indicação de temperatura no compressor tem variação de 70 a 120 °C. Para uma adequada leitura no SCADA, os valores recebidos foram divididos por 4,4. A figura 46 apresenta as combinações de resultados obtidos, e a figura 47 os dados após a calibração.

Figura 46: Associação dos Resultados Obtidos: Planta de Temperatura



Fonte: Autoria Própria

Figura 47: Leitura de Temperatura Calibrada



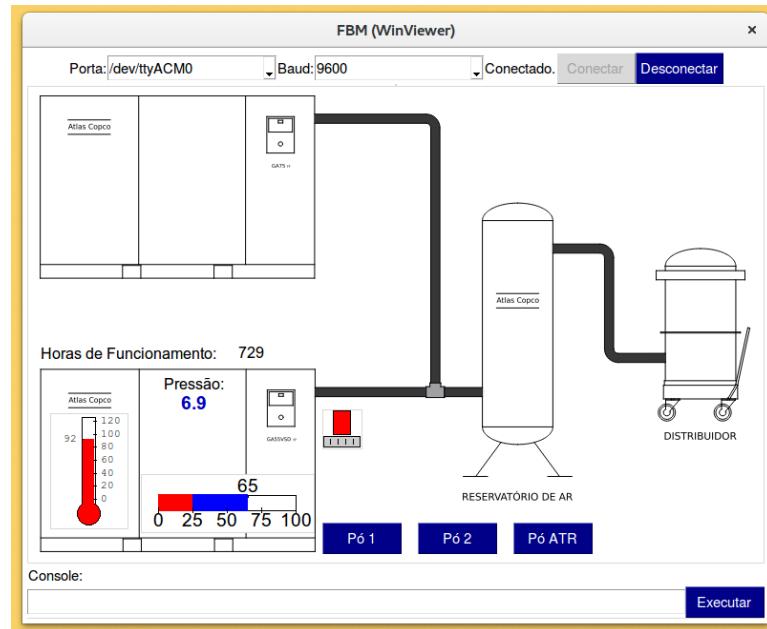
Fonte: Autoria Própria

4.3 Telas do Sistema Supervisório

A FBM produz três tipos de pó de alumínio: tipo 01, tipo 02 e tipo ATR, que se diferenciam por sua granulometria e composição química. Como mencionado na Introdução, o compressor é um dos responsáveis no resultado da granulometria do pó. Com uma leitura confiável de sinais e valores calibrados de acordo com parâmetros da máquina, foi possível obter telas de supervisão e controle, emulando o real funcionamento do compressor. As figuras 48, 49 e 50 apresentam três telas, que indicam valores pré-ajustados para produção de cada um dos tipos de pó de alumínio. Caso o operador necessite de outros *set points*, o campo

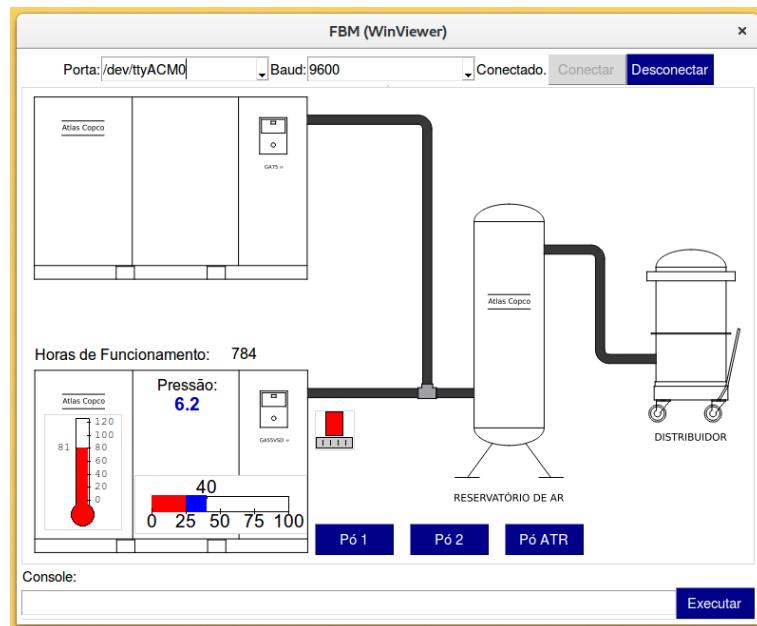
de **console** pode ser utilizado através do comando spP. Quando a pressão é alterada, os valores de temperatura e vazão são ajustados automaticamente.

