

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

**LUCIANO TOMAZZONI
ROBERTO MATHEUS OLEGARIO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO CONTROLADOR E
MANIPULADOR DE TENSIONAMENTO MECÂNICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2013**

LUCIANO TOMAZZONI
ROBERTO MATHEUS OLEGARIO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO CONTROLADOR E
MANIPULADOR DE TENSIONAMENTO MECÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELE, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Trojan

PONTA GROSSA
2013



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional



TERMO DE APROVAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO CONTROLADOR E MANIPULADOR DE
TENSIONAMENTO MECÂNICO**

por

LUCIANO TOMAZZONI e ROBERTO MATHEUS OLEGARIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 15 de Abril de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Flavio Trojan
Orientador

Prof. M. Eng. Murilo Oliveira Leme
Membro titular

Prof. Paulo Junior Silva Costa
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Luciano:

Eu tenho muito a agradecer a todos que, de forma direta e indireta, influenciam na minha vida e no meu aprendizado, começando por Deus e pelo seu infinito amor por todos nós. Sem Ele nada disso seria possível e sou eternamente grato pela vida e pela família que me deu.

Agradeço infinitamente a minha mãe, Geni Dominga Rossoni, pelo amor, carinho e incentivo, pelos cuidados prestados e por sempre estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Em nenhum momento fraquejou e nunca pensou em desistir de dar educação de qualidade para mim e para meu irmão, Armando Tomazzoni Junior, o qual também agradeço imensamente pelo apoio e pelos conselhos.

À minha namorada, melhor amiga e companheira de todas as horas, Angela Cristina Cataneo, pelo seu amor, carinho, solidariedade e por sempre me apoiar em todas as minhas decisões.

Ao orientador desta monografia, Prof. Dr. Flavio Trojan, pelo grande esforço prestado, pela sua dedicação e por sua paciência.

À Coordenação de Eletrônica e a todos os professores, pelo total apoio para a realização desse projeto.

Roberto:

Agradeço primeiramente a Deus por dar-me discernimento e sabedoria para vencer os obstáculos que encontro no dia a dia, pela família maravilhosa que me forneceu e pela vida que tenho.

Agradeço a minha mãe, Susette da Luz Olegario, por cuidar de mim em todos os momentos de minha vida, por me aguentar nos dias em que o trabalho foi estressante e a prova era difícil.

Ao meu pai, Sergio Luiz Olegario, por sempre me incentivar a buscar os meus objetivos, dar o meu melhor e por ter me incentivado a prestar vestibular na UTFPR. Sem o incentivo dele, certamente eu não chegaria até aqui.

Às minhas irmãs, Renata Cristina Olegario e Tatiana Cristina Olegario que, mesmo com as perturbações de todos os dias, não deixam de me ajudar e apoiar nos obstáculos que encontrei durante a vida acadêmica.

Agradeço também ao meu primo Lucas Chrestani e ao meu sobrinho Murilo Baggio, que me alegram nos finais de semana com a magia de ser criança.

Agradeço a minha namorada, Mariane Letícia Pedroso, por todo amor e carinho que tem me dado. Ela que acompanhou toda minha trajetória acadêmica, vibrando comigo nos objetivos alcançados, me ajudando nas dificuldades e me incentivando quando novas etapas surgiam.

Agradeço ao nosso orientador e também colega, Prof. Dr. Flavio Trojan, por ter aceitado nosso convite de orientador e ter nos incentivado para a conclusão deste trabalho.

À instituição, por nos ceder espaço para as atividades do projeto. Aos professores da Coordenação de Eletrônica pelo apoio que nos deram em especial ao Prof. Paulo Júnior Silva da Costa, que acompanhou este trabalho desde o início e também aos nossos colegas que de alguma forma nos ajudaram.

RESUMO

O processo de enrolamento de rotores para motores elétricos apresenta uma necessidade de tensionamento constante. Este trabalho apresenta uma alternativa de automatização para uma máquina de enrolamento de rotores para ajudar a solucionar o problema do tensionamento da fiação de enrolamento. Descreve o processo de enrolamento de rotor e suas características, aborda os problemas encontrados nesse processo e quais são os pontos críticos que podem ser melhorados. Como metodologia, o trabalho explora as variáveis envolvidas no processo e desenvolve um circuito eletroeletrônico específico para amplificação de um sinal oriundo de uma célula de carga, a qual simula o tensionamento no processo. O sinal é então inserido em uma lógica de programação em CLP (*Ladder*) que efetua o controle e manipulação de saídas discretas, as quais devem ajustar a tensão do fio de enrolamento do rotor para um valor ideal. São apresentados os valores, estatísticas e os resultados obtidos e como principal resultado percebe-se, em modo automático, uma redução do tempo médio de ajuste do tensionamento de aproximadamente 97% de tempo perdido. Apesar de que em algumas empresas a solução automatizada já exista, este trabalho aborda e desenvolve uma solução eficiente e de baixo custo para este problema.

Palavras-chave: Automatização. Enrolamento de rotor. Processo. Circuito eletroeletrônico. Integração.

ABSTRACT

The process of winding rotors for electric motors presents a constant need for tensioning. This work presents an alternative to an automated winding machine rotor to help solve the problem of tensioning wire winding. Describes the process of winding rotor and its characteristics, discusses the problems encountered in this process and what are the critical points that can be improved. The methodology explores the work involved variables in the process and develops a specific electronics circuit for amplifying a signal coming from a load cell, which simulates the tensioning process. The signal is then inserted into a logic programming in CLP (Ladder) that performs the control and manipulation of discrete outputs, which should adjust the tension of the wire winding rotor to an ideal value. The values, stats and results and how it is perceived main result in automatic mode, reducing the mean time to adjust tension of approximately 97% of lost time. Though some companies in the automated solution already exist, this work addresses and develops an efficient and cost effective for this problem.

Keywords: Automated. Winding rotor. Process. Electronics circuit. Integration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema elétrico de um amplificador operacional	25
Figura 2 - Sistema de controle	27
Figura 3 - Composição do servoacionamento	29
Figura 4 - Circuito amplificador de tensão	31
Figura 5 - Programação STEP 7-Micro/WIN 32	33
Figura 6 - Base da haste	35
Fotografia 1 - Protótipo.....	32
Fotografia 2 - Máquina de tensionamento manual	35
Fotografia 3 - Sistema completo de tensionamento	36
Gráfico 1 - Tempo de tensionamento	37
Gráfico 2 - Defeitos de qualidade	38
Gráfico 3 - Peças perdidas devido ao tensionamento e aos demais problemas	39
Gráfico 4 - Gasto mensal com peças retrabalhadas.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores obtidos após aplicar força sobre a célula de carga	34
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
Hz	Hertz
kg	Quilograma
kW	Quilowatt
mA	Mili Ampères
mV	Mili Volts
PC	<i>Personal Computer</i>
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
V	<i>Volts</i>
Vcc	Voltagem corrente contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 TEMA DA PESQUISA	11
1.1.1 Delimitação do tema	11
1.2 PROBLEMA.....	12
1.3 PREMISSA	12
1.4 OBJETIVOS	12
1.4.1 Objetivo Geral.....	12
1.4.2 Objetivos Específicos	12
1.5 JUSTIFICATIVA	13
1.6 MÉTODO DA PESQUISA.....	13
1.7 RECURSOS	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 INTRODUÇÃO AOS MOTORES ELÉTRICOS.....	14
2.1.1 Atração e Repulsão	14
2.1.2 Magnetismo	14
2.1.3 Eletromagnetismo.....	15
2.2 TEORIA E FUNCIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS	15
2.2.1 Elementos construtivos.....	17
2.2.2 Perdas	18
2.3 CÉLULAS DE CARGA E SUAS APLICAÇÕES.....	19
2.3.1 Princípio de funcionamento	19
2.3.2 Aplicações	20
2.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP).....	22
2.4.1 Entradas analógicas e digitais de um CLP	22
2.4.2 Dispositivos utilizados.....	23
2.5 AMPLIFICADOR OPERACIONAL.....	24
2.5.1 Esquema elétrico.....	24
2.5.2 Polarização.....	26
2.6 CONTROLES DE PROCESSO	27
2.7 SERVOMOTORES.....	28
3 DESENVOLVIMENTO	30
3.1 COMPONENTES DO PROTÓTIPO	30
3.1.1 Desenvolvimento do protótipo	30
3.2 TENSIONAMENTO MECÂNICO MANUAL	34
3.2.1 Implementação do protótipo	35
3.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	37
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Um motor elétrico é uma máquina capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica utilizando normalmente o princípio da reação entre dois campos magnéticos. Os principais elementos específicos dos motores são os pacotes de chapas do estator, do rotor e dos enrolamentos, que são denominados de partes ativas. O rotor de um motor elétrico é a parte girante do motor e pode ser constituído por um pacote de lâminas de um material ferromagnético envolto num enrolamento constituído de condutores de cobre, designado como enrolamento de campo, que tem como principal função produzir um campo magnético constante. Por esse motivo, deve-se ter um cuidado minucioso em sua construção para uma melhor qualidade do enrolamento.

A tensão elétrica aplicada nesse enrolamento é contínua e a intensidade da corrente suportada por esse enrolamento é muito menor que o enrolamento de um estator. Além disso, o rotor pode conter dois ou mais enrolamentos, sempre em número par e todos conectados em série, sendo que cada enrolamento será responsável pela produção de um dos pólos do eletroímã. Em algumas máquinas síncronas o rotor pode ser constituído por um ímã permanente no lugar de um eletroímã, sendo neste caso denominada máquina síncrona de ímã permanente.

No setor de manufatura da empresa Makita do Brasil Ferramentas Elétricas Ltda. Planta - Paraná encontra-se a linha de produção chamada de 131, a qual é responsável pela moldagem, enrolamento, envernizamento e acabamento dos rotores de modelo (tamanho) 55 e 72.

A produção de um rotor é composta por quatro processos, os quais são: duas linhas de moldagem AM-1 e AM-2, duas linhas de enrolamento de rotor AW-1 e AW-2, uma linha de envernizamento *Varnish* e uma linha para o acabamento AF-1.

O processo de moldagem é relativamente simples. Acontece quando o eixo do rotor é colocado em uma máquina sob uma temperatura elevada. Em seguida, o núcleo é inserido e a máquina prensa-os, injetando um verniz, o que isola o eixo do núcleo assim que a peça se resfria. Um dos problemas mais comuns no processo da moldagem é a não isolação da peça. Isso pode ocorrer devido à má qualidade do verniz, decorrente de atrasos na entrega do produto pelo fato de ser matéria prima importada. Uma solução que pode ser adotada é a mudança de fornecedor para um localizado mais próximo, o que gera redução no tempo de entrega e,

consequentemente, aumenta o tempo de vida útil do produto na fábrica, mantendo sua qualidade preservada.

