



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



EGÍDIO PEDRO BIELUCZYK

**MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO
DE UMA MÁQUINA DE ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO**

Canoas, novembro de 2011



EGÍDIO PEDRO BIELUCZYK

MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica.

Área de Concentração

Instrumentação Eletroeletrônica.

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. ANDRÉ LUÍS BIANCHI – CREA-RS89197

Canoas

2011



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: EGIDIO PEDRO BIELUCZYK

Matrícula: 982103034-3

Título: MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. ANDRÉ LUÍS BIANCHI

CREA-RS89197

Banca Avaliadora:

MSc. Eng. Eletr. MARCIO GIL FACCIN

CREA- RS122301

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. NOLVI FRANCISCO BAGGIO FILHO

CREA- 139435

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor
EGIDIO PEDRO BIELUCZYK

Orientador
ANDRÉ LUÍS BIANCHI

Avaliador
MARCIO GIL FACCIN

Avaliador
NOLVI FRANCISCO BAGGIO
FILHO

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Dedico a minha esposa Diana por tudo que ela
é para mim e todo apoio que tem
me dado.



AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor André Luís Bianchi pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas pelas sugestões e observações valiosas.

Ao Professor Jose Carlos Krause Verney pelas valiosas contribuições.

A Professora Miriam Noemi Cáceres Villamayor pela dedicação, paciência e colaboração.

A todos os professores que tive o privilegio de ser aluno, não somente pelo ensino acadêmico, mas por proporcionarem outra visão de mundo durante a construção dos pilares da minha vida.



EPÍGRAFE

Cada um com suas virtudes...

Só Deus com a verdade.



RESUMO

BIELUCZYK, Egídio Pedro. **Modernização do Sistema de Controle e Supervisão de uma Máquina de Ensaio Mecânico de Tração**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2011.

Na engenharia, seja para o projeto ou manufatura de pequenos ou grandes componentes, é fundamental o conhecimento das propriedades mecânicas do material e seu comportamento em várias condições de uso. Para que o projetista possa prever o comportamento do material em condições de trabalho é imprescindível saber os parâmetros de comportamento, determinados através de ensaios mecânicos. Estes ensaios determinam, entre outras, as características do material quanto à tensão ou compressão mecânica. E neste trabalho é apresentada a implementação de um sistema de controle e aquisição de dados para uma máquina de ensaios mecânicos de tração denominada Vesat 502. Além disso, se fez a modernização do sistema de controle e supervisão, existente na máquina de ensaios mecânicos. Para isto, se desenvolveu um sistema microprocessado proporcionando uma interface mais prática no controle do processo de medição de tensão mecânica tendo a possibilidade de realização de ensaios diferentes dos possíveis atualmente na máquina. Os resultados deste novo sistema foram satisfatórios em relação à medição.

Palavras chave: Instrumentação. Célula de Carga. Ensaio Mecânico. Sistema de Controle.



ABSTRACT

Bieluczyk, Egidio Pedro. **Modernization of System Control and Supervision on Traction Machine to Mechanic Test.** Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2011.

It is important, in engineering, to know about mechanical properties of the material and the behavior in various applications, to project small or big components. The projects need to know the main parameters to predict the behavior of the material in work condition, so mechanical tests are essential.

These tests permit to know the material characteristics on the mechanical traction or compression. This work presents the implementation of a control system and datalog for a traction test machine, called Vesat 502.

Also, is proposed a modernization of the control and supervision system in a mechanical test machine. Then, was developed a microprocessed system to permit a practical interface on the measurement control process about mechanic traction to permit new and different tests using the present mechanical machine.

The results of this new system were satisfactory regarding the measurement.

Keywords: Instrumentation. Load cell. Mechanical Testing. Control System.



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Curva Tensão-Deformação Convencional.	20
Figura 2.2 - Tipos de Fraturas Observadas em Metais Submetidos à Tensão Uniaxial.	24
Figura 2.3 - Exemplos de Comportamento Mecânico de Polímeros em Condições de Tração Uniaxial.	25
Figura 2.4 - Máquina de Ensaio Mecânicos Universal.	26
Figura 2.5 - Célula de Carga Tipo I.	27
Figura 2.6 - <i>Strain Gauge</i>	28
Figura 2.7 - Ponte Wheatstone.	30
Figura 2.8 - Representação Vetorial do Movimento.	32
Figura 2.9 - Motor com Ímã Permanente.	36
Figura 3.1 - Diagrama de Blocos Simplificado do Sistema.	45
Figura 3.2 - Estrutura da Máquina, Motor e Sensores.	46
Figura 3.3 - Sinais de interface do <i>Encoder</i> de quadratura.	47
Figura 3.4 - Circuito Elétrico Para Condicionamento do Sinal do Gerador.	48
Figura 3.5 - Células de Carga Tipo I e Tipo S.	48
Figura 3.6 - Representação do Circuito e Condicionamento do Sinal Proveniente da Célula de Carga.	49
Figura 3.7 - Circuito em Ponte H Transistorizado.	50
Figura 3.8 - Placa do Circuito de Controle.	51
Figura 3.9 - Fluxograma do <i>Software</i>	52
Figura 3.10 - Tela do Aplicativo Elipse SCADA.	53
Figura 3.11 - <i>Driver</i> RS232.dll Implantado no Elipse SCADA.	54
Figura 3.12 - Configuração dos Parâmetros no Elipse SCADA.	54
Figura 3.13 - Tela de Configuração dos Parâmetros Extras.	55
Figura 3.14 - <i>Tags</i> Criados para o Aplicativo.	56
Figura 4.1 - Curva Obtida no Teste de Funcionamento.	59
Figura 4.2 - Corpo de Prova Utilizado.	59
Figura 4.3 - Curva característica de um Polímero.	60
Figura 4.4 - Curva obtida no Ensaio de Tração.	60



LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características da Célula de Carga.....	27
Tabela 2.2 – Níveis de Confiança.....	44
Tabela 4.1 – Representação das Medidas de Força	58
Tabela 4.2 - Representação das Medidas de Deslocamento.....	58



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	13
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Ensaios Mecânicos	15
2.1.1. Propriedades Mecânicas	15
2.1.2. Finalidade dos Ensaios dos Materiais	16
2.1.3. Vantagens da Normalização dos Materiais e Métodos de Ensaios	16
2.1.4. Classificação dos Ensaios dos Materiais	16
2.1.5. Ensaios Mecânicos de Tração	18
2.2. Descrição Sobre os Ensaios de Tração	18
2.2.1. Propriedades Mecânicas em Tração	20
2.2.2. A Região de Comportamento Elástico (OA) – Regime Elástico	21
2.2.3. Módulo de Elasticidade, ou Módulo de <i>Young</i> (E)	22
2.2.4. A Região de Escoamento (AB)	22
2.2.5. A Região de Comportamento Plástico (BF): Regime Plástico	22
2.2.6. Deformação Plástica e Fratura	24
2.3. Estrutura de uma Máquina de Ensaios Mecânicos	26
2.4. Descrição da Estrutura Utilizada	26
2.4.1. Célula de Carga	27
2.4.2. Motor CC	31
2.4.3. Controle de Velocidade	33
2.4.4. Controle de Conjugado do Motor CC	35
2.4.5. Potência Desenvolvida Pela Armadura	35
2.4.6. Tipos de Motores CC	36
2.5. Dispositivos de Realimentação para Controle de um Motor	36
2.5.1. Tacômetros Analógicos	37
2.5.2. <i>Encoders</i>	37
2.5.3. <i>Resolvers</i>	38
2.6. Protocolos de Comunicação	39
2.7. Aplicativos de Supervisão	39
2.7.1. Supervisão de Controle e Aquisição de Dados - SCADA	40
2.7.2. Características de <i>Hardware</i> e <i>Software</i> dos Sistemas SCADA	41
2.7.3. Aplicativos para Sistemas SCADA	42
2.7.4. Elaboração de Aplicativos para Sistemas SCADA	42
2.8. Microcontroladores PIC	43
2.9. Determinação das Incertezas	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1. Descrição Geral do Sistema	45



3.2.	Descrição da Máquina - Estrutura.....	46
3.3.	Descrição dos Sistemas Eletroeletrônicos e Computacionais.....	47
3.3.1.	<i>Encoder</i> de Quadratura	47
3.3.2.	Taco Gerador.....	47
3.3.3.	Medição de Tensão Mecânica.....	48
3.3.4.	<i>Driver</i> – Controle do Motor CC.....	50
3.3.5.	O Microcontrolador	51
3.4.	Descrição do Aplicativo Supervisório.....	53
3.4.1.	Sobre o Elipse SCADA.....	53
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
4.1.	Metodologia dos Testes Integrados no Sistema Físico	57
4.1.1.	Testes de Funcionamento	59
4.2.	Resultados.....	59
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6.	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DO CIRCUITO CPU.....	65
	APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE	66



1. INTRODUÇÃO

Todo projeto de um componente mecânico requer, para sua viabilização, conhecimentos das características, propriedades e comportamentos dos materiais utilizados.

Para que o projetista possa prever o comportamento do material em condições de trabalho é imprescindível que tenha em mãos os parâmetros de comportamento, determinados através de ensaios mecânicos.

Embora os valores de propriedades de muitos materiais comumente usados na engenharia possam ser obtidos em tabelas, é importante que os engenheiros tenham conhecimento da metodologia da execução dos ensaios e do significado de cada parâmetro. Portanto é importante conhecer os fundamentos básicos relativos a cada ensaio. Inclusive para validar dados de catálogos.

Os critérios de escolha de materiais impõem a realização dos ensaios mecânicos com métodos normalizados que objetivam levantar as propriedades mecânicas e seu comportamento sob determinadas condições e esforços. Essa normatização é fundamental para que se estabeleça uma linguagem comum entre fornecedores e usuários dos materiais.

Neste trabalho é apresentado o processo de modernização de uma máquina Versat 502 de ensaios mecânicos de tração. A modernização se deu através do desenvolvimento de novos sistemas de supervisão, controle e aquisição de dados, possibilitando uma melhor interface com usuário.

1.1. *Justificativa*

O projeto justifica-se devido à necessidade da máquina para ensaios mecânicos pelos cursos de engenharias.

Com o aproveitamento da estrutura existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da ULBRA Canoas, da máquina Versat 502, poderá se executar ensaios mecânicos de tração seja para fins didáticos ou comparativos. O novo sistema



implantado de acionamento e controle dos *drives* irá ser de propriedade da ULBRA. A documentação ficará na faculdade para eventuais mudanças ou até mesmo reparos que passam a ser próprios diminuindo custos da manutenção da máquina realizados por terceiros.

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo central é modernizar o sistema de controle e supervisão existente na máquina de ensaios mecânicos Vesat 502, com controles microprocessados proporcionando uma melhor interface no controle do processo de medição, tendo a possibilidade de realização de ensaios diferentes dos possíveis atualmente na máquina.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto são:

- Projeto e implementação de um novo circuito de potência para o acionamento do motor DC do eixo da máquina;
- Desenvolvimento do controle de velocidade e posição do eixo da máquina via microprocessador;
- Desenvolvimento de um aplicativo de controle e supervisão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre ensaios mecânicos em materiais. Uma descrição geral sobre os vários tipos de ensaios mecânicos, e especificamente informações sobre os ensaios de tração, descrição da estrutura de uma máquina eletromecânica de ensaios mecânicos de tração, protocolos de comunicação e aplicativos de supervisão SCADA.

2.1. *Ensaio Mecânicos*

Os ensaios mecânicos dos materiais são procedimentos padronizados que compreendem testes, cálculos, gráficos e consultas a tabelas, tudo isso em conformidade com normas técnicas. Realizar um ensaio consiste em submeter um objeto já fabricado ou um material que vai ser processado industrialmente a situações que simulam os esforços que eles vão sofrer nas condições reais de uso, chegando a limites extremos de solicitação. (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

2.1.1. **Propriedades Mecânicas**

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e ou deformações. Tensões representam resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um material. Entre as principais propriedades mecânicas dos materiais obtidas por ensaios pode-se citar: (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

- **Resistência:** Representada por tensões, definidas em condições particulares;
- **Elasticidade:** Propriedade do material segundo o qual a deformação que ocorre em função da aplicação de tensão, e retorno as características originais, após a retirada desta tensão;
- **Plasticidade:** Capacidade de sofrer deformação permanente sem rompimento;



- **Resiliência:** Capacidade de absorção da deformação no regime elástico;
- **Tenacidade:** Reflete a energia total necessária para provocar fratura do material.