Figura 48: Tela de Ajuste: Pó tipo 01



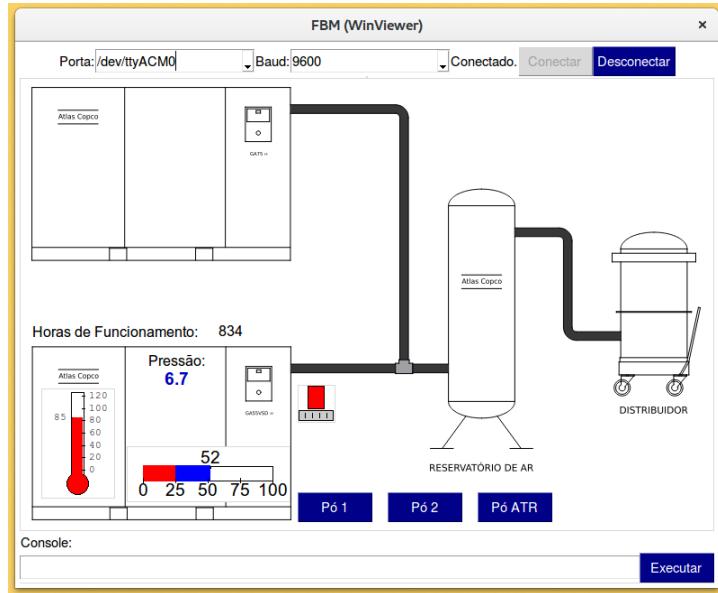
Fonte: Autoria Própria

Figura 49: Tela de Ajuste: Pó tipo 02



Fonte: Autoria Própria

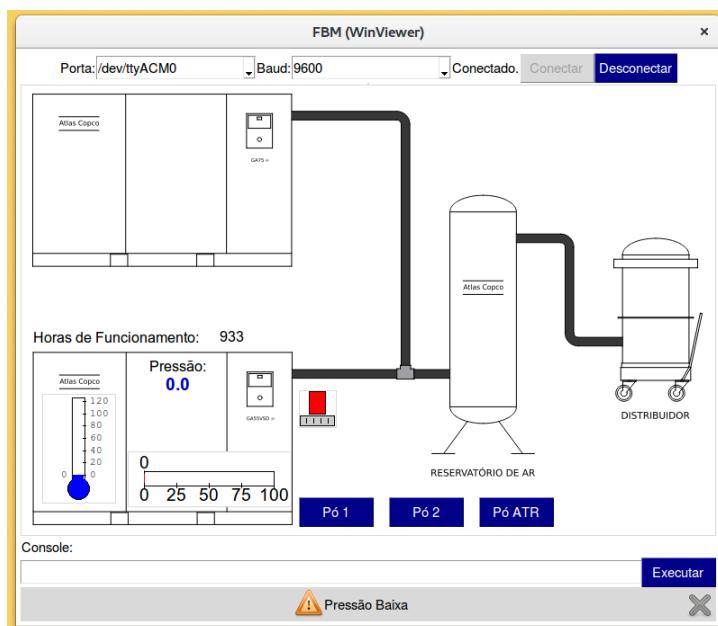
Figura 50: Tela de Ajuste: Pó tipo ATR



Fonte: Autoria Própria

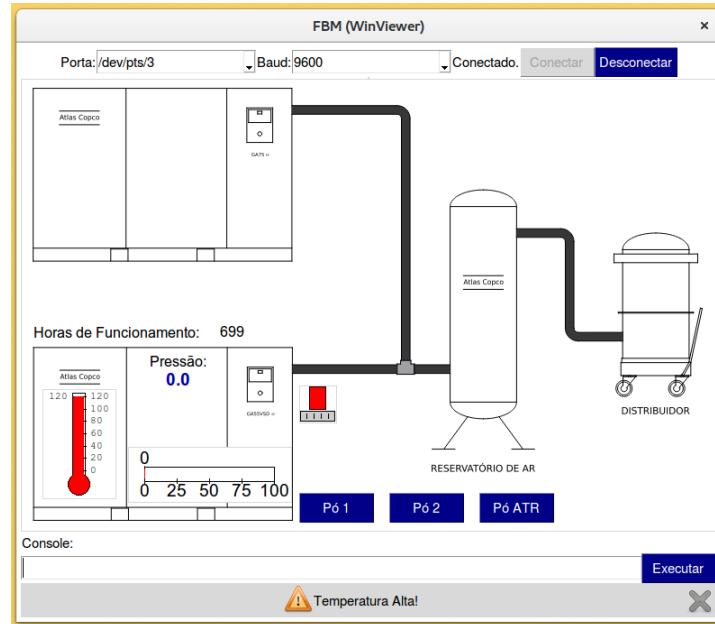
Em seguida, obteve-se telas com alarmes de operação, como queda de pressão e aumento excessivo de temperatura. Na ocorrência dos dois eventos, o compressor é desligado imediatamente. Para emulação da máquina desligada, o *set point* das plantas foi ajustado para zero, sendo que o valor lido no SCADA também foi zero. A Figura 51 representa a tela indicando pressão baixa, e a Figura 52 ilustra a tela com alarme de temperatura alta.