O processo de enrolamento do rotor basicamente ocorre na seguinte sequência:

1. Uma caixa com um eixo moldado é inserida em uma esteira de rolos na máquina de despaletização de rotores;
2. O eixo é retirado da caixa e colocado na entrada do processo de isolamento;
3. Neste processo, uma máquina insere um papel isolante, isolando o eixo do enrolamento;
4. Logo em seguida ocorre a prensagem do comutador no eixo entre a saída da prensagem do comutador e a entrada da máquina de enrolamento;
5. É feita uma checagem visual da peça por um operador, que analisa as condições do comutador e do papel isolante e, caso esteja tudo dentro do padrão, a peça continua no processo, caso contrário é retrabalhada;
6. Entre a saída da máquina de enrolamento e a entrada da máquina de inserir calço é feita uma nova verificação do rotor e do enrolamento;
7. Depois de inserir o calço, o próximo processo é a soldagem do comutador. Entre a soldagem do comutador e o teste elétrico, o comutador é resfriado e reprensado e a máquina de teste elétrico verifica a posição do comutador em relação ao rotor e avalia a sua resistência e seu isolamento;
8. Após esse processo é feita uma última checagem visual pelo operador, avaliando o rotor finalizado. Por fim, o último processo consiste em paletizar a caixa e efetuar a contagem de peças.

O processo de enrolamento é o mais problemático e os defeitos mais comuns nesse processo são: comutador danificado por falha de prensagem, enrolamento solto, enrolamento esticado, enrolamento quadrado e fio arrebitado. Esses defeitos são provenientes de inconsistências no processo de tensionamento. Uma medida que foi adotada pela empresa é polir com mais frequência as chapas que aplicam pressão no fio, tentando assim manter a tensão o mais estável e constante possível, só que para isso é necessário parar a máquina para realizar essa atividade, o que acarreta na diminuição da eficiência da máquina. Porém esta medida é paliativa, pois depois de um tempo os defeitos decorrentes do tensionamento voltam a ocorrer.

O envernizamento do rotor é o único processo em que não é necessária a intervenção e/ou ação de um operador. As caixas que saem do enrolamento são colocadas na máquina de verniz, que por sua vez possui no seu interior uma grande corrente, na qual os rotores ficam presos para circular dentro da máquina. Esse processo faz com que a peça se aqueça à aproximadamente 50°C. Ela despeja o verniz sobre as partes expostas de fio de cobre e resfria a peça antes de sair da máquina. O defeito mais frequente nesse processo é o verniz com bolhas, que ocorre quando a peça não é aquecida suficientemente antes que seja despejado o verniz sobre ela.

O processo de acabamento também é crítico, pois qualquer dano ao rotor neste momento acarretará na perda da peça, a qual não poderá mais ser aproveitada.

Devido à aquisição de um lote de fio de cobre com resina de má qualidade, a tensão do fio neste lote passou a ser inconstante, pois, ao entrar em contato com a chapa e com as roldanas da máquina, a resina se soltava e caía sobre o tensionador, influenciando negativamente no tensionamento. A variação de tensão mecânica começou a ultrapassar os limites permitidos de tolerância e a medição desse tensionamento manual já não é mais garantida. Esse trabalho foi elaborado para solucionar os problemas ocorridos no tensionamento mecânico do processo manual de enrolamento de rotores, focado na máquina que executa o processo de enrolamento de tamanho 72 (AW-1). A solução proposta é realizar o controle automático do tensionamento mecânico do fio de cobre, para enrolamento de rotores em motores elétricos.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Automação eletromecânica através de um controlador automático de tensão mecânica.

1.1.1 Delimitação do tema

Este projeto visa desenvolver um sistema automatizado de tensionamento mecânico para uma máquina de enrolamento de rotores para motores elétricos substituindo equipamentos que são operados manualmente.

1.2 PROBLEMA

Conforme dados coletados da empresa Makita do Brasil, 50% dos problemas de qualidade na construção de motores elétricos são provenientes do processo de enrolamento do rotor, oriundos da inconstância do tensionamento mecânico do fio de cobre para enrolamento. Esse tensionamento mecânico manual faz com que o operador se afaste das demais máquinas e, conseqüentemente, sua produção apresente baixa qualidade final.

Esse trabalho explora a possibilidade de desenvolver um sistema automático de tensionamento mecânico, que controle o valor dessa tensão mecânica, permitindo sua monitoração e garantindo que esta permaneça em um valor dentro dos parâmetros admitidos para a máquina de enrolamento de rotor.

1.3 PREMISSA

Com o desenvolvimento de um sistema de controle de tensão mecânica automática, os retrabalhos e as perdas de produção podem diminuir e a aquisição de outros tipos de fios pode ser admitida, reduzindo os custos de produção do rotor.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um tensionador automático, o qual controle a tensão de acordo com os comandos fornecidos, objetivando assim reduzir perdas e custos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar o problema e apresentar uma proposta de solução automatizada;
- Apresentar as características implícitas no enrolamento de rotores no processo de construção de motores elétricos e medição de tensão mecânica;
- Desenvolver programação para o CLP do sistema de controle automatizado que irá atuar sobre o sistema de medição;

1.5 JUSTIFICATIVA

Ao ser implementado, esse tensionador automático poderá diminuir o tempo que o operador perde para medir a tensão do fio e possivelmente minimizará a quantidade de fio perdido durante a medição. Atualmente é gasto o equivalente a uma peça por dia de fio de cobre no processo de medição da tensão mecânica no enrolamento do rotor, ou seja, o custo para se produzir uma peça (rotor com enrolamento dentro dos padrões) é de aproximadamente R\$2,39 e, analisando que a medição é feita uma vez por dia, cinco dias na semana, com todos os meses do ano contados com 30 dias, pode-se chegar a uma economia de R\$4.302,00 no período de um ano com o processo automatizado. Com essa quantia seria possível produzir 1800 novas peças.

Além disso, com a automatização desta etapa do processo, o tempo gasto para tensionamento manual poderá ser reduzido, o que aperfeiçoará a linha de produção, deixando-a mais rápida, com maior qualidade e confiabilidade.

1.6 MÉTODO DA PESQUISA

O método indutivo será utilizado para a resolução do problema apresentado nesta pesquisa, através da observação de dados e informações sobre as variáveis envolvidas no processo de enrolamento de rotores para motores elétricos. Pretende-se com essa observação induzir a uma proposta de solução pelo modelamento lógico do processo, gerando assim um sistema de controle automatizado, proporcionando também oportunidades para a generalização da pesquisa.

1.7 RECURSOS

Foram utilizados os laboratórios da UTFPR Campus Ponta Grossa para o desenvolvimento, testes e montagem do protótipo. A biblioteca dessa instituição e a internet foram usadas como fonte de pesquisas sobre manuais em geral, manuais específicos, equipamentos de medição, suas principais características e a compatibilidade com *softwares* e com os demais equipamentos utilizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta um estudo geral sobre motores elétricos, seus elementos construtivos, moldagem, enrolamento e o seu funcionamento, células de carga e suas aplicações, entradas analógicas e digitais de um CLP e circuitos elétricos em geral. Esses conceitos servem de base para o desenvolvimento deste trabalho e tem o objetivo de esclarecer, através de uma base conceitual, os pontos relevantes da pesquisa.

2.1 INTRODUÇÃO AOS MOTORES ELÉTRICOS

Para serem bem compreendidos e analisados, os motores elétricos foram criados baseados em três conceitos principais, os quais são inevitáveis e essenciais para todo o ramo da eletricidade. São eles: Atração e Repulsão, Magnetismo e Eletromagnetismo.

2.1.1 Atração e Repulsão

Todos os corpos carregados eletricamente possuem um campo elétrico ao seu redor. Esse campo elétrico é representado por linhas invisíveis de força, as quais representam um campo elétrico invisível. Com esse conceito, podemos aplicar aquele velho ditado popular que diz que “os opostos se atraem”. Aqui literalmente ele é aplicado, pois quando dois corpos carregados com cargas contrárias são colocados juntos, seus campos elétricos trabalharam para atraí-los. Já quando dois corpos carregados com cargas iguais são colocados juntos, seus campos elétricos trabalharam para repeli-los (ABNT, 1988).

2.1.2 Magnetismo

As linhas invisíveis de força criadas pelos ímãs naturais e pelos eletroímãs são denominadas de Magnetismo. Os ímãs possuem duas características principais: realizam a atração e se prendem aos materiais ferromagnéticos e quando livres para se moverem, como, por exemplo, a agulha de uma bússola, apontam para os pólos Norte e Sul (SALMERON, 1966).

2.1.3 Eletromagnetismo

A movimentação dos prótons e dos elétrons ocorre constantemente entre os átomos. A falta dos elétrons cria uma carga positiva, pois há uma maior quantidade de prótons do que de elétrons, já o excesso de elétrons cria uma carga negativa no corpo afetado. Os elétrons que são forçados para fora de suas órbitas podem resultar na falta de elétrons no átomo de onde saem e em um excesso no átomo para onde vão. Todo esse processo consiste no Eletromagnetismo, o qual é essencial para o funcionamento de um motor elétrico (SALMERON, 1966).

2.2 TEORIA E FUNCIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é definido como uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Existem diversos tipos de motores no mercado e os tipos mais comuns são os de corrente contínua e alternada. Os motores elétricos de corrente alternada são os mais utilizados, pois a distribuição da energia elétrica feita pelas concessionárias geralmente é feita nesse modo, facilitando a sua aplicação e instalação. Dentre eles podemos destacar os motores síncronos, que funcionam trabalhando em velocidade fixa e são utilizados somente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos reduzidos). Os motores de indução são os mais utilizados entre todos os tipos, pois combinam vantagens de utilização de energia elétrica, de baixo custo, de facilidade no transporte, de limpeza e de simplicidade dos comandos devido a sua simples construção. O custo reduzido, a grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais variados tipos e os melhores rendimentos são marcas registradas nesses modelos. Atualmente é possível controlar a velocidade desses motores com o auxílio de inversores de frequência (FITZGERALD, 1975).

Os motores assíncronos são constituídos basicamente pelos seguintes elementos: um circuito magnético estático ou simplesmente estator, que é constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si, por bobinas localizadas em cavidades abertas e que são alimentadas pela rede de corrente alternada, por um rotor constituído de um núcleo ferromagnético, também laminado, sobre o qual se encontra um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos, nos quais são induzidas correntes provocadas pela corrente alternada das bobinas do estator. O rotor é apoiado num veio, que por sua vez transmite a energia

mecânica produzida à carga. O entreferro (distância entre o rotor e o estator) é bastante reduzido, de forma a reduzir a corrente em vazio e as perdas, mas também para aumentar o fator de potência em vazio. A partir do momento que os enrolamentos localizados nas cavidades do estator ficam sujeitos a uma corrente alternada, gera-se um campo magnético no estator e, conseqüentemente, no rotor surge uma força eletromotriz induzida, devido ao fluxo magnético variável que atravessa o rotor. A força eletromotriz induzida dá origem a uma corrente induzida no rotor que tende a opor-se à causa que lhe deu origem, criando assim um movimento giratório no rotor (FITZGERALD, 1975).