2.1.2. Finalidade dos Ensaios dos Materiais

As duas finalidades mais importantes da execução dos ensaios são: (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

- Permitir a obtenção de informações do produto — ensaios de controle: no recebimento de materiais de fornecedores e no controle final do produto acabado;
- Desenvolver novas informações sobre os materiais — no desenvolvimento de novos materiais, de novos processos de fabricação e de novos tratamentos.

2.1.3. Vantagens da Normalização dos Materiais e Métodos de Ensaios

A normalização tem por objetivo fixar os conceitos e procedimentos gerais que se aplicam aos diferentes métodos de ensaios. Suas principais vantagens são: (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

- Tornar a qualidade do produto mais uniforme;
- Reduzir os tipos similares de materiais;
- Orientar o projetista na escolha do material adequado;
- Permitir a comparação de resultados obtidos em diferentes laboratórios;
- Reduzir desentendimentos entre produtor e consumidor.

2.1.4. Classificação dos Ensaios dos Materiais

Em relação à classificação dos ensaios, estes podem ser: (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

1. Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente:

- i. Destrutivos: provocam inutilização parcial ou total da peça; ex.: tração, dureza, fadiga, fluência.
 - ii. Não-destrutivos: não comprometem a integridade da peça; ex.: raios X, raios γ , ultra-som, partículas magnéticas.
2. Quanto à velocidade de aplicação da carga:
- i. Estático: carga aplicada de maneira suficientemente lenta, introduzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio (processo quase-estático); ex.: tração, compressão, flexão, dureza e torção.
 - ii. Dinâmicos: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente; ex.: fadiga e impacto,
 - iii. Carga constante: carga aplicada durante um longo período ex.: fluência.

Métodos de Ensaio:

Os métodos determinam que os ensaios devam ser realizados em função da geometria da peça, do processo de fabricação e de acordo com as normas técnicas vigentes, podendo ser: (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

- Ensaio da própria peça.
- Ensaio de modelos.
- Ensaio em amostras.
- Ensaio em corpos-de-prova retirados de parte da estrutura.

O controle de produção também pode ser realizado através de ensaios mecânicos e o aperfeiçoamento de um material pode ser estudado pelas suas propriedades mecânicas. Analogamente, o projeto de uma peça e a seleção do seu material é feito tomando-se por base as propriedades mecânicas do material a ser usado (SOUZA, 1982).

Os ensaios mecânicos podem também servir para a comparação de materiais distintos e, juntamente com a análise química do material, avaliar a história prévia de um material desconhecido, sem a necessidade de um exame metalográfico mais demorado, isto é, avaliar o tipo de material, o processo de fabricação e sua aplicação possível (SOUZA, 1982).



Quando se trata da realização de ensaios mecânicos, deve-se atender a um padrão, ou seja, uma mesma técnica. O que mais se utiliza são as normas referentes à especificação de materiais e ao método de ensaio.

As normas técnicas mais utilizadas pelos laboratórios de ensaios pertencem às seguintes associações (SOUZA, 1982).

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ASTM Associação Americana para Testes e Materiais;
- DIN Instituto Alemão de Normatização;
- AFNOR Associação Francesa de Normalização;
- BSI Instituto Britânico de Padrões;
- ASME Associação Americana de Engenheiros Mecânicos;
- ISO Organização Internacional de Padrões;
- JIS Normalização Industrial Japonesa;
- SAE Associação dos Engenheiros Automotivos;
- COPANT Comissão Panamericana de Normas Técnicas.

2.1.5. Ensaios Mecânicos de Tração

Consiste na aplicação de uma carga de tração crescente, em uma única direção, em um dado corpo de prova, previamente preparado e normatizado, até a ruptura do mesmo. Neste ensaio deseja-se medir a variação no comprimento em função da carga aplicada. Entre as principais características resultantes do ensaio destacam-se: Limite de Resistência à Tração (σ_u), Limite de Escoamento (σ_e), Módulo de Elasticidade (E), Módulo de Resiliência (U_r), Módulo de Tenacidade (U_t), Ductilidade, Coeficiente de Encruamento (n) e Coeficiente de Resistência (k) (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

2.2. Descrição Sobre os Ensaios de Tração

As facilidades de execução e de reprodução dos resultados tornam o ensaio de tração o mais importante de todos os ensaios para determinar a propriedades mecânicas dos materiais.

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um



material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de forma e dimensão padronizada, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado até a sua ruptura (SOUZA, 1982).

Com esse tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo. A uniformidade de deformações termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou diminuição da seção do corpo de prova, nos casos de metais com certa ductilidade. A ruptura sempre se dá em uma região estrita do material, a menos que um defeito interno no material, fora dessa região, promova a ruptura do mesmo, o que raramente acontece (SOUZA, 1982).

A precisão de um ensaio de tração depende, evidentemente, da incerteza dos aparelhos de medida de que se dispõe. Com pequenas deformações, pode-se conseguir uma precisão maior na tensão do que quando são atingidas grandes deformações do material, onde a leitura dos valores numéricos fica mais difícil, devido à grande variação da deformação em função da tensão aplicada (SOUZA, 1982).

A velocidade do ensaio é geralmente dada pelos métodos estabelecidos pelas diferentes Associações de Normas Técnicas; quando, porém, se realiza um ensaio de tração para fins de estudo ou pesquisa, essa velocidade pode ser alterada, conforme o caso. Essa velocidade é muito importante e dela dependem alguns resultados numéricos de propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio. Em geral, os métodos de ensaio especificam a velocidade de tensionamento constante na zona elástica em torno de 1 kgf/mm^2 por segundo (SOUZA, 1982).

Entre os diversos tipos de ensaios disponíveis para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o ensaio de tração, é relativamente simples e de realização rápida. Nele se utilizam corpos-de-prova preparados segundo as normas técnicas convencionais. No Brasil, a norma técnica utilizada para materiais metálicos é a NBR ISO 6892 de 2002, em substituição a NBR 6152 de 1992 da Associação Brasileira de Normas Técnicas — ABNT. O levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo constitui o resultado do teste de tração.

A Figura 2.1, mostra o esboço da curva típica obtida no ensaio de um corpo-de-prova.

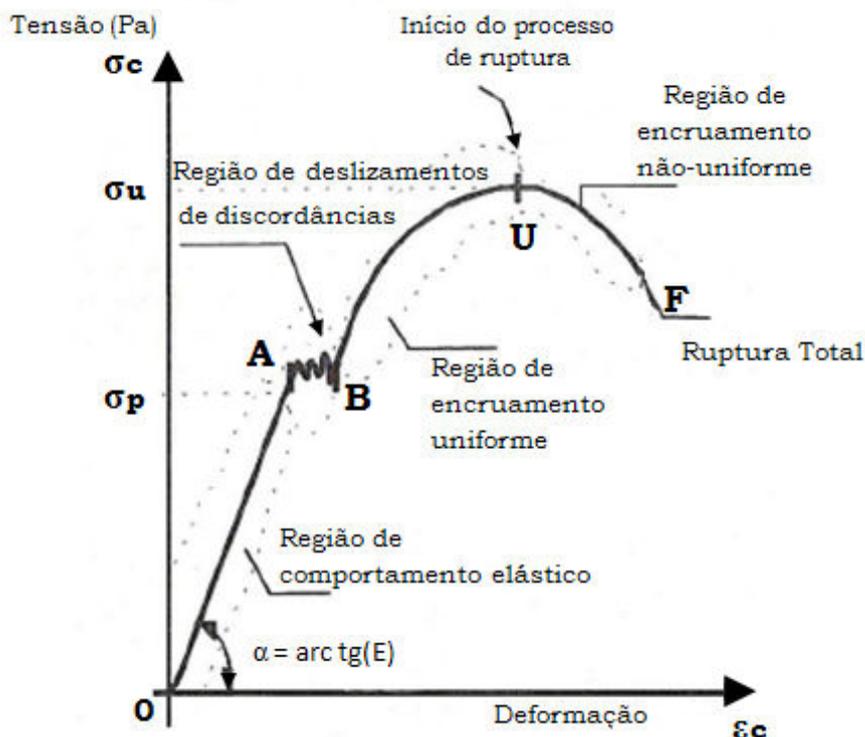


Figura 2.1 - Curva Tensão-Deformação Convencional.
Fonte GARCIA, 2008.

As informações contidas no gráfico da Figura 2.1 serão explicadas a seguir:

2.2.1. Propriedades Mecânicas em Tração

Ensaio Convencional

Para a definição da tensão e deformação convencionais, considera-se uma barra cilíndrica e uniforme que é submetida a uma carga de tração uniaxial crescente. A tensão convencional, nominal ou de engenharia (σ_c), é dada por:

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} \quad (2.1)$$

Onde:

σ_c = Tensão (Pa);

P = Carga Aplicada (N);

S₀ = Seção Transversal Original (m²).

A deformação convencional ou nominal (ϵ_c) é dada por:

$$\epsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Para:

ϵ_c = Deformação (Adimensional);

l_0 = Comprimento inicial de referência (carga zero) (m);

l = Comprimento de referência para cada carga P aplicada (m).

Na curva da Figura 2.1 observam-se quatro regiões de comportamentos distintos: **OA** — região de comportamento elástico; **AB** — região de escoamento de discordâncias; **BU** — região de encruamento uniforme; **UF** — região de encruamento não-uniforme (o processo de ruptura tem início em **U**, e é concluído no ponto **F**).

Para um material de alta capacidade de deformação permanente, o diâmetro do corpo-de-prova começa a decrescer rapidamente ao se ultrapassar a carga máxima (ponto U); assim, a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura total.

Observa-se, na prática, uma grande variação nas características das curvas tensão-deformação para diferentes tipos de materiais (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

2.2.2. A Região de Comportamento Elástico (OA) – Regime Elástico.

Quando uma amostra de um material solicitado por uma força sofre uma deformação e , após a retirada da força aplicada, recupera suas dimensões originais, esta deformação é definida como deformação elástica. Esse comportamento é descrito matematicamente pela equação da elasticidade de uma mola, dada por:

$$P = k \cdot x \quad (2.3)$$

Onde:

k = Constante de proporcionalidade ou constante da mola (adimensional);

x = Deslocamento (m).

De modo semelhante, a deformação elástica de um corpo-de-prova é dada pela *lei de Hooke*:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.4)$$

Que descreve uma relação linear entre tensão e deformação, em que E é o módulo de elasticidade, ou módulo de *Young*.

As principais tensões definidas na região são:

σ_a — limite de elasticidade: máxima tensão que o material pode suportar sem apresentar deformação permanente após a retirada da carga (descarregado); e σ_p — limite de proporcionalidade: máxima tensão acima da qual o material não mais obedecer à lei de *Hooke*, isto é, perde-se a linearidade entre a relação tensão-deformação (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

2.2.3. Módulo de Elasticidade, ou Módulo de Young (E)

O módulo de elasticidade fornece uma indicação da rigidez do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas, o que explica seu comportamento inversamente proporcional à temperatura. É determinado pelo quociente da tensão convencional pela deformação convencional ou alongamento específico na região linear do diagrama tensão-deformação e é dado por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P \cdot l_0}{S_0 \cdot \Delta l} \quad (2.5)$$

Onde: E = Módulo de elasticidade (Pa).

2.2.4. A Região de Escoamento (AB)

O escoamento é entendido como um fenômeno localizado, que se caracteriza por um aumento relativamente grande na deformação, acompanhado por uma pequena variação na tensão. Pode ser nítido, como apresentado na curva tensão-deformação da Figura 2.1, ou imperceptível.

A principal tensão definida na região de escoamento é σ_e , limite de escoamento, que é a máxima tensão atingida na região de escoamento.

Para os casos de escoamento imperceptível, convencionou-se adotar uma deformação-padrão que corresponda ao limite de escoamento, conhecido como limite n de escoamento (σ_{e_n}). Por exemplo, o procedimento para se determinar o limite de escoamento para o caso de $n = 0,2\%$ (*ASTM Standard E8-69*).