Figura 51: Alarme de Pressão Baixa



Fonte: Autoria Própria

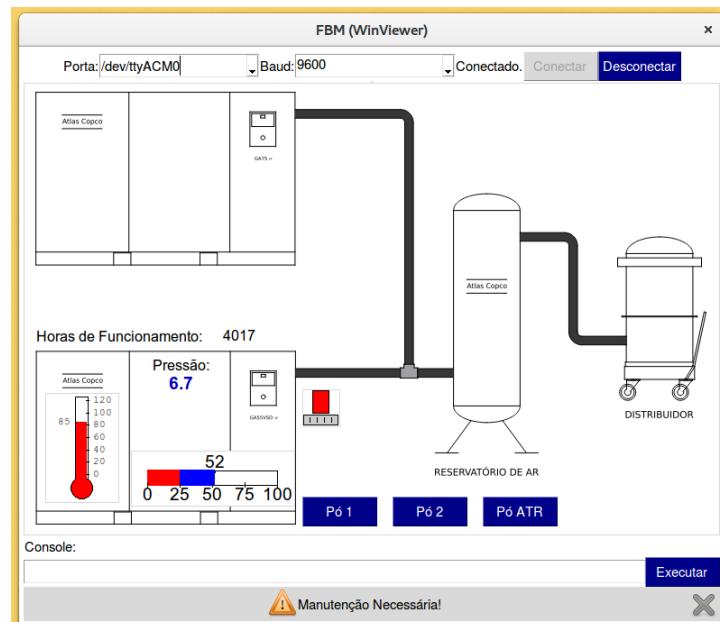
Figura 52: Alarme de Temperatura Alta



Fonte: Autoria Própria

Finalmente, foi inserido um terceiro alarme relacionado com a contagem das horas de funcionamento do compressor. Segundo o fabricante, a cada 4000 horas deve ser realizado uma manutenção preventiva. Sendo assim, em horas múltiplas desse valor, era ativado um alarme na tela. A nível de demonstração, para cada 1 segundo em tempo real, era somado 1 hora no SCADA. A Figura 53 representa a tela alertando sobre a necessidade da manutenção.

Figura 53: Alarme de Manutenção



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As plantas do Laboratório de Automação responderam bem ao sinal PWM do Arduino, ao passo que foi possível obter confiáveis respostas de leitura e escrita. Os dados coletados de todas as plantas, podiam ser visualizados no SCADA em menos de um segundo, e o *set point* enviado com o mínimo de atraso na taxa de transmissão. Após a calibração concebida, o valor lido nos controladores das plantas correspondiam ao valor gerado na tela de supervisão.

No decorrer da fase de desenvolvimento, foram detectados níveis irregulares de tensão nas fontes utilizadas nos Arduinos, prejudicando tanto o sinal de PWM, como a conversão A/D. Como melhoria futura, pretende-se trocar essas fontes por fontes de alimentação regulável.

Durante os primeiros testes com a comunicação RS-485, eram enviados juntamente dos dados, um conjunto extra de *ZERO BYTE*. Para solução deste problema, foi necessário adicionar ao circuito, dois resistores de 680 ohms (resistores de bias). No final da montagem, quando interligou-se a planta de temperatura no sistema, o sinal de supervisão e de *set point* foram perdidos. Sendo assim, foi descoberto que em uma topologia de rede do tipo barramento e padrão RS-485, os resistores de terminação devem ser colocados apenas nas extremidades. Dessa maneira, os resistores dos *shields* montados nas plantas de pressão e vazão foram retirados. Outra sugestão de melhoria futura, seria a aquisição de shields mais adequados, como por exemplo, um *Shield V5 Xbee Shield RS485*, disponível em <http://www.dhgate.com/>.

Em suma, o sistema supervisório mostrou-se eficiente, no que concerne a supervisão dos parâmetros de funcionamento do compressor e no controle de *set point*. A nível de implantação, a intenção seria melhorar a uniformidade do produto final, e contribuir com o operação. O custo estimado para aplicação gira em torno de 50 mil reais, porém estima-se que o índice de retrabalho da fábrica reduziria em 70%, o que em menos de 2 anos pagaria o investimento.