Os motores monofásicos são assim chamados porque os seus enrolamentos de campo são ligados diretamente a uma fonte monofásica. Os motores de indução monofásicos são uma alternativa aos motores trifásicos nos locais onde não se dispõe de alimentação com três fases, como, por exemplo, residências, escritórios, oficinas e em zonas rurais. Apenas se justifica a sua utilização para baixas potências (1 a 2 kW). Entre os vários tipos de motores elétricos monofásicos, os motores com rotor tipo gaiola destacam-se pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez e manutenção reduzida. Por terem somente uma fase de alimentação, não possuem um campo girante como os motores trifásicos, mas sim um campo magnético pulsante. Isto impede que tenham torque de arranque, tendo em conta que no rotor se induzem campos magnéticos alinhados com o campo do estator. Para solucionar o problema de arranque, são utilizados enrolamentos auxiliares, que são dimensionados e posicionados de forma a criar uma segunda fase fictícia, permitindo a formação do campo girante necessário para o arranque (DEL TORO, 1994).

O motor de indução trifásico é o modelo mais utilizado na indústria, devido à maioria dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica serem trifásicos de corrente alternada. A utilização desses motores é aconselhável a partir dos 2 kW. Ele apresenta vantagens em relação ao monofásico, sendo que possui o arranque mais fácil, têm um menor nível de ruído e um menor preço. O motor trifásico tipo gaiola de esquilo é o mais utilizado na indústria atualmente. Ele tem a vantagem de ser mais econômico em relação aos motores monofásicos, tanto na sua construção como na sua utilização. Além disso, escolhendo o método de arranque ideal, tem um campo muito maior de aplicações (DEL TORO, 1994).

O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio (condutores), dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, também em alumínio, que curto circuitam os condutores. O estator do motor é também constituído por um núcleo ferromagnético laminado, que nas cavidades são colocados os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica. A vantagem deste rotor ao rotor bobinado é que resulta numa construção mais rápida, mais prática e mais barata. As barras condutoras da gaiola são colocadas geralmente com certa inclinação, para evitar as trepidações e ruídos que resultam da ação eletromagnética entre os dentes das cavidades do estator e do rotor. A principal desvantagem refere-se ao fato de o torque de arranque ser reduzido em relação à corrente absorvida pelo estator (FITZGERALD, 1975).

2.2.1 Elementos construtivos

Todos os motores elétricos têm em comum vários elementos construtivos. Adicionalmente, o motor de indução possui certos elementos específicos que o caracterizam. Entre os elementos comuns a todos os tipos de motores, estão as partes estruturais como: carcaça, tampas laterais, porta mancais, mancais, eixo, chavetas, guias de ar, ventiladores externos e internos, trocadores de calor (ar/ar ou ar/água), caixas de ligações, tampas de inspeção, flanges, pés de fixação, etc. Os materiais empregados para carcaça, porta mancais, caixas de ligações e ventiladores podem ser de ferro fundido ou chapa de aço. Guias de ar, trocadores de calor e tampas de inspeção são normalmente feitos em chapa de aço. Alumínio e fibra de vidro também são materiais usuais para alguns desses itens. Eixos e chavetas são usualmente feitos de aço forjado ou laminado (DEL TORO, 1994).

Os principais elementos específicos dos motores são os pacotes de chapas do estator, do rotor e enrolamentos, que são denominadas de partes ativas. Embora possam ser consideradas substancialmente semelhantes nos diversos tipos de motores, significativas diferenças no número, arranjo e construção dos enrolamentos e nos núcleos ferromagnéticos produzem diferentes características de funcionamento (DEL TORO, 1994).

Nos motores assíncronos, o núcleo do estator geralmente é constituído por um pacote de chapas de aço silício isolado por camada de verniz. O pacote de chapas poderá constituir-se de uma única peça ou ser subdividida em vários pacotes

menores, montados sobre o eixo com pequenos intervalos entre eles, a fim de permitir a passagem do ar de refrigeração. Algumas vezes, em motores de baixa potência, são usadas simplesmente chapas de aço com baixo teor de carbono, tratadas termicamente para crescimento do grão e para depósito de uma camada de óxido isolante na superfície. Nas ranhuras do estator são alojadas as bobinas do enrolamento trifásico. Para os motores de baixa tensão, os fios que compõem o enrolamento são geralmente de cobre, de seção circular e isolada com camadas de esmalte. Para motores de média tensão, os condutores são de cobre, geralmente de seção retangular, isolados com fitas de material isolante à base de mica ou fibra de vidro, aglomeradas com resina sintética. Uma vez inseridos nas ranhuras, os enrolamentos sofrem uma amarração com cadarços de fibra de vidro e são submetidos a uma impregnação com resina epóxi ou poliéster, que após a cura lhes proporciona uma maior rigidez mecânica e dielétrica (DEL TORO, 1994).

O núcleo do rotor dos motores assíncronos é basicamente igual ao do estator. No caso de motores de rotor enrolado, o enrolamento é substancialmente igual ao do estator, com a diferença que os três terminais de saída são ligados a três anéis condutores, montados no eixo de motor e sobre os quais, escovas de carvão fixas à estrutura da carcaça, permitem a inserção de resistores externos para partida ou regulação de velocidade. Em se tratando de motores de gaiola, o enrolamento do rotor é composto por barras de cobre, inseridas nas ranhuras e soldadas nas duas extremidades a anéis de curto-circuito. Em motores de pequena potência, a gaiola é invariavelmente constituída de alumínio fundido. É possível a construção de rotores com duas gaiolas independentes, uma mais próxima à periferia do rotor e outra montada embaixo da primeira (DEL TORO, 1994).

2.2.2 Perdas

Um motor elétrico, operando em regime permanente, está sujeito aos seguintes tipos de perdas: perdas nos enrolamentos, perdas em vazio, perdas mecânicas e perdas suplementares (ANTUNES & FREIRE, 1998).

As perdas no cobre são provocadas pela passagem da corrente elétrica nos enrolamentos de estator e rotor. Estas perdas acontecem devido ao efeito Joule, que aquece os enrolamentos e estão diretamente relacionadas com o quadrado das correntes (ANTUNES & FREIRE, 1998).

As perdas no núcleo estão relacionadas à passagem do fluxo magnético no circuito do estator e do rotor. Estas perdas originam o aquecimento das chapas de aço silício do estator e rotor e são quase independentes da carga mecânica, sendo vista em várias situações como uma perda fixa (ANTUNES & FREIRE, 1998).

As perdas no ferro podem ser medidas pela potência de entrada na máquina quando ela está funcionando sem carga à velocidade ou frequência nominal e sob as condições apropriadas de fluxo ou tensão. Usualmente, são tomados valores para traçar uma curva de perdas em função da tensão na armadura. As perdas no ferro em carga são determinadas então para uma tensão em vazio igual à tensão nominal (ANTUNES & FREIRE, 1998).

As perdas mecânicas e suplementares são compostas pelas perdas dielétricas no isolamento das bobinas do estator na estrutura metálica de suporte das chapas do núcleo do motor. As perdas mecânicas ou rotacionais estão relacionadas ao atrito nas escovas e nos mancais e a potência cedida para a ventilação, isto é a potência necessária para circular o ar através da máquina e sistema de ventilação, por meio de ventiladores internos ou externos. As perdas por atrito e ventilação podem ser medidas pela determinação da potência de entrada à máquina girando em velocidade apropriada, mas sem carga e sem excitação (ANTUNES & FREIRE, 1998).

2.3 CÉLULAS DE CARGA E SUAS APLICAÇÕES

O uso de células de carga como dispositivos de medição de força abrange uma grande área de aplicações, desde as pequenas balanças comerciais até o controle de processos industriais e em sua automatização. O fato de que a variável “peso” nos dias atuais é indispensável em grande parte das transações comerciais contribuiu para que a sua popularização crescesse rapidamente, fazendo dela um dispositivo essencial. O peso também é uma das medições mais frequentes dentre as grandezas físicas nos processos (ALVES, 2005).

2.3.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor, o qual é conhecido por extensômetro ou *strain gage*, quando submetido a uma deformação. Utiliza-se em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo a ponte de *Wheatstone* e o

desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada. Os extensômetros são colados a uma peça metálica, denominada corpo da célula de carga. A força atua sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade. Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objeto de um meticuloso cuidado, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a sua relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a consequente deformação dos extensômetros seja preservada, tanto no ciclo inicial de pesagem quanto nos ciclos subsequentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica deve conduzir a um resultado linear. Considerando-se que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida, há necessidade de se compensar os efeitos de temperatura, através da introdução no circuito de *Wheatstone* de resistências especiais que variem com o calor de forma inversa a dos extensômetros (ALVES, 2005).

Um efeito normalmente presente no ciclo de pesagem e que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria prima da célula de carga é o da histerese, decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas. Outro efeito que também deve ser controlado é a repetibilidade, ou seja, indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente, também deve ser verificada e controlada através do uso de materiais isotrópicos e da correta aplicação da força sobre a célula de carga. Deve-se considerar também o fenômeno da fluência ou *creep*, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresenta-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma (ALVES, 2005).

2.3.2 Aplicações

A mais popular aplicação das células de carga é nas balanças comerciais eletrônicas. Elas utilizam uma célula única, especialmente desenvolvida para

suportar, sem prejuízo de medição, um esforço de torção decorrente da carga eventualmente colocada na extremidade do prato (THOMAZINI, 2008).

Outra aplicação frequente é na pesagem de tanques e silos, que permite um controle muito preciso do material recebido em estoque e descarregado pelo reservatório. Nesses casos especiais, cuidados devem ser tomados com as escadas, tubulações e eletrodutos: as primeiras não devem interconectar o reservatório ao solo e as duas últimas dispõem de conexões flexíveis e, se possível, diante do deslocamento vertical do reservatório (THOMAZINI, 2008).

Equipamentos de dosagem é outra aplicação importante para células de carga, sendo que uma determinada fórmula de mistura é estabelecida através de *set-points* na instrumentação, que comandará a abertura e fechamento das válvulas, cada vez que retirada uma determinada quantidade de material de cada reservatório. Neste caso, o princípio da dosagem pode ser contínuo, com as células de carga instaladas em cada reservatório, subtraindo o valor descarregado do mesmo, ou por batelada, em que as células de carga ficam instaladas em um reservatório auxiliar, no qual os tanques, um de cada vez, descarregam o material adicionando valores de acordo com uma fórmula predefinida. Na escolha do método de dosagem contínuo ou de batelada, deve-se levar em consideração a precisão necessária do sistema, que é definida como o erro admissível do componente de menor peso na fórmula. Obviamente que o processo por batelada conduz a uma maior precisão absoluta, dado que a capacidade nominal das células de carga que o suportam é menor do que as instaladas nos reservatórios. Por outro lado, o uso do sistema contínuo permite acessoriamente o controle do nível dos reservatórios que o compõe (THOMAZINI, 2008).