2.2.5. A Região de Comportamento Plástico (BF): Regime Plástico

A partir do ponto (B) da curva da Figura 2.1, o material entra na região plástica, que é caracterizada pela presença de deformações permanentes no corpo-de-prova. Para materiais de alta capacidade de deformação, o diagrama tensão-deformação apresenta variações relativamente pequenas na tensão, acompanhadas



de grandes variações na deformação. Nessa região, pode-se determinar uma série de características do material ensaiado, como:

σ_u — **Limite de resistência à tração:** tensão correspondente ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio, igual à carga máxima dividida pela área inicial do corpo-de-prova.

Após o ponto (U), tem início a fase de ruptura, caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura (fenômeno de estrição).

σ_f — **Limite de ruptura:** última tensão suportada pelo material antes da fratura.

O alongamento e a estrição são medidas da ductilidade (plasticidade) do material, e definidas como segue:

Δl — **Alongamento:** diferença entre o comprimento final (l_f) e o comprimento inicial (l_o) do corpo-de-prova, e que é dado por:

$$\Delta l = l_f - l_o \quad (2.6)$$

O alongamento específico caracteriza-se pelo quociente do alongamento pelo comprimento inicial do corpo-de-prova, também conhecido como deformação linear média, ou deformação convencional de engenharia no ponto de fratura.

φ — **Coefficiente de estrição:** diferença entre as seções inicial (S_o) e final (S_f) após a ruptura do corpo-de-prova, expressa em porcentagem da seção inicial.

$$\varphi = \frac{S_o - S_f}{S_o} \quad (2.7)$$

Onde:

φ = coeficiente de estrição (%);

S_o = seção transversal inicial da amostra (m^2);

S_f = seção estrita (m^2).

Encruamento

A necessidade de aumentar-se a tensão para dar continuidade à deformação plástica do material decorrente de um fenômeno denominado encruamento. A partir da região de escoamento, o material entra no campo de deformações permanentes, onde ocorre endurecimento por deformação a frio.

Esse fenômeno resulta em função da interação entre discordâncias e das suas interações com outros obstáculos, como solutos, contornos de grãos etc., que impedem a livre movimentação das discordâncias. É preciso uma energia cada vez

maior para que ocorra essa movimentação, e, conseqüentemente deformação plástica, até o limite onde a fratura Tem início (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

2.2.6. Deformação Plástica e Fratura

A deformação elástica pode ser interpretada em termos de estruturas perfeitas, ao passo que a deformação plástica está relacionada com o movimento de discordâncias. A deformação plástica geralmente ocorre por meio de um mecanismo de escorregamento no qual os planos atômicos mais densamente compactados se movem uns sobre s outros. Para um determinado conjunto de planos densamente compactados e de direções, o escorregamento ocorre nos planos onde a tensão de cisalhamento é máxima, o que corresponde a uma direção a 45° do eixo de aplicação da tensão de tração (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

Fratura é a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes, sob a ação de tensão, e pode ser considerada como sendo constituída de duas partes — nucleação da trinca e coalescimento (propagação) da trinca. A fratura pode ser classificada em duas categorias gerais: fratura frágil e fratura dúctil. A fratura dúctil é caracterizada pela ocorrência de uma apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca. A fratura frágil nos metais é caracterizada pela rápida propagação da trinca, com nenhuma deformação macroscópica e muito pouca microdeformação. A Figura 2.2 mostra os tipos de fratura que podem ocorrer (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2008).

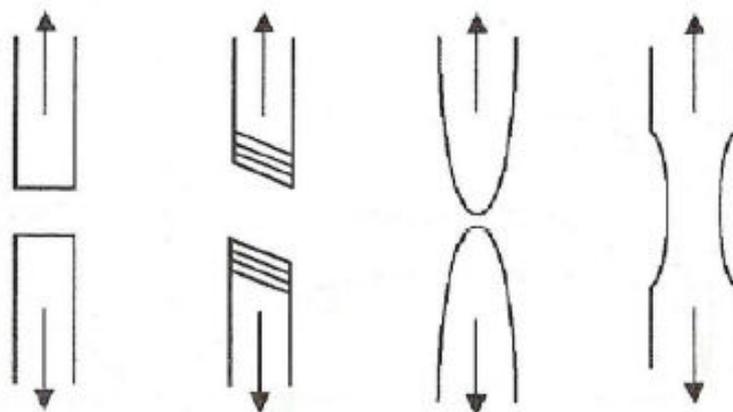


Figura 2.2 - Tipos de Fraturas Observadas em Metais Submetidos à Tensão Uniaxial.
Fonte GARCIA, 2008.

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas com alguns dos parâmetros que são usados para os metais, por exemplo: módulo de elasticidade, e as forças de rendimento e de tração. Para muitos materiais poliméricos, o teste de tensão deformação simples é empregado para a caracterização de alguns desses

parâmetros mecânicos. As características mecânicas de polímeros, em sua maior parte são altamente sensíveis à taxa de deformação, a temperatura, e da natureza química do ambiente (a presença de oxigênio, água, solventes orgânicos, etc.). Algumas modificações das técnicas de testes e configurações de amostra utilizada para metais são necessárias com polímeros, especialmente para os materiais altamente elásticos, como borrachas.

Para os polímeros, são típicos três comportamentos diferentes para a relação tensão-deformação: frágil, em que a fratura ocorre quando se deforma elasticamente o material; plástica, similar ao comportamento encontrado na maioria dos materiais metálicos; totalmente elástica, obtendo alta deformação com baixa tensão. Os polímeros que apresentam comportamento totalmente elástico são chamados de elastômeros. Esses comportamentos podem ser vistos na Figura 2.3. (CALISTER, 2007).

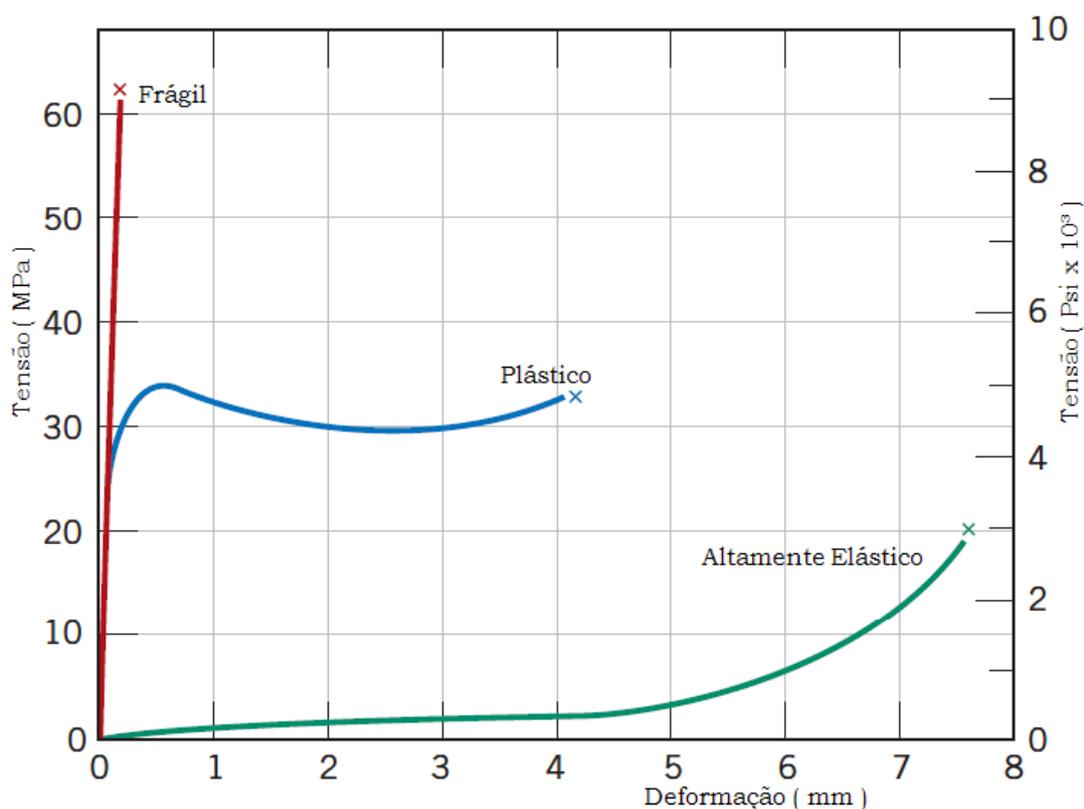


Figura 2.3 - Exemplos de Comportamento Mecânico de Polímeros em Condições de Tração Uniaxial.

Fonte CALLISTER, 2007

O módulo altamente elástico para alguns materiais poliméricos podem ser baixos chegando apenas a 7MPa, mas podem chegar até 4GPa para alguns polímeros muito rígidos, um metal raramente vai se alongar plasticamente a mais de 100%, alguns polímeros altamente elástico pode experimentar alongamentos

para mais de 1000%. Além disso, as características mecânicas dos polímeros são muito mais sensíveis às mudanças de temperatura próxima da temperatura ambiente (CALLISTER, 1994).

2.3. Estrutura de uma Máquina de Ensaio Mecânicos

As máquinas de teste mais comuns para os ensaios de resistência são máquinas universais que são capazes de realizar testes de tração, compressão e flexão. A Figura 2.4 apresenta uma ilustração de uma máquina de ensaios mecânicos universal.

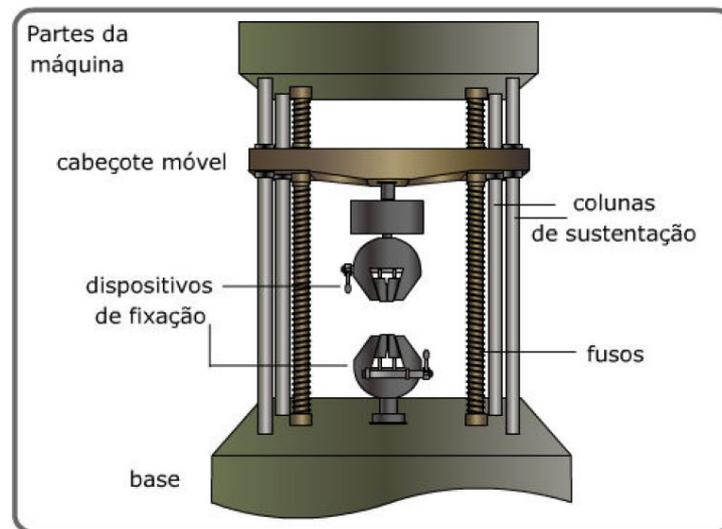


Figura 2.4 - Máquina de Ensaio Mecânicos Universal
Fonte CIMM.

Quanto ao tipo de operação, as máquinas de ensaio podem ser eletromecânicas ou hidráulicas. A diferença entre elas é a forma como a carga é aplicada. Em qualquer caso a referência é para máquinas de carregamento estático ou quase estático.

2.4. Descrição da Estrutura Utilizada

Neste capítulo uma breve descrição dos componentes que fazem parte da estrutura de uma máquina eletromecânica de ensaios mecânicos de tração. Que tem seu funcionamento baseado em um motor elétrico de velocidade variável, um sistema de engrenagens de redução e parafusos que movimentam o cabeçote na direção vertical. As velocidades do cabeçote podem ser alteradas pela velocidade do motor. Um servo-sistema pode ser adaptado para controlar mais precisamente a velocidade do cabeçote. A seguir uma descrição dos principais componentes da estrutura de uma máquina eletromecânica de ensaios mecânicos de tração.

2.4.1. Célula de Carga

As células de carga são transdutores eletromecânicos que transformam as grandezas físicas medidas em tensão elétrica. São largamente utilizados como sensores para mensurar grandezas como massa, pressão, força, torque e aceleração onde através de sua deformação estrutural apresenta alta precisão nas medidas (SPINARDI, 2006).

O princípio do funcionamento baseia-se fornecendo uma alteração da resistência em resposta a uma alteração do comprimento do material metálico condutor (extensômetro - *strain gauge*) que é adequadamente colado em sua estrutura. Ao sofrer uma tensão mecânica, a estrutura em análise tende a se deformar dentro do regime elástico. Essa deformação é transformada em variação de resistência e convertida em variação de tensão (SPINARDI, 2006).

A Figura 2.5 apresenta uma ilustração de uma célula de carga tipo I muito utilizada na indústria com inúmeras aplicações para realizar medidas de diferentes grandezas físicas. Sua fabricação geralmente de alumínio com formatos de estrutura adequados para cada aplicação facilitando as suas deformações elásticas para realizar medidas de acordo com sua aplicação.