REFERÊNCIAS

ALCOA. **Catálogo de pó de alumínio.** Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/po_de_aluminio/Catalogo_Po_de_Aluminio.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2016.

ALUMÍNIO. **Fundamentos do Alumínio.** Disponível em: <<http://www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf>> . Acesso em 13 jul. 2016.

ARDUINO. **Downloads e Products.** Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 21 jun. 2014.

ATLAS COPCO. **Manual de Instruções para Compressores.** Barueri - SP: Atlas Copco Brasil Ltda. - Divisão Compressor Technique, N° 0015 0003 53 - 07/09. 23 p.

ARNS, A. A. **Protótipo de um sistema supervisório para um experimento de desidratação de frutos em nível de bancada.** 2005. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Ciências da Computação – Bacharelado - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2005. Disponível em: <<http://dsc.inf.furb.br/arquivos/tccs/monografias/2005-1arminioalexandreasvf.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2015.

COMPTRON INSTRUMENTS. **Guia RS-485.** Disponível em: <http://www.cromptonusa.com/rs485_guide.pdf> . Acesso em: 12 jun. 2016.

COELHO, M. S. **Sistemas Supervisórios.** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAUMcAH/sistemas-supervisorios>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

DINIZ, A. A.; PAULA, G. L. **Padronização de Desenvolvimento de Supervisório e CLP para Redução de Custos, Melhoria Operacional e de Manutenção.** Disponível em: <<http://www.visionsistemas.com.br/pt/wp-content/uploads/padronizacao-de-desenvolvimento-de-supervisorio-e-clp-para-reducao-de-custos-melhoria-operacional-e-de-manutencao.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2015.

GARCIA, C. Modelagem e Simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. 2ºed. São Paulo: Edusp, 2009.

ISENMANN, A. Processos Industriais. Prática do módulo "Alto-forno e aciaria.
Disponível em:
<http://www.timoteo.cefetmg.br/site/sobre/cursos/quimica/repositorio/roteiros/arq/Aluminotermia.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2014.

KONDRAVAS, I. Sistemas Supervisórios e Protocolos de Comunicação Industriais.
Disponível em:
http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/kondrasovas/materiais/5_Sistemas_Super.pdf. Acesso em: 05 jan. 2015.

MODICON. Guia Protocolo Modbus. Disponível em:
http://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf. Acesso em: 14 jun. 2016.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plinio Benedicto de Lauro. Engenharia de Automação Industrial. São Paulo: LTC, 2007. p. 124-135.

MORO & AURAS. Metalurgia do Pó. Disponível em:
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfgtwAC/metalurgiadopo> . Acesso em: 6 fev. 2016.

NETO, AUGUSTO J. LEDA. Compressores. Disponível em:
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABABAUGAC/compressores-1>. Acesso em: 26 maio 2016.

NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS. Conceitos básicos de RS-485. Disponível em:
<http://www.novus.com.br/> . Acesso em: 15 jun. 2016.

PINHEIRO, José Maurício Santos. Introdução às Redes de Supervisão e Controle. 2006.
Disponível em:
http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_redes_de_supervisao_e_controle.php. Acesso em: 01 nov. 2015.

SCADA BR. **Evolução da Automação.** Disponível em:
<http://www.scadabr.com.br/?q=forum/>. Acesso em: 14 jun. 2016.

RIBEIRO, M. A. **Automação Industrial.** 3ºed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 1999.

SILVA, A. P G.; SALVADOR, M. **O que são sistemas supervisórios?** Disponível em:
http://www.wectrus.com.br/artigos/sist_superv.pdf. Acesso em: 20 dez. 2014.

SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. **Automação e controle discreto.** São Paulo: Editora Érica, 1998.

SMAR. **Tutorial sobre a Tecnologia AS-i.** Disponível em:
<http://www.smar.com/brasil/asi#9>. Acesso em: 17 jun. 2015.

START MÁQUINAS. **Compressores Rotativos de Parafuso.** Disponível em:
<http://www.startmaquinasequipamentos.com.br/loja/categoria/COMPRESSORES/COMPRESSORES-ROTATIVOS-DE-PARAFUSO/>. Acesso em: 26 maio 2016.

TIAFLEX. **Cabo Manga AWG.** Disponível em: <http://www.tiaflex.com.br/>. Acesso em: 13 jun. 2016.