A aplicação de células de carga em balanças rodoviárias, principalmente quando associadas a sistemas computadorizados, permite o controle de fluxo de mercadorias a granel nos estabelecimentos industriais, com a memorização do peso vazio dos veículos e a possibilidade de obtenção de até dez mil divisões da capacidade nominal da balança. Diversas soluções de dispositivos de montagem para células de carga de balanças de veículos já foram desenvolvidas, sendo a mais popular a que utiliza um par de elos, que permite cinco graus de liberdade de deslocamento para a plataforma, deixando a célula de carga inteiramente livre para receber unicamente a força vertical da carga aplicada. O advento das células de carga do tipo cisalhamento ou *shear beam* possibilitou o desenvolvimento de

plataformas de pesagem de baixo perfil, ou seja, balanças com capacidade nominal muito alta, dimensões muito variadas, baixo perfil e muito mais leves, se comparadas com suas congêneres mecânicas. O uso destas plataformas é bastante facilitado por ser de fácil deslocamento, de necessitar de rampas ou recessos de baixa altura, por possibilitar um resultado digitalizável e por serem à prova de umidade (FIALHO, 2002).

A mais popular aplicação de células de carga é nas balanças comerciais eletrônicas. Elas utilizam uma célula única, especialmente desenvolvida para suportar, sem prejuízo de medição, um esforço de torção, decorrente da carga eventualmente colocada na extremidade do prato. Existem também outros tipos de aplicações, como, por exemplo, balanças de guindastes, pontes rolantes, balanças de fluxo para pesagem dinâmica de correias transportadoras e afins (FIALHO, 2002).

2.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)

Pode-se definir um CLP como um pequeno computador industrial que contém um *hardware* e um *software* e que é utilizado para realizar funções de controle. Ele tem a sua história iniciada no ano de 1968 e foi desenvolvido para solucionar vários problemas que uma grande montadora de veículos enfrentava na época. Todo o sistema de controle era constituído de relés e, quando se mudava o modelo do veículo a ser produzido ou necessitava-se de modificações, toda a empresa perdia dias e até semanas alterando esse sistema (ANTONELLI, 1998).

Hoje em dia existem várias linguagens de programação e inúmeros modelos de CLPs que são utilizados em todo o tipo de aplicação, já que ele pode oferecer ciclos de programas mais rápidos, um sistema de entrada/saída compacto, interfaces especiais e indicação de falhas no processo ou no próprio dispositivo (ANTONELLI, 1998).

2.4.1 Entradas analógicas e digitais de um CLP

As interfaces de entrada analógica permitem que o CLP possa manipular grandezas analógicas, enviadas normalmente por sensores eletrônicos. As grandezas analógicas elétricas tratadas por estes módulos são normalmente tensão e corrente. No caso da tensão, as faixas de utilização são de 0 a 10 Vcc, de 0 a 5 Vcc, de 1 a 5 Vcc, de -5 a +5 Vcc ou de -10 a +10 Vcc. As interfaces que permitem

entradas positivas e negativas de tensão são chamadas de entradas diferenciais e no caso de corrente, as faixas utilizadas são de 0 a 20 mA ou de 4 a 20 mA (FRANCHI, 2008).

Uma peculiaridade das entradas analógicas é a sua resolução. Esta é normalmente medida em *bits*. Uma entrada analógica com um maior número de *bits* permite uma melhor representação da grandeza analógica. Por exemplo: uma placa de entrada analógica de 0 a 10 Vcc com uma resolução de 8 *bits* permite uma sensibilidade de 39,2 mV, enquanto que a mesma faixa em uma entrada de 12 *bits* permite uma sensibilidade de 2,4 mV e uma de 16 *bits* permite uma sensibilidade de 0,2 mV (FRANCHI, 2008).

As saídas digitais admitem apenas dois estados: ligado e desligado. É possível com esses sinais controlar dispositivos do tipo: relés, contadores, solenóides, válvulas e inversores de frequência (FRANCHI, 2008).

As saídas digitais podem ser construídas de três formas básicas: saída digital a relé, saída digital 24 Vcc e saída digital à *TRIAC*. Nos três casos é de costume prover o circuito de um isolamento galvânico, normalmente opto acoplado (FRANCHI, 2008).

Geralmente os módulos de entrada e saída são dotados de isolamento óptica para proteção da *CPU*, fonte de alimentação e demais módulos, indicadores luminosos de status para auxílio durante a manutenção, conectores removíveis que reduzem o tempo de manutenção e/ou substituição dos módulos (FRANCHI, 2008).

2.4.2 Dispositivos utilizados

Os principais dispositivos utilizados com as entradas analógicas são: sensores de pressão manométrica; sensores de pressão mecânica (*strain gauges*, utilizados em células de carga); taco (geradores para medição rotação de eixos); transmissores de temperatura; transmissores de umidade relativa (PRUDENTE, 2007).

Os módulos ou interfaces de saída analógica convertem valores numéricos em sinais de saída de tensão ou corrente. Com estes sinais, é possível controlar dispositivos atuadores do tipo: válvulas proporcionais, motores, servomotores, inversores de frequência e posicionadores rotativos (PRUDENTE, 2007).

2.5 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O amplificador operacional é um componente eletrônico compacto, construído da junção de resistores, capacitores e transistores. Os primeiros amplificadores operacionais foram desenvolvidos na década de 40 através de válvulas e as características destes primitivos amplificadores operacionais eram limitadas. Com o surgimento do transistor na década de 50, ele foi implementado nos amplificadores e com isso foi possível notar uma evolução. Porém na década de 60, com o surgimento dos circuitos integrados, o amplificador operacional teve sua maior evolução onde algumas empresas lançaram os primeiros amplificadores operacionais monolíticos $\mu A702$. Inicialmente o $\mu A702$ apresentou uma série de problemas, tais como baixa resistência de entrada, baixo ganho, alta sensibilidade a ruídos, necessidade de alimentação -6 V e $+12\text{ V}$. Foi então que, após diversas melhorias e revisões do projeto inicial, foi lançado, em 1965, o conhecido $\mu A709$. Ele foi considerado o primeiro amplificador operacional confiável lançado no mercado. Este componente era largamente utilizado para computar as operações matemáticas, como soma e integrações e por esse motivo recebe o nome de amplificador operacional (NILSSON & RIEDEL, 1999).

Evidentemente, como os avanços tecnológicos não param, atualmente existem diversos tipos de amplificadores operacionais, com características superiores às do $\mu A709$, como por exemplo, o LF351 e o CA3140 (NILSSON & RIEDEL, 1999).

2.5.1 Esquema elétrico

O amplificador operacional possui duas entradas e uma saída, onde a função é apresentar na saída o múltiplo da diferença entre as duas entradas, com base no ganho de tensão. Conforme pode ser observado na figura abaixo, existem três estágios em sua montagem: *input stage* (estágio de entrada), *second stage* (segundo estágio) e *output stage* (estágio de saída) (WENDLING, 2010).

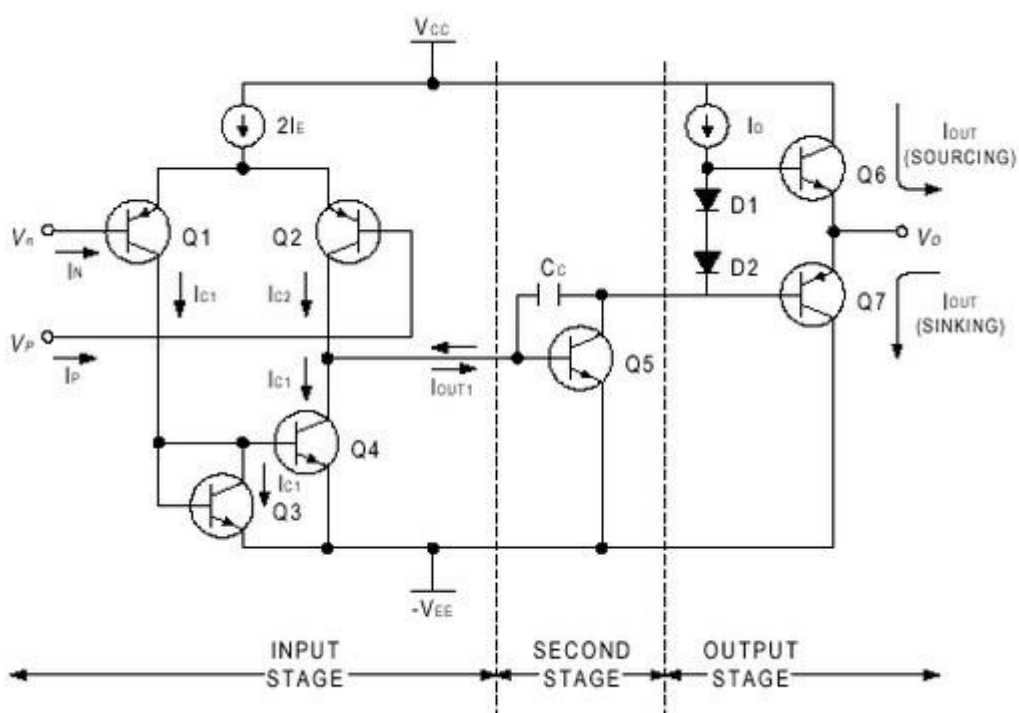


Figura 1 - Esquema elétrico de um amplificador operacional
Fonte: WENDLING, 2010

O estágio de entrada compara as tensões aplicadas, as amplifica e gera um sinal de corrente proporcional à diferença entre as mesmas. Este sinal pode solicitar ou fornecer corrente elétrica para o próximo estágio, dependendo das configurações aplicadas. No segundo estágio o sinal é amplificado mais uma vez e existem correções de desvios de frequência que possam vir a ocorrer no processo de comparação e ganho. Por fim, o estágio de saída é um amplificador com dois transistores, os quais atuam como fonte de corrente ou como sumidouro, podendo a corrente elétrica entrar ou sair do circuito (WENDLING, 2010).

É importante observar que existem duas tensões de alimentação: $-V_{CC}$ e $+V_{CC}$, as quais devem ser simétricas e geralmente operam com ± 15 V. Os índices C e E referem-se à tensão no emissor e no coletor. Como existe uma solicitação grande e variável de potência por parte do conjunto de transistores que existem no interior do amplificador operacional, é importante que a tensão seja estabilizada através do acoplamento de capacitores nas entradas de alimentação (KAUFMAN & WILSON, 1984).