Figura 2.5 - Célula de Carga Tipo I
Fonte: HBM, 2011

Na tabela 2.1 têm-se as características da célula de carga.

Tabela 2.1 – Características da Célula de Carga

Resistência Elétrica	350 Ω
Sensibilidade	3mV/V
Capacidade Máxima	500 kgf
Modelo/Tipo	H35 HBM/I
A x L x P	1,21in x 1,12in x 5,12in

Extensômetro – *Strain Gauge*

O extensômetro de resistência elétrica *strain gauge*, aplica o princípio da relação que existe na variação de resistência elétrica de um condutor quando submetido a uma deformação na sua região elástica. Existe uma enorme variedade de tipos, para as mais variadas medidas de grandezas físicas e vem constantemente

sendo melhorado com a descoberta de novos materiais para sua composição (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Na Figura 2.6 podemos observar um *strain gauge* no seu formato mais comum, esse elemento resistivo deve ser fixado convenientemente em uma estrutura adequada para que sua resistência varie com a deformação da superfície na qual esta afixada.

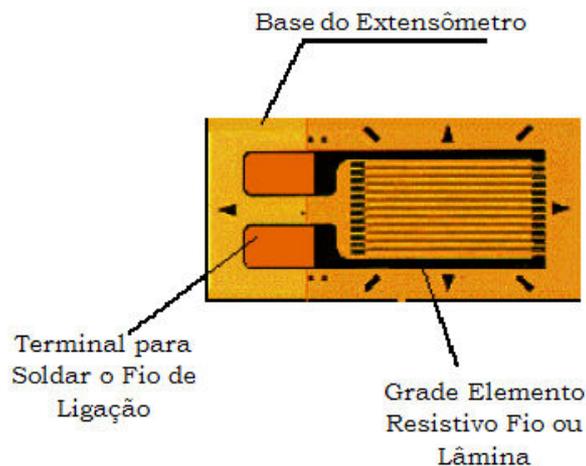


Figura 2.6 – *Strain Gauge*
Fonte www.slidefinder.net, Acessado em 23/09/2011.

Fatores Favoráveis dos Extensômetros

As mais importantes características favoráveis de operação dos extensômetros de resistência elétrica são (BECK, 1983):

- Permite operação numa larga faixa de frequência ressonante, limitada pela característica do material utilizado, com pequenas dimensões aliadas a pouca massa e uma elevada rigidez do material em sua confecção.
- Apresenta uma excelente linearidade e grande precisão dependendo basicamente das características do material e da geometria do transdutor.
- Desde que protegido devidamente da agressividade do meio, sua alteração continua estável por muito tempo não necessitando uma calibração constante.
- Geralmente utilizado na operação com a configuração do tipo em ponte Wheatstone. Podendo ser excitados tanto em corrente alternada como em corrente contínua, pois são sensíveis à frequência da tensão de alimentação.



- Custo relativamente baixo, por isso um dos fatores principais na sua utilização.
- Excelente resposta estática e dinâmica, com ampla faixa de temperatura com frequência máxima mensurada geralmente determinada antes pelos equipamentos utilizados na célula de carga.

Fatores Limitantes dos Extensômetros

Os extensômetros de resistência elétrica devido a sua sensibilidade necessitam de cuidados especiais em relação a vários aspectos, entre os quais se destacam: (BECK, 1983).

- Baixo nível de saída de sinal. Em virtude do nível de saída ser muito baixo e necessário ter um controle de amplificação do sinal estável com uma tensão regulada, livre de ruídos e uma boa compensação dos efeitos térmicos.
- Necessitam de uma proteção especial. Caso contrário sua vida útil é drasticamente reduzida. Em contato com produtos líquidos e ou corrosivos são facilmente degradados.
- Os *strain gauge* são materiais muito sensíveis. Deve-se tomar cuidado na sua instalação e manuseio.
- Sofrem degradação térmica. O próprio material empregado na sua proteção e revestimentos embora dando mais praticidade torna-se um fator limitante a ação da temperatura.

Ligação do Extensômetros

Com a descoberta de medição em ponte de resistência elétrica pelo físico Sir Charles Wheatstone em 1843, hoje denominado de ponte de Wheatstone, que se parte para a idéia dos extensômetros, que transforma uma deformação em variação proporcional de sua resistência elétrica. A relação entre a deformação aplicada ($\epsilon = \Delta L / L_0$) e a variação de resistência de um extensômetro é obtida pela seguinte equação: $(\Delta R / R_0) = K\epsilon$ (Spinardi, 2006).

Onde: ϵ – Valor médio de extensão; ΔL – Variação da distância; L_0 – Distância entre os pontos a serem medidos; ΔR – Variação da resistência por deformação; R_0 – Resistência inicial do extensômetro; K – Fator do extensômetro, calculado experimentalmente.

A Figura 2.7 representa esquematicamente uma ponte tipo Wheatstone.

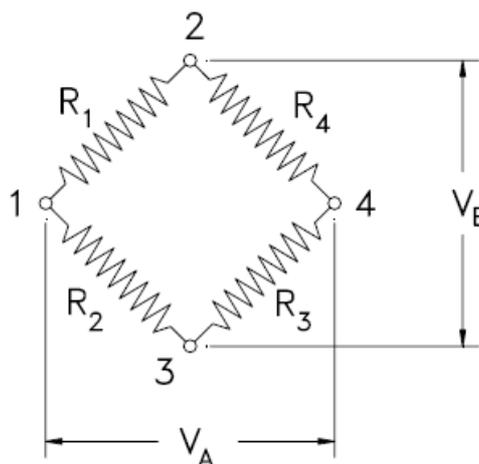


Figura 2.7 – Ponte Wheatstone
Fonte Spinardi, 2006.

O circuito representado por quatro pontos de união contendo os quatro resistores, onde cada um é constituído por um extensômetro, strain gauge, de (R1) à (R4). Se aplicarmos uma tensão conhecida V_E nos pontos (2) e (3), obteremos uma diferença de potencial V_A nos pontos (1) e (4). O valor de (V_A) depende dos quocientes entre as resistências (R1; R2) e (R3; R4).

Pode-se, então, equacionar:

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2.14)$$

A ponte de Wheatstone esta em equilíbrio quando: $V_A/V_E=0$

Para que a ponte esteja equilibrada é necessário que se verifique:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ ou então } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2.15)$$

Partindo do princípio que a ponte de Wheatstone está equilibrada, qualquer variação de resistência, provocará uma diferença potencial em (V_A). Se considerarmos que a variação da resistência (ΔR_i) seja muito inferior que a própria resistência (R_i), pode-se obter a seguinte relação:

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \text{ ou } \frac{V_A}{V_E} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.16)$$

Precisão e Sensibilidade das Células de Carga

Devem ser tomados alguns cuidados na escolha de uma célula de carga respeitando os limites de sua capacidade nominal. Fatores como força máxima que



se quer medir considerando fatores de segurança, fator de sobre carga e de ruptura, para que não ocorram danos funcionais nas células de carga.

Usualmente, células de carga comerciais vêm com a sua sensibilidade expressa em mV/V, para a carga nominal, ou seja, uma célula que apresente sensibilidade de 2 mV/V e seja para uma carga nominal de até 5 kg, terá uma tensão de saída de 20 mV quando aplicado 10V na sua entrada e 5 kg de carga. (BECK, 1983).

2.4.2. Motor CC

O motor de corrente contínua é um dispositivo destinado a converter energia elétrica contínua em energia mecânica rotacional. O oposto também é verdadeiro nos geradores CC: rotação gera energia elétrica contínua. (FITZGERALD, 2002).

Existem diversas aplicações nas quais os motores CC são os mais recomendados e assim, devido às suas características, continuarão a ser por muito tempo sendo utilizados. Como exemplo, pode-se citar:

- Tração de trens;
- Indústrias de papel, plástico e tecido (onde há necessidade de alto torque e velocidades constantes);
- Utilidades domésticas (motor CC série ou motor universal); etc.

As principais partes do motor CC são:

— **Armadura:**

Eixo da Armadura: Imprime rotação ao núcleo da armadura, fazem parte da estrutura enrolamentos e comutador;

Núcleo da Armadura: Constituído de camadas laminadas de aço, provendo uma faixa de baixa relutância magnética entre os pólos;

Enrolamentos da Armadura: Constituído de bobinas isoladas entre si e do núcleo da armadura, colocadas em ranhuras e eletricamente ligadas ao comutador;

Comutador: Consiste em segmentos de cobre isolados entre si e do eixo. Realiza o chaveamento para o processo de comutação das bobinas da armadura.

— **Estator:**

Carcaça: Suporte e proteção do motor;

Enrolamento de Campo: Consiste em poucas espiras de fio de grande seção para o motor série e muitas espiras de fio de pequena seção para os motores shunt. Fornece o campo magnético fixo do estator. Nos motores com ímã permanente no estator, não existe enrolamentos de campo;

Pólos: Constituídos de ferro laminado conectados à carcaça. Servem como suporte e caminho magnético para o campo;

Escovas: São de carvão grafite. Fazem contato com as lâminas do comutador. Permitem alimentar a armadura em movimento.

Princípio de Funcionamento

O princípio básico de funcionamento dos motores CC explica-se pela *Lei de Lorentz*: uma corrente elétrica é gerada em um condutor que se movimenta através de um campo magnético. É claro que a lei se aplica a geradores, no entanto, o oposto também é verdadeiro: movimento é produzido quando um condutor conduzindo corrente está na presença de um campo magnético.

O sentido do movimento é determinado por dois fatores: o sentido da corrente e o fluxo magnético. Como e mostrado na Figura 2.8, posicionado os dedos corretamente obtém-se a direção do movimento. O dedo indicador aponta para a direção do fluxo magnético vindo do estator; O dedo médio indica o sentido da corrente no enrolamento da armadura o dedo polegar indica o sentido do movimento do condutor ou do rotor (FITZGERALD, 2002).

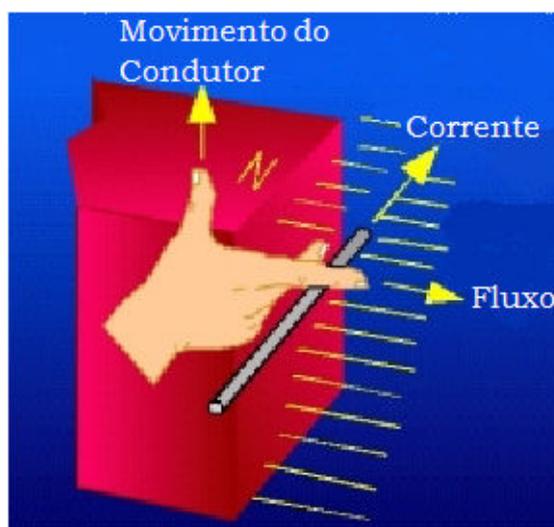


Figura 2.8 – Representação Vetorial do Movimento
Fonte www.slidefinder.net. Acessado em 23/09/2011.



Pode se observar, aplicando-se a regra da mão-direita nota-se que a corrente no condutor foi invertida, assim o movimento também se inverterá. Este é o princípio básico da rotação nos Motors CC.

O enrolamento da armadura no motor CC tem corrente fluindo a partir de uma fonte externa, alimentada pelas escovas e comutadores. A corrente produz um campo magnético no enrolamento.

Força Contra Eletromotriz

Ao aplicar movimento através de um meio externo à armadura de um motor CC e, ao mesmo tempo, alimentando o campo do estator, uma tensão será gerada nas terminações do enrolamento da armadura. É o princípio de funcionamento dos geradores CC, explicado pela *Lei de Faraday*.

O princípio do motor CC é o inverso do gerador: aplicam-se tensões CC no estator e na armadura, e obtém-se a rotação desta. No entanto, o que ocorre quando um condutor se movimenta dentro de um campo? Uma tensão é gerada. Nos motores CC sempre existirá uma tensão gerada contrária à aplicada na armadura, chamada força contra eletromotriz.

Essa tensão será sempre menor do que a tensão aplicada, caso contrário, não existiria o movimento do rotor e sua corrente sempre se oporá à corrente da armadura (IA).