2.5.2 Polarização

Existem três formas de polarizar um amplificador: sem realimentação, com realimentação positiva e com realimentação negativa. O modo de polarização sem realimentação é conhecido como operação em malha aberta, por utilizar o ganho do operacional estipulado pelo fabricante, ou seja, não se tem o controle do mesmo. Este modo de operação é largamente empregado em circuitos comparadores (KAUFMAN & WILSON, 1984).

Com a realimentação positiva tem-se a operação em malha fechada. Nesse modelo o ganho do operacional é obtido pelo projetista. Apresenta como desvantagem uma instabilidade ao circuito. É muito aplicado em circuitos osciladores. Neste modo de operação o amplificador operacional não trabalha como amplificador de sinais, pois sua resposta não é linear. O mais importante é o modo de polarização com realimentação negativa, pois é o mais utilizado em circuitos com amplificadores operacionais. Observa-se que a saída é reaplicada à entrada inversora do amplificador operacional através de um resistor (KAUFMAN & WILSON, 1984).

Existem várias aplicações para os amplificadores operacionais com realimentação negativa. Entre elas destacam-se o amplificador inversor, amplificador somador, amplificador diferencial, diferenciador, integrador, filtros ativos, entre outros. O amplificador somador tem a finalidade de somar dois ou mais valores de entradas analógicas ou digitais em tempo real. Por exemplo, pode-se somar uma rampa, uma solenóide e um nível contínuo instantaneamente em tempo real. Largamente empregado em misturadores de sinal (KAUFMAN & WILSON, 1984).

O amplificador subtrator têm por objetivo amplificar as diferenças de tensões entre as entradas. Este circuito é extremamente poderoso e é amplamente utilizado em eletrônica analógica, inclusive em circuitos empregando os amplificadores operacionais. Por exemplo, se conectado na saída de um transdutor em um amplificador inversor, tanto o sinal do transdutor quanto a interferência serão amplificados. Por outro lado, se conectado na saída do transdutor em um amplificador de diferenças, só o sinal do transdutor é amplificado, já que o sinal de interferência é captado praticamente da mesma forma pelos dois fios que carregam o sinal de tensão comum, ao passo que o sinal do transdutor é uma diferença de tensão entre esses dois fios (LANDO, 1983).

A tensão na saída deste circuito é proporcional à diferença entre as tensões da entrada e qualquer sinal comum nas duas entradas não é amplificado, ou em outras palavras, é rejeitado (LANDO, 1983).

O amplificador comparador frequentemente precisa comparar uma tensão com outra para verificar qual delas é a maior. Um comparador é um circuito com duas tensões de entrada, uma não inversora e a outra inversora, e uma tensão de saída. Quando a tensão não inversora for maior que a tensão inversora, o comparador produzirá uma alta tensão, ao passo que quando a entrada não inversora for menor que a entrada inversora, a saída será baixa. A maioria dos circuitos comparadores são constituídos por amplificadores operacionais, na configuração de malha aberta, ou às vezes tendo sua tensão de saída limitada por um diodo Zener. Na maioria dos casos, o diodo Zener também é utilizado como tensão de referência (LANDO, 1983).

Na prática, quando se projetam circuitos comparadores, é muito comum a utilização de dois diodos em antiparalelo, colocados entre os terminais da entrada para proteger o estágio diferencial contra possíveis sobretensões ou sobrecorrentes que possam danificar o circuito integrado (LANDO, 1983).

2.6 Controles de processo

Um sistema de controle pode ser representado esquematicamente através do seguinte diagrama em blocos:

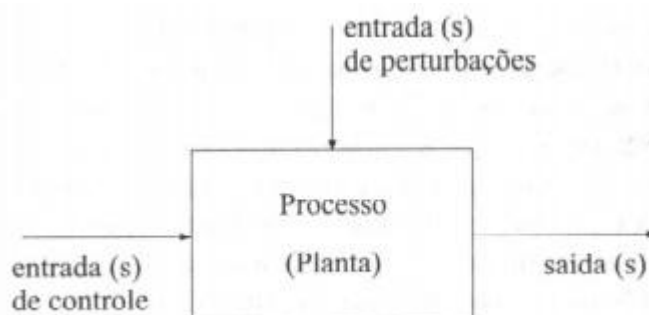


Figura 2 - Sistema de controle
Fonte: BRUCIAPAGLIA, 2010

O sistema a ser controlado é chamado de processo ou planta. O sinal aplicado no processo é chamado de sinal de controle (ou variável manipulada). O sinal de saída do processo é chamado de variável controlada (ou variável do processo). Em geral, os processos estão sujeitos à ação de outras entradas

externas que não podem ser manipuladas e que são denominadas de perturbações (BRUCIAPAGLIA, 2000).

O objetivo de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada a fim de fazer com que o sinal de saída atinja um valor pré-determinado, que é caracterizado pelo sinal de referência ou *set-point* (BRUCIAPAGLIA, 2000).

O controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle predeterminado, esperando-se que, ao final de certo tempo de estabilização, a variável controlada atinja o valor de referência. Neste tipo de sistema de controle não são utilizadas informações sobre a evolução do processo para corrigir o sinal de controle aplicado ao sistema, desta forma o controle em malha aberta é sensível a perturbações externas e, portanto, a variável controlada pode modificar o seu valor em função da entrada de perturbação (BRUCIAPAGLIA, 2000).

No controle em malha fechada, informações sobre como a saída controlada está evoluindo ao longo do tempo são utilizadas para determinar um sinal de controle que deve ser aplicado ao processo a cada instante de tempo. Isso é feito a partir da medição da variável controlada através de um sensor que irá converter a grandeza física a ser controlada em um sinal geralmente elétrico. A fim de tornar o sistema mais preciso e fazer com que ele reaja à presença de perturbações externas, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência, gerando o chamado sinal de erro. A partir do sinal de erro uma ação de correção (sinal de controle) é enviada até a entrada do processo, de maneira a fazer com que a saída controlada convirja ao valor de referência (BAZANELLA & GOMES, 2005).

As ações de controle mais comumente utilizadas são a ação proporcional e a combinação das ações proporcional e integral. Estas ações de controle são denominadas respectivamente de controlador proporcional e proporcional-integral (BAZANELLA & GOMES, 2005).

2.7 Servomotores

O servoacionamento é constituído dos seguintes componentes: um servomotor, um servoconversor e um transdutor de posição. Os servoacionamentos são utilizados nas mais diversas aplicações industriais em que elevada dinâmica e precisão são fundamentais para o aumento da qualidade e produtividade (ROCHA, 2009).



Figura 3 - Composição do servoacionamento
Fonte: ROCHA, 2009

Algumas das características dos servomotores são: habilidade para operar em baixas rotações sem sobreaquecimento, possuem torque suficiente com rotação nula para manter a posição de uma carga, atualmente utilizam ímã permanente, devido à baixa inércia do dispositivo, o ciclo de processo é mais rápido, tem uma melhor precisão, pois o servoconversor possui um controle sofisticado, usam *encoder* para a realimentação da posição (ROCHA, 2009).

Alguns exemplos de especificações técnicas: entradas analógicas, sinal -10 V à +10 V, sinal de 0 mA à +20 mA ou 4 mA a +20 mA, alta impedância, entradas digitais isoladas de 24 Vcc, frequência de saída de 0 Hz à 400 Hz (ROCHA, 2009).

Suas aplicações mais comuns são em máquinas de corte e solda, em sistemas de posicionamento, em máquinas ferramenta, em máquinas têxteis, em máquinas gráficas, em bobinadeiras, em empacotadeiras e dosadoras (ROCHA, 2009).

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo inicia apresentando algumas ideias, experimentos e aplicações para o desenvolvimento do protótipo, o qual tem como principais objetivos a realização dos testes para a prospecção dos resultados visando a comprovação de que o dispositivo automatizará o tensionamento mecânico da máquina de enrolamento de rotores. Após isso, apresenta a programação e a utilização dos aparelhos presentes no laboratório de sistemas supervisórios da UTFPR Campus Ponta Grossa, juntamente com os gráficos obtidos.

3.1 COMPONENTES DO PROTÓTIPO

Para a elaboração do protótipo, toda a teoria pesquisada serviu de base para a construção do circuito amplificador e o circuito ficou constituído dos seguintes componentes: *protoboard*, célula de carga, amplificador operacional, componentes eletrônicos, fonte de tensão simétrica, CLP Siemens S7-200 (CPU 222) + expansão analógica EM-231, *software STEP 7-Micro/WIN 32* (Siemens) de programação *Ladder*.

3.1.1 Desenvolvimento do protótipo

Para a montagem do circuito, foi utilizado um *protoboard*, que tem a finalidade de interligar componentes eletroeletrônicos, instrumentos e sinais de alimentação. A célula de carga utilizada é de uso convencional em balanças industriais e é constituída por uma base metálica em formato de S, dois fios para alimentação e outros dois para a saída do sinal. Para encontrar o par de fios para cada aplicação, já que não havia diferença entre eles, foi medida a resistência entre cada par. Assim, o par com maior valor resistivo é o da entrada da alimentação, conseqüentemente o outro par é o sinal de saída da célula. Descoberto isso, cada par foi identificado para que não fosse confundido ou trocado no momento de sua ligação no circuito. A identificação foi feita através de cores, sendo que os fios para alimentação ficaram com as cores vermelho e preto, e os fios para saída do sinal ficaram com as cores verde e branco. Essa célula suporta até 250 kg e, quanto mais força é aplicada sobre ela, maior será o sinal de saída. Sabendo disso, um amplificador de tensão é indispensável nesse protótipo, pois os valores de saída da célula de carga variam na escala de 0 a 20 mV. Para a medição analógica será

necessário amplificar esses valores para a escala 0 a 10 V, disponível na expansão analógica EM-231 do CLP Siemens S7-200.

Assim, para normalizar esse valor na escala do módulo analógico foi utilizado um amplificador de tensão modelo LM-741. Esse circuito amplificador é composto por duas resistências e um circuito integrado (figura 2). Para obter o valor do sinal de saída desejado, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\theta_0 = \theta_i \cdot \frac{R_2}{R_1}, \text{ sendo:}$$

θ_i = Sinal de entrada;

θ_0 = Sinal de saída;

R_1 = Resistor de entrada;

R_2 = Resistor do ganho;

R_2/R_1 = Constante de proporcionalidade (ganho).

Utilizando essa fórmula e inserindo os valores do sinal de entrada equivalente a 7 mV, R1 igual a 2,2 k Ω e R2 igual a 2 M Ω , obtém-se um valor de saída próximo a 7 V, ideal para alimentar a entrada analógica do CLP.

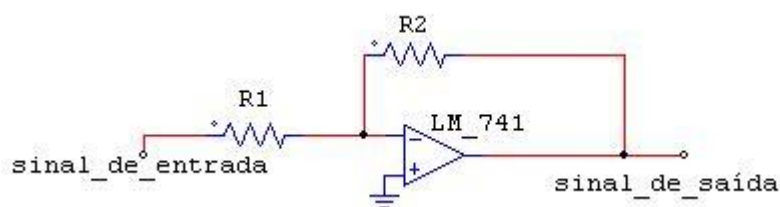
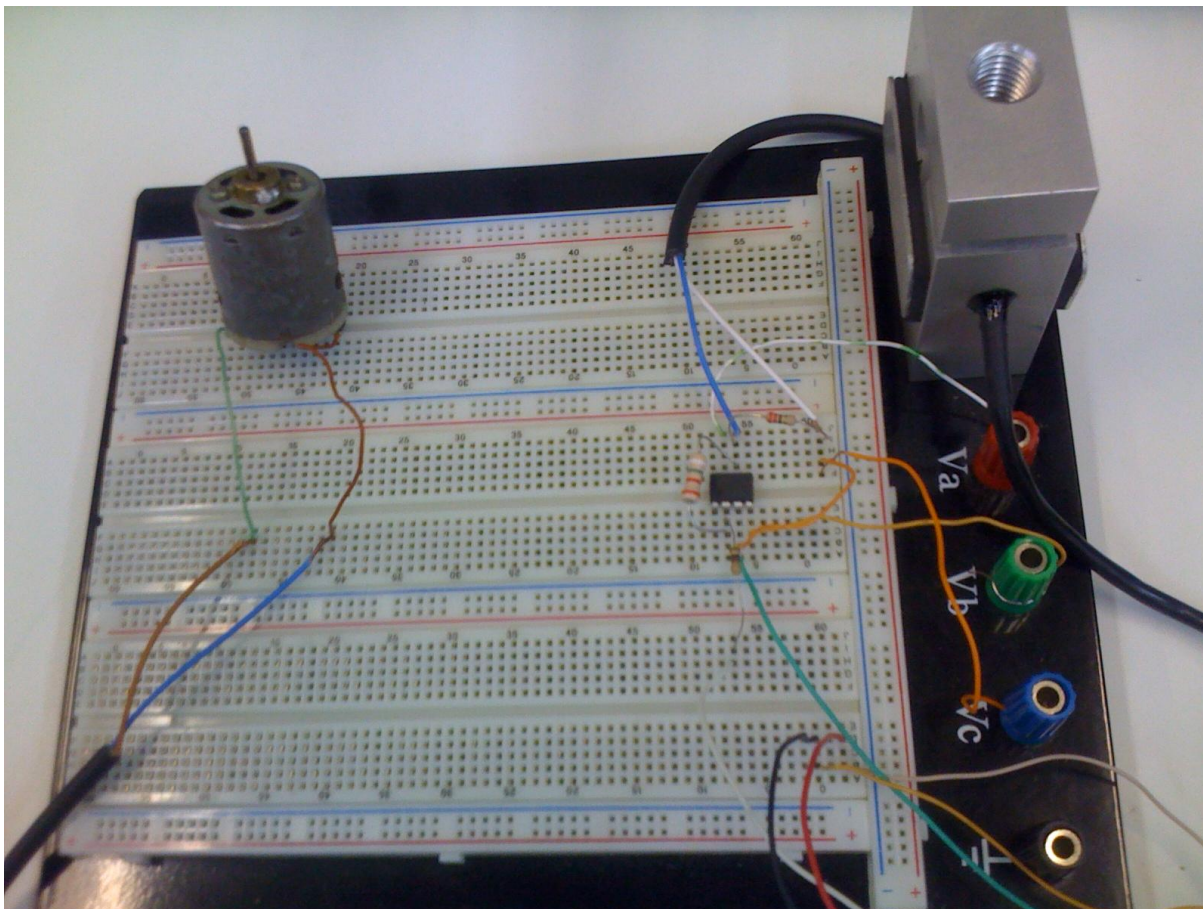


Figura 4 - Circuito amplificador de tensão
Fonte: Autoria própria

O amplificador operacional só fornece um sinal com tensão negativa em sua saída, que por sua vez não é aceita pela entrada do CLP, ou seja, o sinal não é reconhecido e nenhum dado é obtido. Para que o sinal seja compatível com a entrada analógica, foi realizada a ligação inversa de saída do circuito, ligando o aterramento do circuito na entrada positiva do CLP e a saída positiva do amplificador na entrada negativa do CLP, para que os valores fornecidos atendam a configuração de entrada.



Fotografia 1 - Protótipo
Fonte: Autoria própria

Para que o CLP fosse capaz de ler esse sinal de saída do circuito, é necessário configurá-lo para essa aplicação. No seu manual, foi encontrado que apenas seis chaves configuram as várias aplicações que ele é capaz de executar e quando a chave está para cima, significa que ela está no modo *ON*, já quando ela está para baixo, ela opera no modo *OFF*. Para a aplicação desejada de entrada de 0 a 10 V, utiliza-se a seguinte sequência das seis chaves: *OFF; ON; OFF; OFF; OFF; OFF*. Feito isso, a entrada analógica está configurada para ler de 0 a 10 V com uma resolução de 2,5 mV.

Recebido esse sinal, deve-se realizar uma programação lógica para que a saída seja compatível com os resultados esperados. Utilizando um *PC* ligado ao CLP, foi desenvolvida uma programação *Ladder* no software *STEP 7-Micro/WIN 32* (figura 3). Nessa programação foi utilizado um bloco, o qual é responsável apenas por ler o sinal de entrada. Outro bloco irá converter o sinal analógico em um número inteiro e após isso, o valor é dividido por 32000 (valor máximo que o CLP atinge. Por exemplo: 5 V = 16000, 10 V = 32000) e o resultado dessa operação é multiplicado

por 250 (valor máximo da capacidade da célula de carga). Por fim, esse valor é subtraído do valor 0 da célula, assim retirando a tara. Utilizando essa lógica, é possível visualizar o valor analógico e o peso que a célula está suportando. Com isso, podem-se programar dois comparadores, utilizando o peso ou o valor analógico: comparador maior igual, ou seja, se o valor lido for maior ou igual ao valor comparado, o sinal irá ligar um motor responsável por baixar a tensão, e o outro comparador é um menor igual, ou seja, se o valor lido for menor ou igual ao valor comparado, o sinal irá parar o motor responsável por aumentar a tensão. Caso o valor lido esteja dentro do limite desses dois comparadores, significa que a tensão está dentro da tolerância permitida, assim nenhuma ação é ativada.

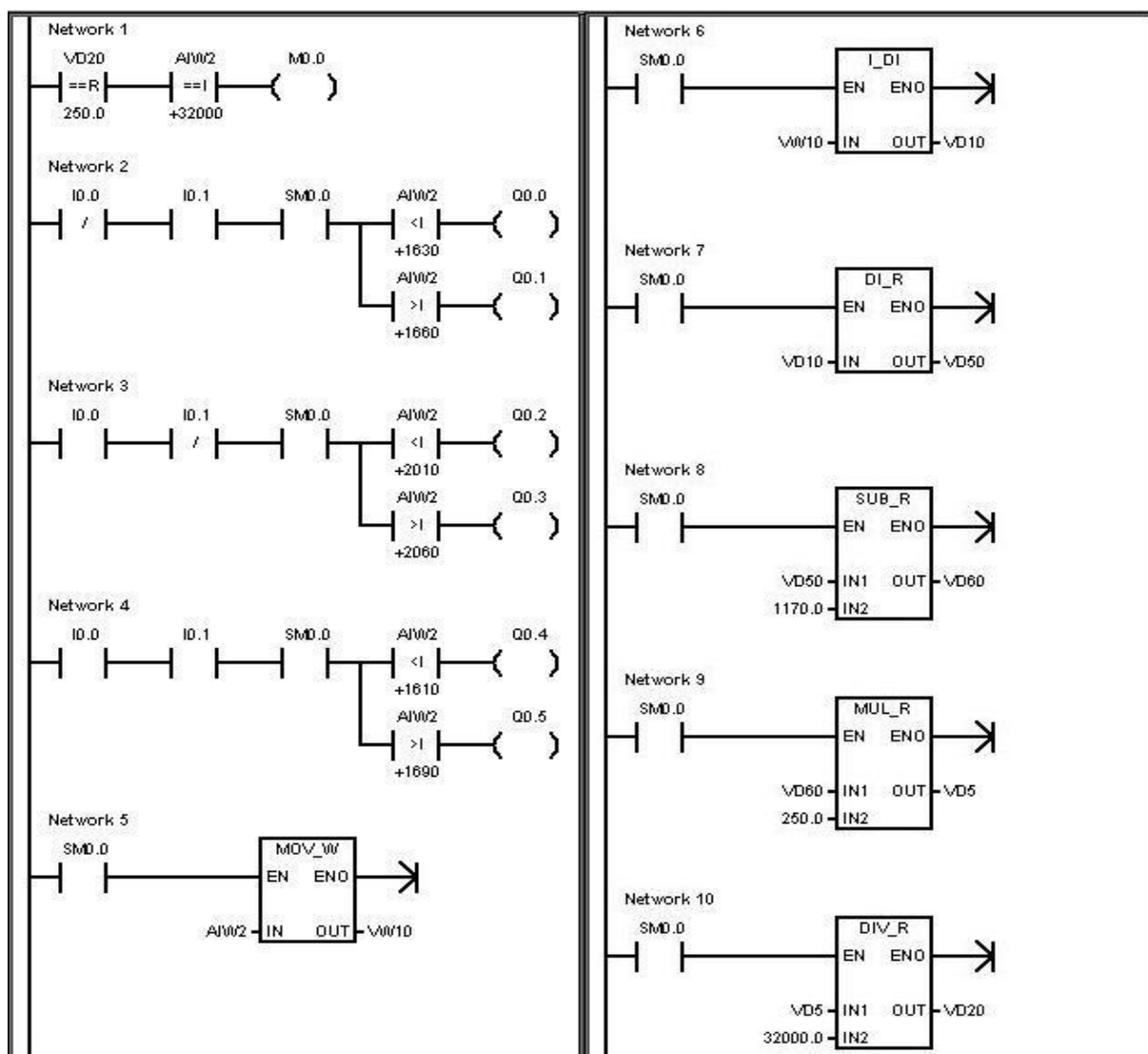


Figura 5 - Programação STEP 7-Micro/WIN 32
Fonte: Autoria própria

Após a programação, foram realizados alguns testes para a obtenção de dados. Abaixo segue tabela com os valores encontrados nesses testes feitos em laboratório e é demonstrada qual a tensão de saída do circuito de acordo com a força aplicada sobre a célula de carga. Nessa tabela também é exibido o valor analógico aproximado, o qual é usado na programação para definir limites para o controle da tensão.