Quando a carga do motor aumenta, sua velocidade diminui e menos força contra eletromotriz é gerada. Assim, a corrente Ia aumentará.

2.4.3. Controle de Velocidade

A equação fundamental que define a velocidade nos motores CC é:

$$n = \frac{[Va - (Ra * Ia)]}{K * \phi} \quad (2.17)$$

Onde:

n: Velocidade de rotação;

Va: Tensão aplicada na armadura;

Ia: Corrente na armadura;

Φ : Fluxo magnético do estator;



K : constante que depende do tamanho do rotor, do número de pólos do rotor, e como esses pólos são interconectados, determinada pelo projeto do enrolamento.

E é definida pela equação (2.1)

$$K = \frac{\text{pólos } Ca}{2\pi m} \quad (2.18)$$

Onde:

Ca número total de condutores no enrolamento de armadura;

m número de caminhos em paralelo no enrolamento.

A partir desta fórmula, conclui-se que:

- Se o fluxo magnético polar (\emptyset) é enfraquecido, a velocidade tende a aumentar;
- A velocidade é proporcional à tensão aplicada na armadura;
- Se a corrente da armadura aumenta por acréscimo de carga a velocidade cai.

Assim, podemos controlar a velocidade de várias maneiras:

— Controle da corrente de campo (estator):

É o modo mais comum e constitui uma das maiores vantagens dos motores *shunt*. O ajuste da corrente de campo pode ser obtido variando-se a resistência do circuito do estator através de reostatos ou ligações auxiliares e também através de variação da tensão aplicando no estator com a utilização de acionamentos eletrônicos exclusivos para ele (excitação separada).

A menor velocidade possível é a que corresponde à corrente de campo máxima. A velocidade máxima é limitada eletricamente pelos efeitos da reação da armadura a um campo fraco, que causa instabilidade ou comutação pobre.

— Controle da resistência no circuito da armadura:

Este tipo de controle consiste em obter diferentes velocidades por inserção de resistências em série com o circuito de armadura. Pode ser usado em todos os tipos de motores CC de grande porte.

— controle da tensão aplicada à armadura:



A tensão aplicada à armadura é diretamente proporcional à velocidade desenvolvida pelo motor abaixo da saturação. Variando-se a tensão através de dispositivos eletrônicos, obtém-se um controle extremamente preciso da velocidade. Em conjunto com o controle da corrente de campo, obtém-se uma maior gama de velocidades possíveis.

Esse tipo de controle é ideal para motores com excitação separada de campo e armadura, ou motores com ímã permanente (FITZGERALD, 2002).

2.4.4. Controle de Conjugado do Motor CC

O conjugado eletromagnético desenvolvido nas máquinas CC é dado por:

$$Td = K * \phi * Ia \quad (2.19)$$

Onde:

K: Constante que depende do tamanho do rotor, do número de pólos do rotor, e como esses pólos são interconectados;

Φ : Fluxo magnético do estator;

Ia: Corrente na armadura.

Pela fórmula, verifica-se que o torque é diretamente proporcional ao campo e à corrente da armadura. Assim, variando-se o campo magnético no estator e ou a corrente da armadura, obtém-se o controle do torque desenvolvido pelo motor.

Sabe-se que a corrente da armadura Ia é diretamente ligada à carga aplicada ao motor. Quando a carga é incrementada, a velocidade diminui e a corrente drenada pela armadura Ia aumenta. Como consequência o torque aumenta (FITZGERALD, 2002).

2.4.5. Potência Desenvolvida Pela Armadura

A potência mecânica desenvolvida pelo motor CC é dada por (desconsiderando as perdas):

$$P = Ec * Ia \quad [W] \quad (2.20)$$

Ou

$$P = Td * w \quad [W] \quad (2.21)$$

Onde:

Ec: Força contra eletromotriz;

Ia: Corrente da armadura;

Td: Torque eletromagnético desenvolvido;

W: velocidade angular (FITZGERALD, 2002).

2.4.6. Tipos de Motores CC

Existem quatro tipos básicos de motores CC comerciais:

- Ímã permanente;
- Série;
- Paralelo;
- Composto.

As armaduras de todos os tipos de motores CC possuem as mesmas características básicas. O que irá diferenciar as categorias dos motores é a forma como o estator é enrolado, conectado e magnetizado (FITZGERALD, 2002).

— Ímã Permanente:

Este tipo de motor CC é geralmente utilizado para aplicação de baixo torque. A alimentação CC é conectada diretamente às bobinas da armadura através do conjunto escovas/comutadores. O campo é produzido por ímãs permanentes localizados no estator. Na Figura 2.9 uma ilustração de motor com ímã permanente.

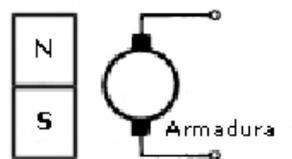


Figura 2.9 – Motor com Ímã Permanente.
FONTE FITZGERALD, 2002.

Os motores CC com ímã permanente possuem algumas vantagens sobre os outros tipos convencionais, uma delas é a redução do custo. As características de velocidade são similares às dos motores paralelos (FITZGERALD, 2002).

2.5. Dispositivos de Realimentação para Controle de um Motor

Os dispositivos de realimentação fornecem sinais de realimentação para obter informações de estabilidade, velocidade e posição do eixo dos motores. Estes sinais podem vir de diversos dispositivos como o tacômetro analógico, tacômetros



digitais (*encoders*) e *resolvers*. Motores que utilizam os dispositivos de realimentação e com controles eletrônicos aumentam sua eficiência, seja em controles de velocidade, torque e posição, bem como em dinâmica, manutenção e capacidade de sobrecarga. A seguir veremos alguns detalhes sobre cada um deles (WISBECK, 2001).

2.5.1. Tacômetros Analógicos

Os tacômetros analógicos são os dispositivos mais simples de realimentação. Trata-se de um motor com estator e um ímã permanente no rotor. O rotor é acoplado ao eixo do motor e, quando rotacionado, irá funcionar como um pequeno gerador, fornecendo uma tensão no enrolamento do seu estator proporcional à velocidade com que o rotor gira. Alguns tacômetros já possuem um retificador interno que irá fornecer na saída uma tensão CC proporcional à velocidade do motor, outros fornecem a própria tensão AC gerada (WISBECK, 2001).

2.5.2. Encoders

Também conhecidos como *encoders* óticos ou simplesmente *encoder*, são dispositivos que convertem a rotação mecânica em sinais elétricos. Os *encoders* fornecem sinais que são proporcionais à distância ou ângulo desenvolvido pelo eixo do motor.

Encoder Absoluto

O *encoder* absoluto fornece um sinal específico para cada posição do eixo em todos os 360° graus. Este tipo de *encoder* utiliza tanto escovas para realizar contatos como as trilhas codificadas, quanto sensor ótico emissor e receptor para ler as trilhas e gerar os códigos.

O número de trilhas no disco codificado determina a resolução do *encoder*, quanto maior o número de códigos, maior a precisão na determinação do movimento desenvolvido pelo motor. Como os códigos se encontram diretamente nos discos, quedas de energia não afetam a recuperação da posição do *encoder*.

_ Modo de Operação:

- Fornece um código digital único para cada posição;
- O código geralmente é no formato *Gray*;

- Os codificadores óticos absolutos são mais complexos e mais caros que os incrementais (WISBECK, 2001).

Encoder Incremental

O *encoder* incremental provê sinais pulsantes ou senoidais, de acordo com sua rotação. O dado relativo ao ângulo percorrido é obtido pela contagem dos sinais.

O disco é geralmente fabricado com linhas escuras e transparentes. Uma fonte de luz atravessa o disco e aciona um fotodetector. Em cada linha transparente é gerado um sinal que através de circuitos eletrônicos esses sinais são convertidos em trem de pulsos ou senoides.

Alguns parâmetros são importantes na escolha do *encoder* incremental:

- Pulso/rotação: Determina a resolução do *encoder*;
- Saída: Pode ser sinal de ondas quadradas ou senoidais;
- Número de canais: O *encoder* com dois canais permite definir o sentido da rotação.

- Modo de Operação:

- Os pulsos de luz são contados para determinar a posição;
- São usados dois fotodetectores em quadratura para determinar a direção do movimento;
- Um pulso de índice é usado para determinar a posição inicial.

Ao contrário do *encoder* absoluto, o incremental apenas informa pulsos, e não códigos. Assim, com quedas de energia, perde-se a posição do *encoder* caso o circuito que processa os pulsos não tenha nenhum tipo de memória não volátil (WISBECK, 2001).

2.5.3. Resolvers

O resolver é um sistema de realimentação analógico, parecido com tacômetro analógico, composto por um estator e um rotor. Seu funcionamento é oposto ao do motor, ou seja, funciona como um gerador. Seu rotor gira através da ação do eixo acoplado ao motor e faz com que a ação do campo eletromagnético do seu rotor excitado através de escovas, exerça influência direta sobre o enrolamento do estator do resolver.

O estator do resolver é dividido em dois enrolamentos defasados em 90° entre si, que geram sinais senoidais que funcionam como realimentação de posição e velocidade para o motor.

O alinhamento do resolver é fator essencial para seu correto funcionamento, por tratar-se de um sensor de alta resolução e precisão. Devido a isso, é normal que ele já vem inserido no interior do motor, provendo somente suas conexões na parte externa do motor.

Existem diversos modelos de resolvers, geralmente variando o número de enrolamentos do estator e no rotor (WISBECK, 2001).

2.6. Protocolos de Comunicação

Em muitas aplicações microcontroladas, pode ser necessário realizar a comunicação entre o microcontrolador e um ou mais dispositivos externos localizados tanto na mesma placa do circuito, como fora dela, a metros ou mesmo dezenas de quilômetros de distância, a escolha do sistema de comunicação mais adequado para realizar a tarefa depende de diversos fatores, como: velocidade, imunidade a ruídos, custo, etc. As técnicas de comunicação podem ser divididas em duas grandes características: serial e paralela.

Na comunicação serial, a informação a ser transmitida é fracionada em pequenas partes (bist) que são enviados ao equipamento receptor uma após a outra, em série, daí a denominação de comunicação serial. Como exemplos de sistemas de comunicação serial, podemos citar: as interfaces seriais dos computadores (RS_232, USB, FIREWIRE), protocolos de redes locais (ETHERNET, TOKEN-RING, etc.), outros protocolos como I²C, SPI, 1-WIRE, LIN CAN, etc (PEREIRA, 2003).

Na comunicação paralela, os bist componentes da informação são transmitidos simultaneamente (total ou parcialmente) em paralelo. Como exemplos de sistemas de comunicação paralela, podemos citar os barramentos internos dos microprocessadores e microcontroladores, barramento, barramento ISA, PCI, VAESA, AGP, a interface de impressora paralela dos microcomputadores (também chamados de Centronics), SCSI, IDE, etc (PEREIRA, 2003).

2.7. Aplicativos de Supervisão

Neste item são descritas as principais características dos programas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition* – Supervisão, Controle e Aquisição de Dados). Uma sequência para elaboração de aplicativos SCADA é apresentada.

2.7.1. Supervisão de Controle e Aquisição de Dados - SCADA

O sistema SCADA é responsável pelo tratamento das informações lógicas e analógicas sobre o estado corrente do sistema, pela exibição desses dados na tela de controle e pelo comando remoto de dispositivos (automaticamente ou por iniciativa do operador).

O sistema supervisor é responsável pela comunicação do operador com o processo. Através dele o usuário pode acompanhar todo o processo, suprimindo eventuais necessidades de intervenção. Com a configuração de proteção podem ser designados direitos de acesso na forma de campos de aplicação e campos protegidos. Desta forma, os acessos para vários níveis de controle operacionais são protegidos por senhas e a hierarquia de acesso tem flexibilidade (PEDRO URBANO; AUZUIR, 2009).

As atribuições de um sistema SCADA são basicamente: controle, monitoração e supervisão. Para uma melhor compreensão do assunto, seguem algumas definições importantes:

- **Controle:** ação de gerar sinais de forma que a variável controlada se comporte de acordo com o preestabelecido. Entradas e saídas analógicas e digitais entre o processo, no sentido do microcontrolador para o processo e vice-versa.
- **Monitoração:** aquisição de dados para verificar as condições de funcionamento do processo (sinalização de valores limites, ocorrências de falhas, alarmes e relatórios). As leituras acontecem somente no sentido do processo para o microcontrolador.
- **Supervisão:** aquisição de dados para permitir a elaboração de uma estratégia de operação para maximizar o retorno financeiro (maior produção, qualidade e eficiência).
- **Aplicativo:** algoritmos de alto nível, conjunto de telas, recursos, comunicações e configurações elaboradas pelo usuário responsável pela personalização do sistema SCADA (pois eles são genéricos). É no aplicativo que é definida toda a funcionalidade do sistema.