Tabela 1 – Valores obtidos após aplicar força sobre a célula de carga

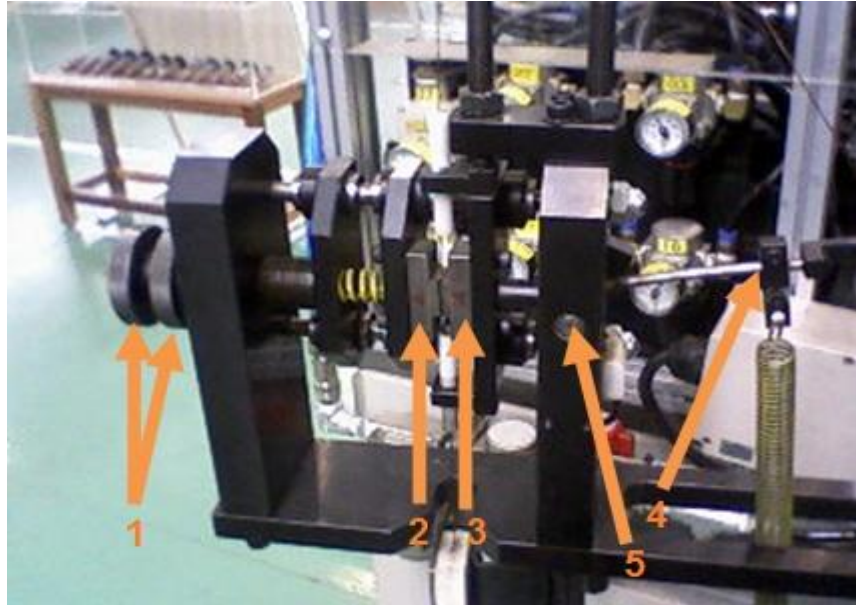
Força exercida (1kg = 1N)	Saída do sinal amplificado	Valor analógico
0 kg	1,97 V	1970
3 kg	2,27 V	2270
6 kg	2,63 V	2630
9 kg	2,96 V	2960

Fonte: Autoria própria

Foi utilizado no protótipo um motor mais compacto e sem controle de torque para melhor visualização e demonstração dos resultados. Aconselha-se que, caso implementado este projeto, seja utilizado um servomotor, o qual tem a opção de controle de posição, controle de torque e uma precisão mais eficiente.

3.2 TENSIONAMENTO MECÂNICO MANUAL

Atualmente, a tensão da máquina é definida manualmente, o fio sai de uma bobina passando por duas chapas, sendo que a da esquerda é fixa (item 2). É ela a responsável pela pressão feita no fio. Posterior a ela, há um sistema manual que permite aumentar ou diminuir a tensão da máquina somente sendo apertado ou afrouxado um parafuso. Há também uma porca (item 1) que apenas garante que o parafuso não irá soltar e molas que apenas evitam o atrito. A chapa da direita é móvel e a sua base é irregular, a qual permite que, enquanto o rotor está sendo enrolado, a roldana trabalhe livrando o fio. A figura 3 ilustra o funcionamento da base da haste (item 5). Quando o fio está preso, a roldana está para baixo, e ao enrolar o rotor esta roldana sobe (item 4), fazendo com que solte a chapa (item 3). Nessa posição a sua base é mais estreita, estando no valor desejado apenas quando a haste esta totalmente para cima.



Fotografia 2 - Máquina de tensionamento manual
Fonte: Autoria própria

- Item 1 – Parafuso e porca para ajuste manual da tensão
- Item 2 – Chapa fixa
- Item 3 – Chapa móvel
- Item 4 – Haste com molas
- Item 5 – Base da haste

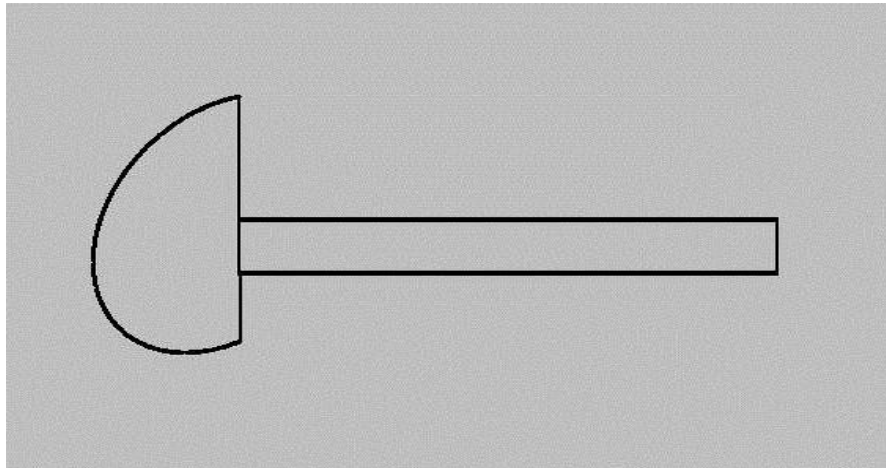


Figura 6 - Base da haste
Fonte: Autoria própria

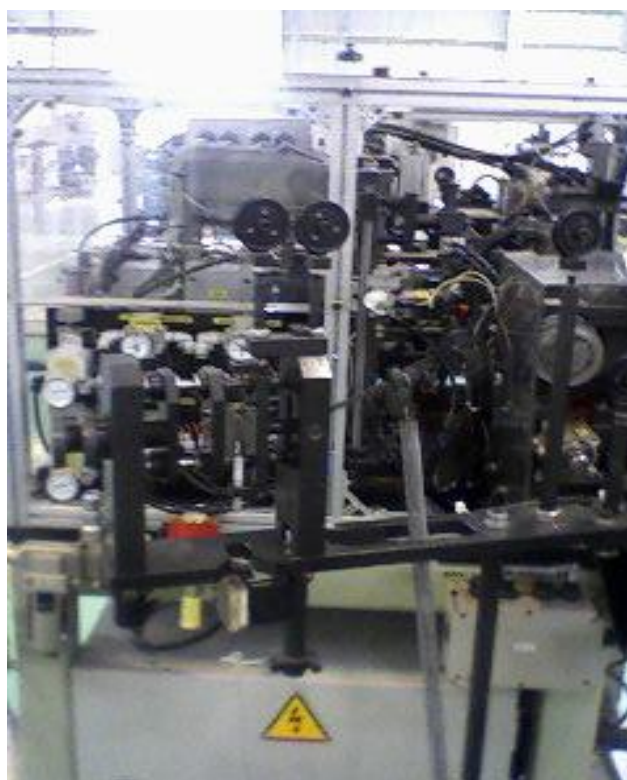
3.2.1 Implementação do protótipo

Se implementado, o sistema funcionaria da seguinte forma: a pressão aplicada sobre a chapa móvel seria aplicada sobre a célula de carga. A diferença e a grande vantagem nesse novo método seria que a célula não precisaria da haste que

movimenta a chapa, ou seja, ela poderia ser fixada e poderia medir constantemente a pressão aplicada ao fio, mantendo dentro do padrão estabelecido.

O motor substituiria o parafuso e a porca, pois a ele seria acoplado o mesmo parafuso, sendo controlado de acordo com o sinal da célula, não sendo necessária a parada linha de produção e da máquina para ajustes da tensão. Esse sistema também aumentaria muito a confiabilidade, pois a tensão aferida com o dinamômetro está sujeita a falhas operacionais e a problemas com roldanas, que podem interferir no valor medido, já com a utilização da célula de carga, seria obtido o valor correto e anteriormente a todo o sistema, com mínimas interferências externas.

O CLP faria a ligação entre motor e a célula, deixando o circuito em malha fechada, recebendo e enviando os sinais obtidos do processo e atuando de acordo com o necessário. Devido ao tempo de resposta do CLP, é necessário que a célula obtenha constantemente os valores para que se ajuste rapidamente, não prejudicando o enrolamento.



Fotografia 3 - Sistema completo de tensionamento
Fonte: Autoria própria

3.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

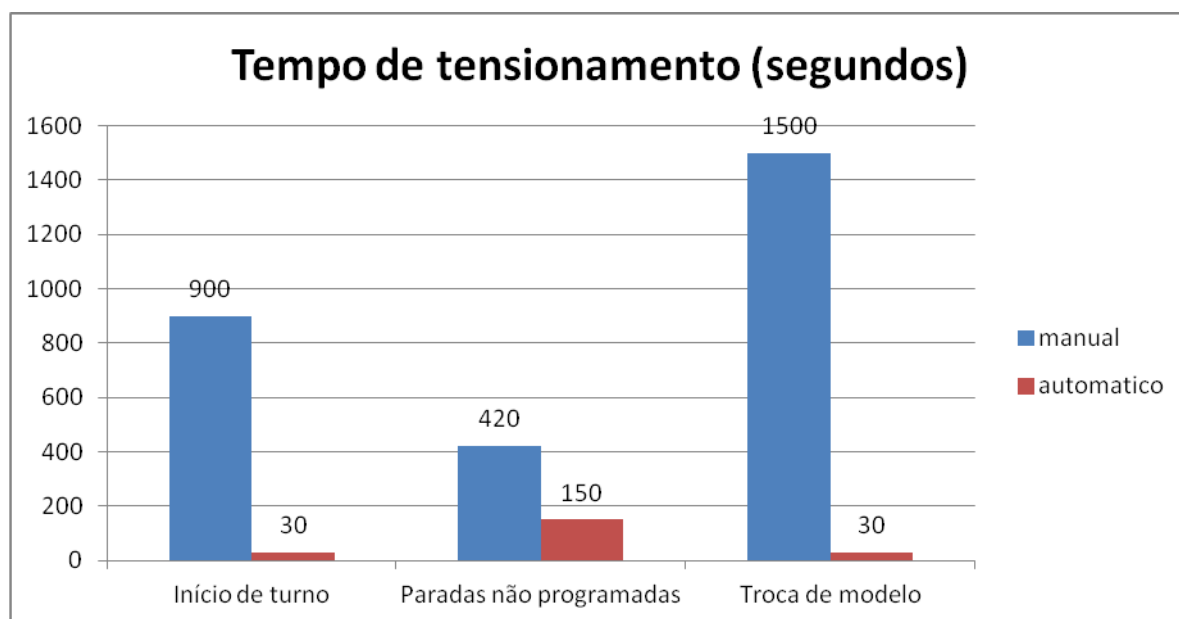


Gráfico 1 - Tempo de tensionamento
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no gráfico acima e após a coleta de dados no setor de manufatura da empresa Makita do Brasil, foi visto que o tempo de tensionamento manual no início do turno de produção é de 900 segundos ajustando o tensionamento ao valor ideal. Já no modo automático, possivelmente um tempo aproximado de 30 segundos seriam necessários até que o valor de tensão fosse ajustado. Em paradas não programadas, é comum ter que repassar o fio pela máquina, o que leva cerca de 420 segundos, baseado em dados coletados. A troca de modelo é a atividade com melhor resultado na redução de tempo, os variados modelos de rotor utilizam fios com características diferentes de acordo com tensão elétrica e aplicação. Essas características influenciam diretamente no tensionamento, sendo que no modo manual são necessários cerca de 1500 segundos para ajustes até o valor adequado ao modelo, já no modo automático possivelmente mantem-se os mesmos 30 segundos de tempo para ajuste, pois a célula de carga é capaz de ler constantemente os valores de tensão e se adequar rapidamente aos valores do modelo. Em média, será possível obter uma redução de aproximadamente 97% de tempo perdido, caso o tensionamento automático seja implementado.

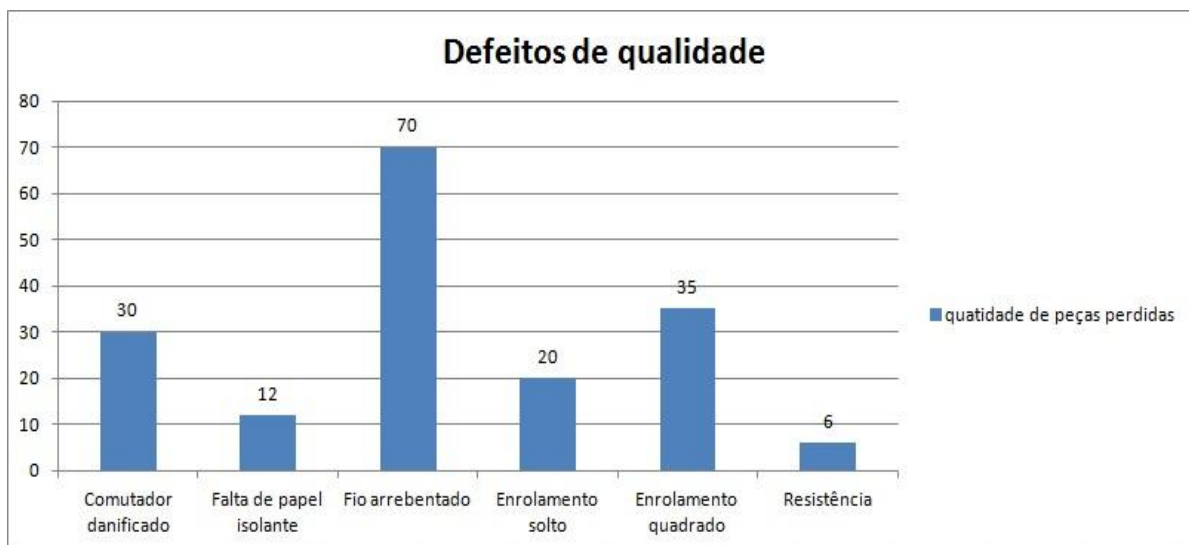


Gráfico 2 - Defeitos de qualidade
Fonte: Autoria própria

É possível observar a quantidade de peças perdidas no gráfico acima a partir de dados coletados na linha 131 da empresa Makita do Brasil, sendo que os valores são: 30 peças por comutador danificado, 12 peças por falta de papel isolante, 70 peças por fio arrebitado, 20 peças por fio solto, 35 peças por enrolamento quadrado e 6 peças por defeito de resistência, (valores coletados em um período de 30 dias e em um determinado modelo, podendo sofrer eventuais alterações).

Analisando os defeitos em dois grupos distintos, sendo problemas provenientes de tensionamento e demais problemas (gráfico 3), é possível observar que 73% dos defeitos são gerados a partir do tensionamento. Melhorando a eficiência do tensionamento, os defeitos de qualidade podem ser reduzidos para 48 peças num período de 30 dias, sendo que os defeitos de comutador podem ser evitados na primeira checagem. O total de peças que podem apresentar defeitos de qualidade poderá ser reduzido para 18 peças num mesmo período de tempo.



Gráfico 3 - Peças perdidas devido ao tensionamento e aos demais problemas
Fonte: Autoria própria

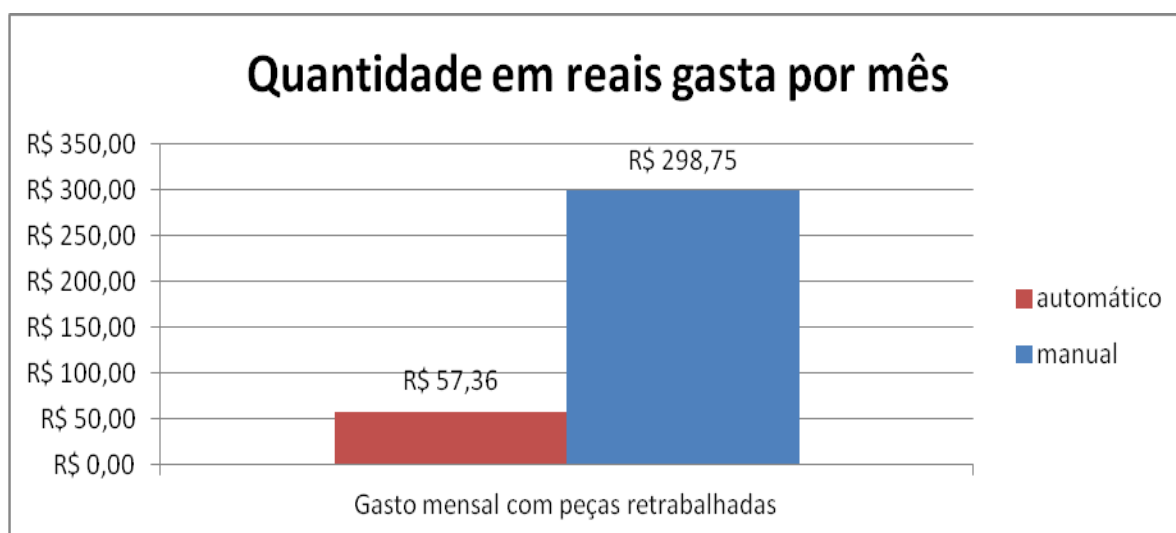


Gráfico 4 - Gasto mensal com peças retrabalhadas
Fonte: Autoria própria

Com base nas análises já mostradas anteriormente, os dados acima são referentes aos retrabalhados de aproximadamente 125 rotores em um período de 30 dias por problemas de enrolamento, gerando um gasto de aproximadamente R\$300,00/mês. Com a possível implementação do tensionamento automático, estima-se que a média diminua para 25 rotores retrabalhados, com um gasto aproximado de R\$60,00/mês, ou seja, um valor de R\$150,00/mês que a empresa pode economizar e/ou não perderá com peças segregadas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desse protótipo visa a implementação em uma máquina manual de enrolamento de rotor, com o objetivo de automatizar o seu tensionamento. Esse tipo de processo automatizado já existe em algumas empresas desse ramo, porém com um custo elevado e uma implementação complexa, não sendo o ideal para quem busca uma melhoria instantânea. A viabilidade desse projeto se dá por ser de baixo custo, pouca manutenção, fácil implementação, compatível com os equipamentos existentes e de ótimo custo-benefício.

Com a utilização da máquina de tensionamento manual, todos os problemas envolvendo o tensionamento ocupam muito tempo do operador para a solução dos mesmos, fazendo com que outras atividades de sua responsabilidade não sejam realizadas. O fluxo de produção é prejudicado quando a atenção é voltada apenas para uma máquina, decaindo a produtividade e eficiência das demais. Essa perda conseqüentemente gera mais retrabalhos e gastos para a empresa. Além disso, fatores como a manutenção constante das máquinas, atrasos de produção e ineficiência do processo gera um produto com qualidade duvidosa.

A proposta de tensionamento constante aumenta a qualidade do enrolamento do rotor, melhorando a eficiência dos motores e ferramentas elétricas que tem os rotores como uma de suas partes principais para funcionamento. Esse funcionamento ideal previne vibrações e problemas elétricos no produto, aumentando sua vida útil e sua confiabilidade.

Utilizando o tensionamento automático temos as seguintes melhorias: melhor qualidade do rotor, linha de produção mais eficiente, maior produtividade, otimização da mão de obra, redução no tempo de parada não programada,

Outro estudo a ser realizado é a possibilidade de comunicação entre o CLP e a IHM, podendo ser exibido constantemente na tela o resultado de tensão medido e ainda controlá-lo, caso haja necessidade de algum ajuste rápido. Depois de inserido os valores de tensão necessários para cada modelo, sempre que a troca for feita na IHM a tensão se ajustará de acordo com o modelo presente na máquina.

Este estudo pode servir como base para outros projetos da mesma natureza e para estudos de outras empresas do mesmo ramo que estão à procura de melhorias em seus processos.

REFERÊNCIAS

ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 270p.

ANTONELLI, Pedro Luis; **Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)**. Disponível em: <http://www.catalao.ufg.br/mat/docentes/stoppa/ap_CLP_2.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2013.

ANTUNES, Izildo; FREIRE, Marcos A. C.. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Érica, 1998. 296p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **Coletânea de Normas – Motores Elétricos**. Rio de Janeiro, 1988.

BAZANELLA, A.; GOMES, J. M. da Silva Junior. **Sistemas de controle: princípios e métodos de projetos**. Editora UFRGS. Porto Alegre, 2005.

BRUCIAPAGLIA, A.. **Apostila da disciplina Processos em Engenharia**. Departamento de Automação e Sistemas. UFSC, 2000.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro, RJ: Prentice Hall do Brasil: LTC, 1994. 550p.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicação e análises**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2002. 276p.

FITZGERALD, Artur Eugene; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas**. São Paulo: McGraw – Hill, 1975. 623p.

FRANCHI, Claiton Moro. **Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos**. São Paulo, SP: Érica, 2008. 352p.

KAUFMAN, Milton; WILSON, J. A. Sam. **Eletrônica básica**. São Paulo, SP: McGraw - Hill, 1984. 542p.

LANDO, Roberto Antonio; ALVES, Serg Rios. **Amplificador operacional**. São Paulo: Érica, 1983. 269p.

NILSSON, James William; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1999. 656p.

PRUDENTE, Francesco. **Automação industrial: PLC: teoria e aplicações: curso básico**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 262p.

ROCHA, Joaquim Eloir; **Servoacionamento**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/arquivos/Acionamento_06_Servomotores.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2013.

SALMERON, Roberto A. **Introdução à eletricidade e ao magnetismo**: para alunos da 3ª série colegial, e candidatos às escolas superiores. 4. ed. São Paulo: Biblioteca Nacional, 1966. 443p.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. B. de (Autor). **Sensores industriais**: fundamentos e aplicações. 5. ed. São Paulo: Érica, 2008. 222p.

WENDLING, Marcelo; **Amplificadores Operacionais**. Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2013.