- **Scripts:** sub-rotinas (módulos) em que se podem definir linhas de código em linguagem de programação (*Basic*, VB ou C), para permitir maior flexibilidade para associar ações a eventos específicos.
- **Tags:** é o nome dado às variáveis utilizadas em um sistema SCADA, sejam variáveis para comunicação com os equipamentos de aquisição de dados, sema para armazenamento de dados temporários.
- **Hardkey:** dispositivo de segurança ligado à porta paralela ou USB do microcomputador, que permite a utilização plena do *software*, isto é, sua licença de funcionamento (PEDRO URBANO; AUZUIR, 2009).

2.7.2. Características de *Hardware* e *Software* dos Sistemas SCADA.

Um sistema SCADA consiste de certo número de UTR (Unidade Terminal Remota) coletando dados do campo e enviando estes dados à estação mestre via um sistema de comunicação. As UTR são baseadas em equipamentos inteligentes, tais como CLP, *data loggers* etc. estes dispositivos são conhecidos com IED (*Intelligent Electronic Device*). Na estação mestre são visualizados os dados e permite ao operador executar tarefas de controle remotamente (PEDRO URBANO; AUZUIR, 2009).

Um sistema digital de controle distribuído gerenciado por um sistema SCADA possui essencialmente os seguintes níveis hierárquicos:

- Dispositivos de campo para instrumentação e controle;
- UTR (Unidade Terminal Remota) responsáveis pela coleta de dados e controle;
- Sistema de comunicação;
- Estação mestre com software específico para monitoração e controle;
- Tecnologia para processamento da informação (TI);
- Sistema de computadores (servidores e clientes).



2.7.3. Aplicativos para Sistemas SCADA.

Um sistema SCADA coleta dados de equipamentos remotos, processando e apresentando informações. Este possibilita, ainda, a entrada de comandos, parâmetros e *setpoints* do operador. Apresenta recursos avançados como registro de eventos, alarmes, Controle Estatístico de Processo (CEP), armazenamento de dados (em banco de dados), dentre outros.

Os *softwares* SCADA contam com muitos recursos prontos que um aplicativo de supervisão em automação normalmente utiliza. São objetos de interface com usuário: telas, botões, campos de entrada de valores, gráficos, browsers; objetivos de recursos internos: interface com banco de dados, servidor de alarmes, *drivers*, fórmulas e muitas outras facilidades (PEDRO URBANO; AUZUIR, 2009).

2.7.4. Elaboração de Aplicativos para Sistemas SCADA

A elaboração de aplicativos de supervisão pode seguir uma sequência de implementação que pode variar com o tipo de aplicação, tipo de usuário e finalidade da aplicação. O tipo de aplicação pode variar muito de acordo com o processo e nível hierárquico do sistema ou tipo controle realizado (supervisão, monitoramento ou controle propriamente dito). Quanto aos usuários, podem ser operários de fábrica com menor nível de escolaridade e engenheiros especializados, desta forma, a complexibilidade do aplicativo vai depender do equipamento (IHM, PC, características ou capacidade) e localização (tela de controle, processos, etc.) (PEDRO URBANO; AUZUIR, 2009).

Uma sequência simples a ser seguida para elaboração da aplicação é:

- Definição das telas que deverão fazer parte da solução;
- Elaboração e definição das propriedades das telas;
- Introdução dos objetivos que deverão fazer parte de cada tela;
- Definição das interconexões entre as telas;
- Definição dos tipos de *tags* e quais *tags* externas deverão ser criadas;
- Elaboração dos *scripts* necessários para a aplicação;
- Definição dos logs de alarmes e eventos;



- Definição dos relatórios, gráficos e receitas;
- Definição dos *drivers* de comunicação necessários;
- Parametrização dos *drivers*;
- Definição de hierarquias e senhas;
- Testes de comunicação com os equipamentos que farão parte da solução (CLP, rádio, MODEM, equipamentos de aquisição de dados em geral etc.).

2.8. Microcontroladores PIC

Estes microcontroladores, fabricados pela Microchip, são provavelmente a melhor aposta para iniciados. O verdadeiro nome deste microcontroladores é PICmicro, mas são mais conhecidos por PIC.

O primeiro modelo foi desenhado em 1975 pela General Instruments. Chamava-se PIC1650, e foi idealizado para fins totalmente diferentes. Após 10 anos, e juntando memória EEPROM, este circuito transforma-se num verdadeiro microcontrolador PIC.

O PIC16F887A é um dos mais recentes produtos da Microchip. Tem todos os componentes que um moderno microcontrolador tem e, pelo baixo custo, amplo campo de aplicações, alta qualidade e facilidade de adquirir, é a solução ideal para aplicações como: controlo de processo industrial, controlo de máquinas, medição de valores, entre outros.

A grande vantagem da família PIC é que todos os modelos possuem um *set* de instruções bem parecido, assim como também mantêm muitas semelhanças entre suas características básicas. Desta maneira ao conhecermos o PIC16F877A estaremos nos familiarizando com todos os Microcontroladores da Microchip, o que tornará a migração para outros modelos muito mais simples. As características aqui apresentadas encontram-se disponíveis em diversos outros modelos (SOUZA, LAVINIA, 2002).

2.9. Determinação das Incertezas

A fim de garantir confiabilidade, todo sistema deve ser calibrado ou pelo menos tenha suas incertezas determinadas.

Para que um intervalo de confiança represente a probabilidade de que a média de uma grandeza vá cair dentro de certo número de desvios padrões σ é



necessário garantir que uma média tenha um desvio máximo determinado da média. Neste caso, pode-se calcular o número de medidas necessário para garantir a média com certa confiabilidade (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2006). Considerando-se a distribuição de erros gaussiana e ainda para pequenos lotes de amostras, pode-se definir a incerteza da medida como a equação a seguir:

$$\Delta = \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.22)$$

Sendo σ o desvio padrão, n o número de amostras e z o intervalo de confiança.

Para determinar a confiabilidade real isolando z obtém-se:

$$z = \frac{\Delta n^{1/2}}{\sigma} \quad (2.23)$$

Supondo o intervalo de confiança como desvio padrão, pode-se obter a incerteza padrão.

Nestes casos pode-se calcular n com auxílio da Tabela 2.2 para determinar z (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2006).

Tabela 2.2 – Níveis de Confiança.

Nº de σ	Intervalo de confiança	Nível de confiança (%)	Nível de significância (%)
3,30	$(y - 3,3\sigma) < y, < (y + 3,3\sigma)$	99,9	0,1
3,00	$(y - 3\sigma) < y, < (y + 3\sigma)$	99,7	0,3
2,57	$(y - 2,57\sigma) < y, < (y + 2,57\sigma)$	99,0	1,0
2,00	$(y - 2\sigma) < y, < (y + 2\sigma)$	95,4	4,6
1,96	$(y - 1,96\sigma) < y, < (y + 1,96\sigma)$	95,0	5,0
1,65	$(y - 1,65\sigma) < y, < (y + 1,65)$	90,0	10,0
1,00	$(y - \sigma) < y, < (y + \sigma)$	68,3	31,7

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste projeto serão descritos neste capítulo, que contém o detalhamento da montagem das peças mecânicas, componentes eletrônicos, *hardware*, *software* e seu fluxograma.

3.1. Descrição Geral do Sistema

O projeto proposto consiste na modernização de uma máquina de ensaios mecânicos de tração, a partir do controle da velocidade e deslocamento do eixo do motor, a medição de força de tração mecânica, além de um sistema de aquisição de dados. A Figura 3.1 mostra um diagrama de blocos simplificado do sistema implementado.

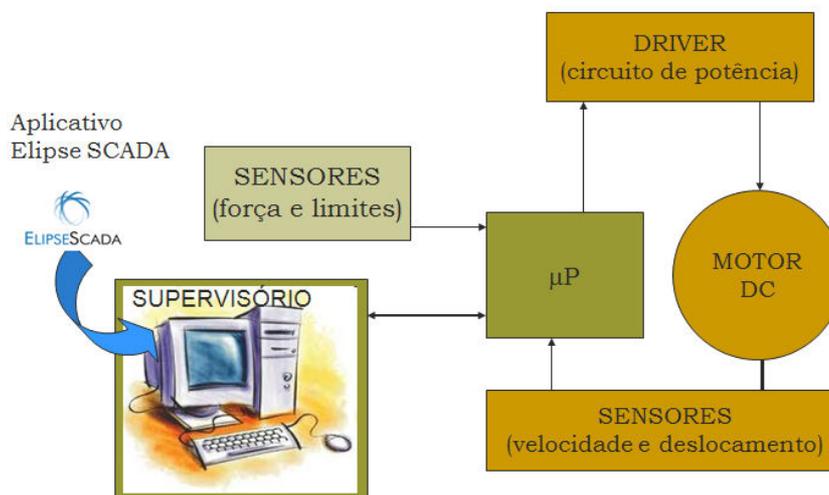


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos Simplificado do Sistema.

Para controlar a velocidade do motor se utilizou um taco gerador acoplado ao eixo do mesmo. O taco fornece uma tensão proporcional a velocidade, essa tensão é transferida ao microcontrolador para fazer o controle de velocidade em caso de sobrecarga. Para mensurar a variação do deslocamento utiliza-se um

encoder óptico acoplado ao eixo do motor. Na medição de força, os sinais provenientes da célula de carga, que é o sensor utilizado, são convertidos através de circuitos adequados e transmitidos ao microcontrolador onde são tratados através de *software* para suas grandezas correspondentes.

Todo o sistema deverá ser operado apenas através de um computador. Dessa forma, é necessário se ter um sistema de aquisição de dados e um supervisor, que é a interface homem máquina para auxiliar aos usuários na leitura dos dados dos ensaios mecânicos.

3.2. Descrição da Máquina - Estrutura

A máquina de ensaios mecânicos utilizada neste projeto é denominada Versat 502, disponível na própria instituição de ensino com seus respectivos sensores acoplados. Na Figura 3.2 observam-se as fotos da estrutura, motor com sensores acoplados.

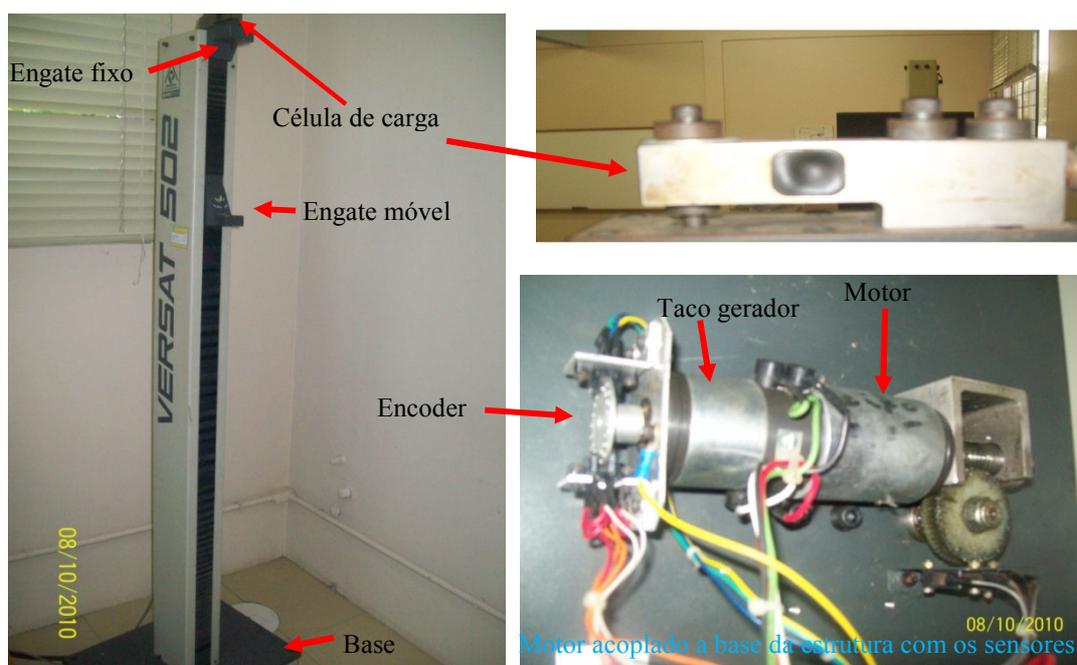


Figura 3.2 – Estrutura da Máquina, Motor e Sensores.

O engate fixo é onde o corpo de prova para os ensaios será preso e é onde a célula de carga mede a tensão mecânica aplicada ao corpo. Também existe o engate móvel, que faz o movimento no sentido da tração, para baixo. Este engate está preso a um parafuso com rosca sem fim, disposto na vertical e acoplado, na base da máquina, e ao eixo do motor através de engrenagens de redução.

Quanto ao motor, este acoplado a um taco gerador e um *encoder* de quadratura, com 20 pulsos de resolução fornecendo o deslocamento do eixo da máquina. O motor é da marca Robbins modelo E586 com modificações e adaptações feitas pelo fabricante da máquina de ensaios mecânicos Versat para acomodar os sensores e acoplá-lo a estrutura.

3.3. Descrição dos Sistemas Eletroeletrônicos e Computacionais

3.3.1. Encoder de Quadratura

O *encoder* de quadratura utilizado neste projeto é um modelo fabricado pelo próprio fabricante da máquina. O mesmo possui 20 pulsos por revolução. Fornece informações de deslocamento através dos sinais A e B.

Os dois canais, canal A e canal B, estão interrelacionados. Se o canal A está a frente do canal B, então a direção do motor é julgada positiva ou para frente. Se o canal B está a frente do canal A, então a direção do motor é julgada negativa ou reversa. A Figura 3.3 mostra os dois sinais do *encoder* de quadratura.

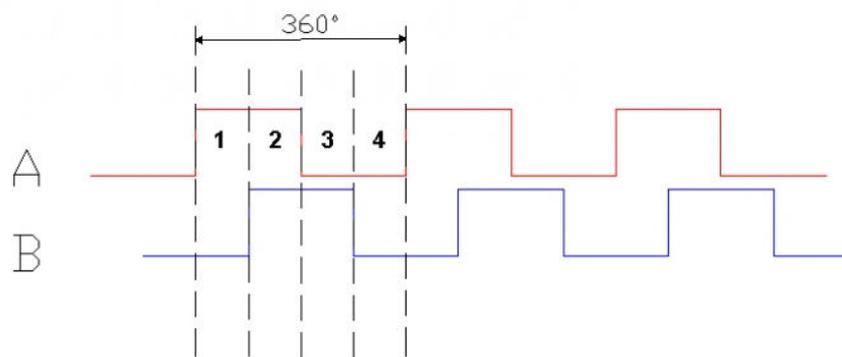


Figura 3.3 - Sinais de interface do *Encoder* de quadratura

Os sinais do *encoder* foram ligados diretamente aos pinos do microcontrolador para fazer a conversão no seu deslocamento.

3.3.2. Taco Gerador

O tacômetro analógico foi o recurso usado para o controle da velocidade do motor, a tensão CC é aproximadamente proporcional à sua velocidade de rotação e a sensibilidade é expressa em V/RPM. A polaridade da tensão de saída reflete no sentido de rotação (WISBECK, 2001).

O circuito de condicionamento do sinal vindo do taco gerador foi utilizado uma retificação em ponte e derivado uma tensão através de resistores adequada à entrada do sinal ao microcontrolador. O gerador em questão fornece uma tensão de 15,2V/KRPM chegando a 68,4V de tensão CC, em sua máxima rotação com uma tensão de 30V aplicada aos terminais do motor. Na Figura 3.4 o circuito elétrico utilizado para o condicionamento do sinal.

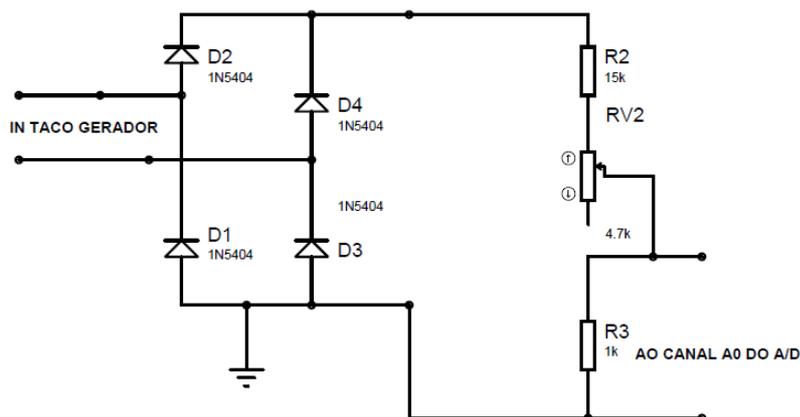


Figura 3.4 – Circuito Elétrico Para Condicionamento do Sinal do Gerador.

3.3.3. Medição de Tensão Mecânica

As células de carga utilizadas para medição de tensão mecânica possuem as seguintes características: uma é do tipo I modelo H35, possui uma capacidade nominal de 500 kg e outra do tipo S modelo S35, com capacidade nominal de 50 kg, fabricadas pela HBM, com sensibilidade de 3mV/V na saída e 350Ω de resistência elétrica na ponte de Wheatstone seladas hermeticamente. Podemos observar as células acima descritas na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Células de Carga Tipo I e Tipo S.
Fonte *Datasheet* HBM.

A ponte de Wheatstone foi alimentada com 10V, tensão fornecida pelo própria tensão de referência do amplificador de instrumentação INA125 da BURR-BROWN e sua saída pode ser ajusta através de um único resistor externo, onde é possível regular o ganho. A Figura 3.6 exibe uma forma simplificada do condicionamento do sinal proveniente da célula de carga.

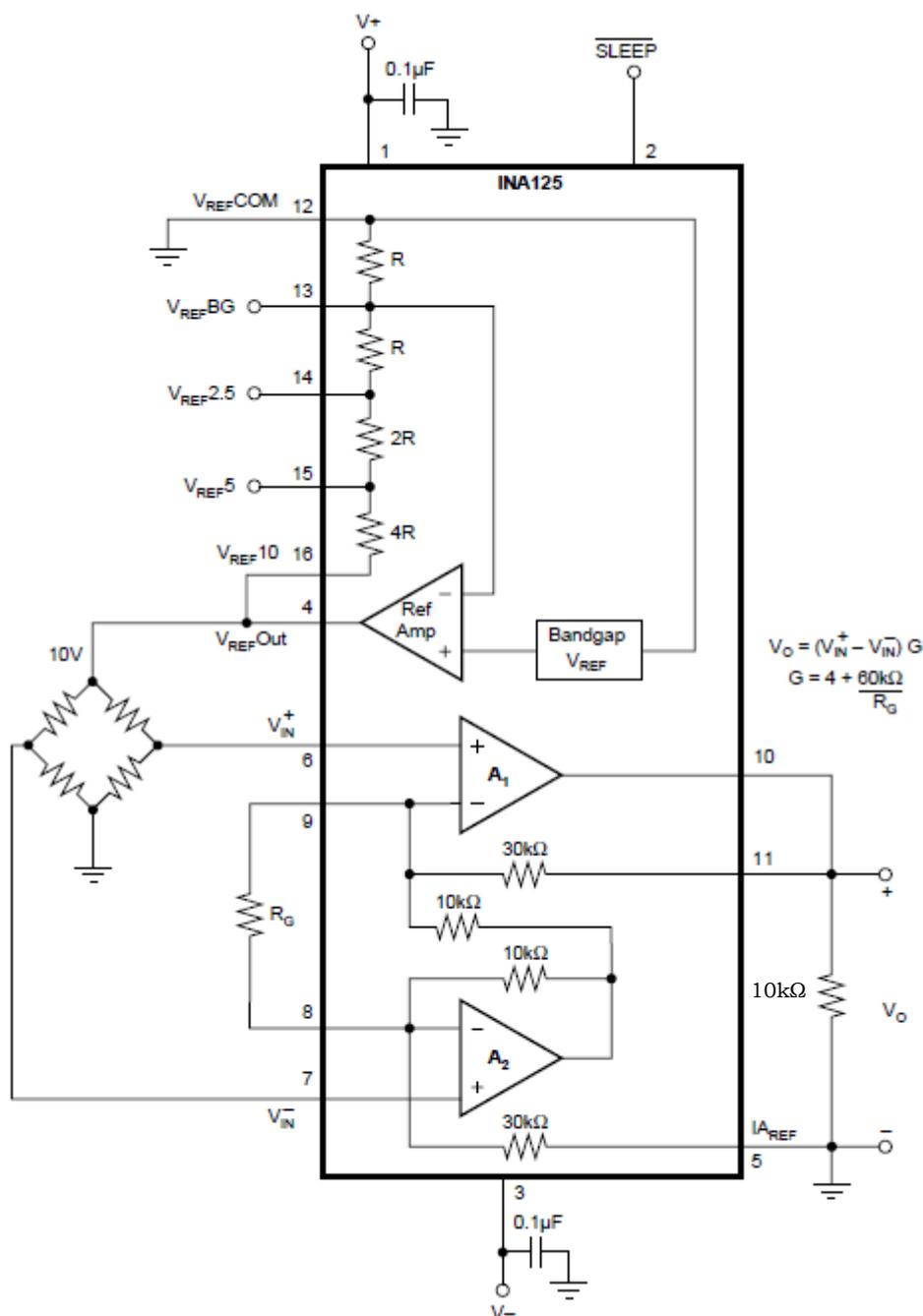


Figura 3.6 – Representação do Circuito e Condicionamento do Sinal Proveniente da Célula de Carga.

Fonte: Datasheet BURR-BROWN, 1998.

O ganho é definido através do resistor R_G pela seguinte equação:

$$G = 4 + \frac{60K\Omega}{RG} \quad (3.1)$$

O INA125 é um amplificador de instrumentação de precisão, com ganho variável entre 4V/V e 10.000V/V e *offset* de 250uV e a uma rejeição de 100dB para um ganho 100.

3.3.4. Driver – Controle do Motor CC

Neste projeto foi implementado um circuito em ponte H para o acionamento do motor como se pode observar na Figura 3.7.

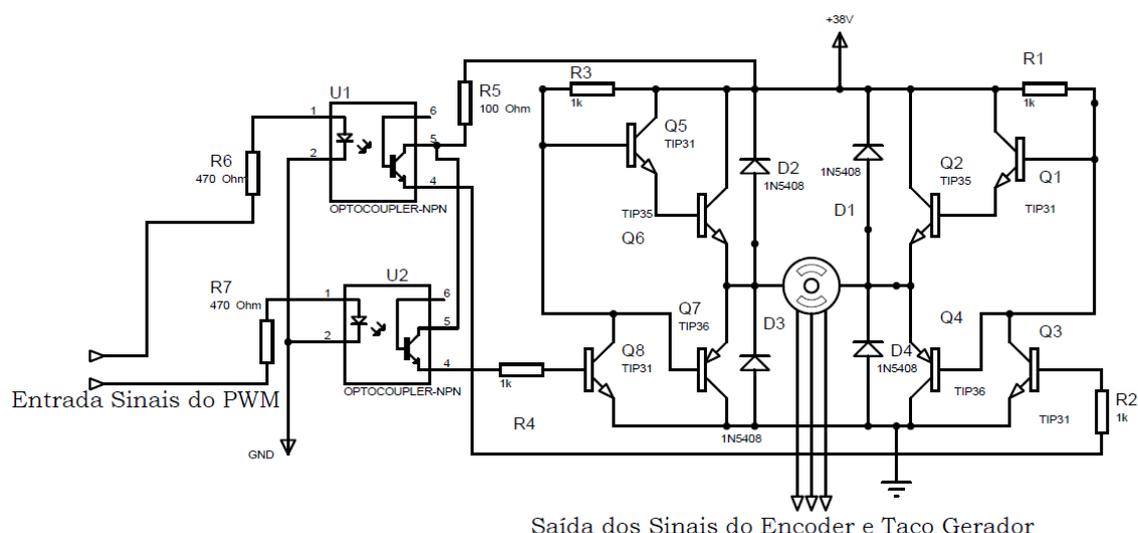


Figura 3.7 – Circuito em Ponte H Transistorizado.

Os dispositivos de chaveamento utilizados na ponte H foram os transistores TIP35B e seu par complementar TIP36B, os quais suportam uma corrente de 25A e 80V de tensão com dissipadores adequados para dissipação do calor.

A interface entre o microcontrolador e a etapa do circuito de potência se dá através de uma lógica digital para isolação do microcontrolador dos *drivers* de potência e evitar que um comando errôneo do microcontrolador danifique o circuito de potência.

O controle se dá através do sinal PWM vindo do microcontrolador determinado pelo usuário através dos botões do aplicativo Elipse SCADA no computador e comparado com a leitura do AD proveniente do sensor de velocidade. Os pinos 16 e 17 do microcontrolador são os pinos de controle PWM do PIC, eles são ligados cada um em um braço da ponte H para o controle da velocidade e do sentido de rotação do motor. A velocidade do motor é determinada com a variação do *duty Cycle* dentro de um período fixo do PWM. Quanto maior o *duty cycle*, maior

a tensão média disponível ao motor, conseqüentemente, maior velocidade angular do motor.

3.3.5. O Microcontrolador

Para o controle dos sinais deste projeto foi utilizado o microcontrolador PIC16F877A fabricado pela Microchip Technology Inc, encapsulado em um CI de 40 pinos. É o principal componente do projeto, pois é ele quem gerencia todas as informações do *hardware* e periféricos.

O desenvolvimento do programa foi realizado utilizando-se as ferramentas de desenvolvimento da Microchip, MPLAB IDE v8.63, e para a gravação do *firmware* no PIC foi utilizado o gravador modelo ICD2 fabricado pela Monsaico com a possibilidade de gravação *in-circuit*, a linguagem de programação utilizada foi a linguagem C conjuntamente com o compilador PCW da CCS em sua versão DEMO.

Hardware

O *hardware* montado para o microcontrolador utilizado e o acoplamento dos sensores e do *driver* de controle do motor cc pode-se visualizar na Figura 3.8

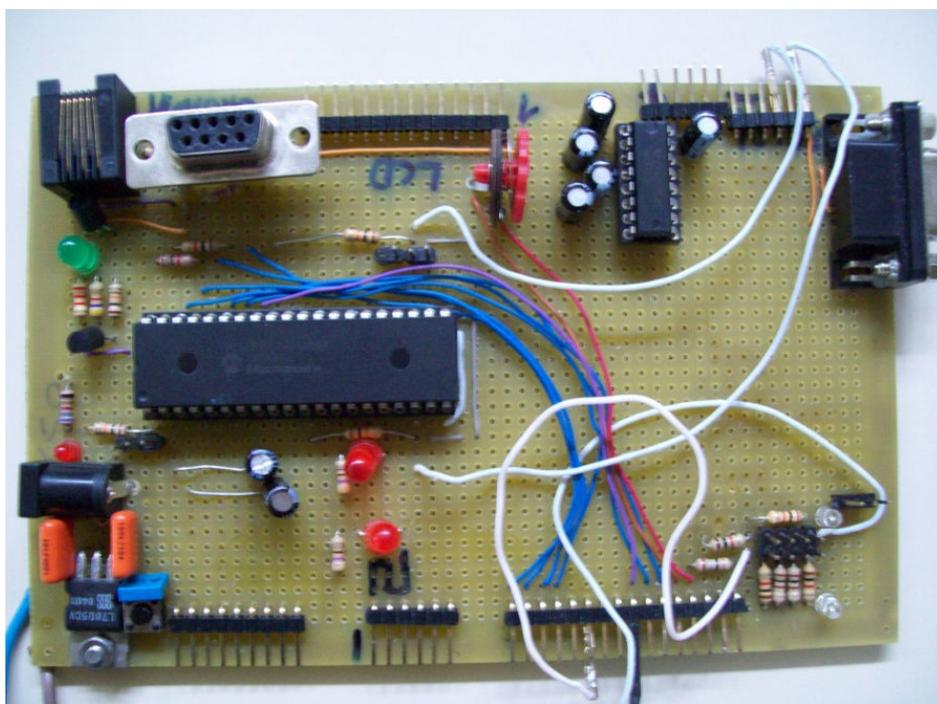


Figura 3.8 – Placa do Circuito de Controle

Na interface entre o microcontrolador e o computador foi utilizado o MAX232 para realizar transferência de dados entre os mesmos, foram utilizados

conectores tipo DIL para a conexão do LCD, entradas dos sinais analógicos, sinal do *encoder*, fim de curso e saídas do PWM.

Software

O fluxograma na Figura 3.9 mostra como o *software* de controle foi implementado.

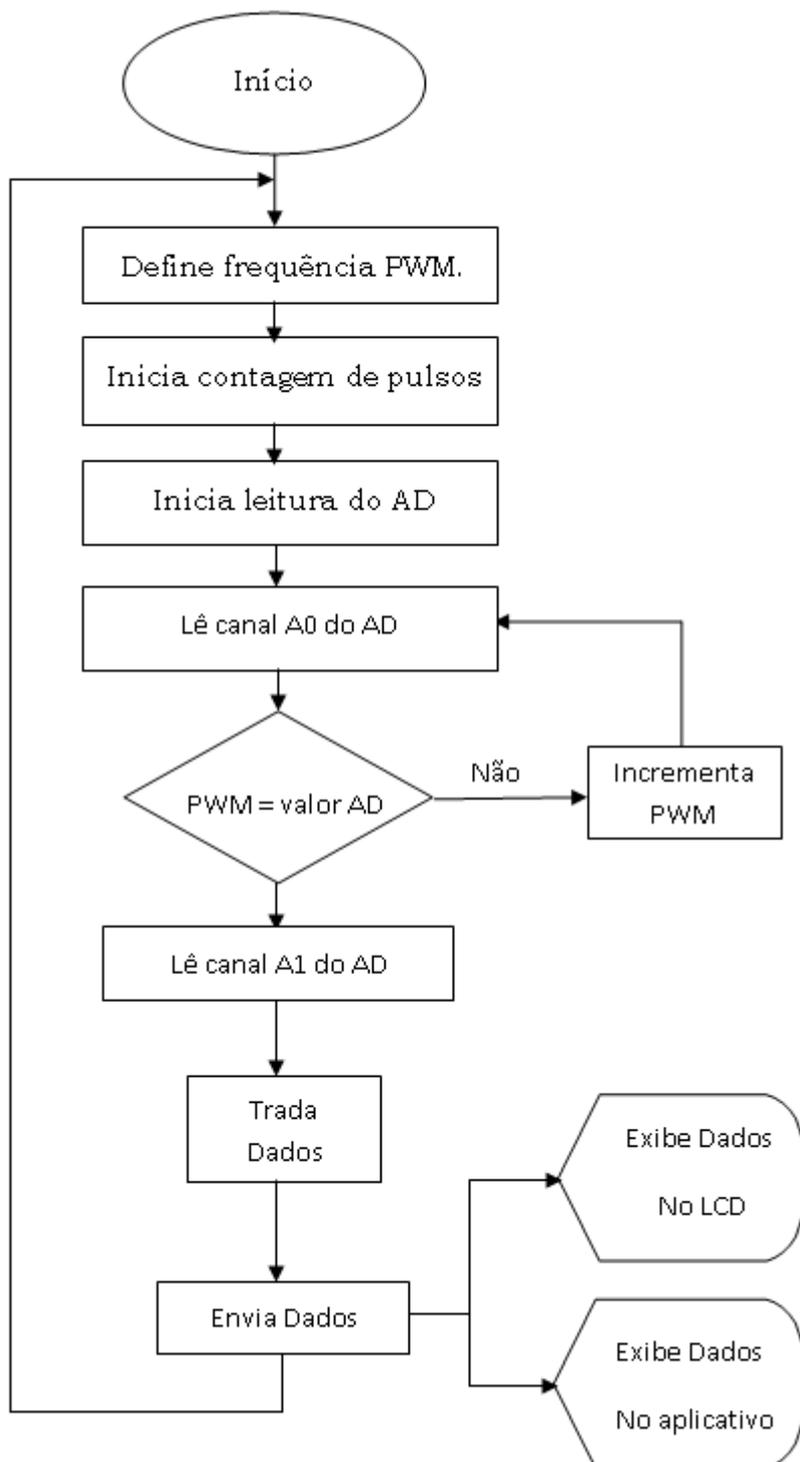


Figura 3.9 – Fluxograma do *Software*

3.4. Descrição do Aplicativo Supervisório

Para a visualização dos resultados e no controle da máquina foi desenvolvido um aplicativo supervisório Elipse SCADA com uma versão DEMO.

3.4.1. Sobre o Elipse SCADA

Neste item se observará a tela desenvolvida para o aplicativo, as configurações dos *driver* e configurações dos *tags*.

Tela de Supervisão

A tela de supervisão implementada nesse projeto apresenta os elementos gráficos de animações e botões de controle para acionamento da máquina que possuem em sua essência, métodos de configuração e atribuição aos *tags*. Nesses objetos para se conseguir estados em concordância com o valor adquirido do *tag* é de fundamental importância, a personalização de seus eventos em suas ocorrências relacionadas a esses objetos. Esses eventos podem ser físicos ou internos. Na Figura 3.10 podemos visualizar a tela do aplicativo implementada.

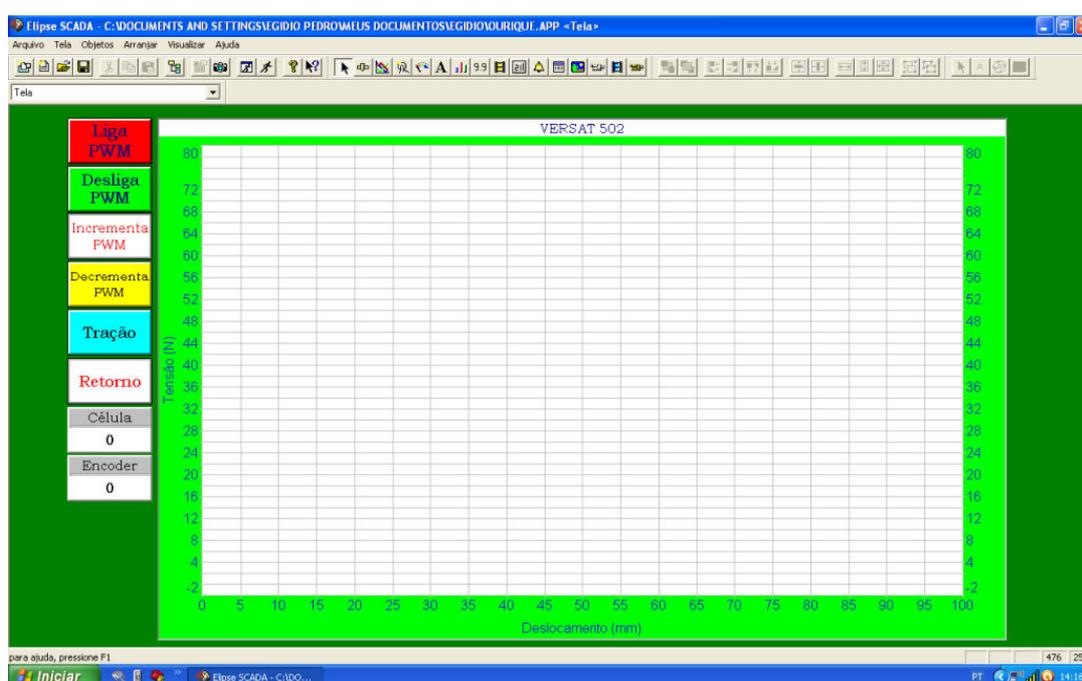


Figura 3.10 – Tela do Aplicativo Elipse SCADA

Configuração do Driver

As informações vindas do microcontrolador pela entrada serial do computador necessitam de um componente que complemente a capacidade de

trabalho do Elipse SCADA, para estabelecer uma eficiente comunicação com o MAX232 e fazer a decodificação dos caracteres ASCII ou binário. Esse componente utilizado foi o *driver* RS232.DLL versão 1.02. A Figura 3.11 demonstra o uso desse componente no Elipse SCADA.

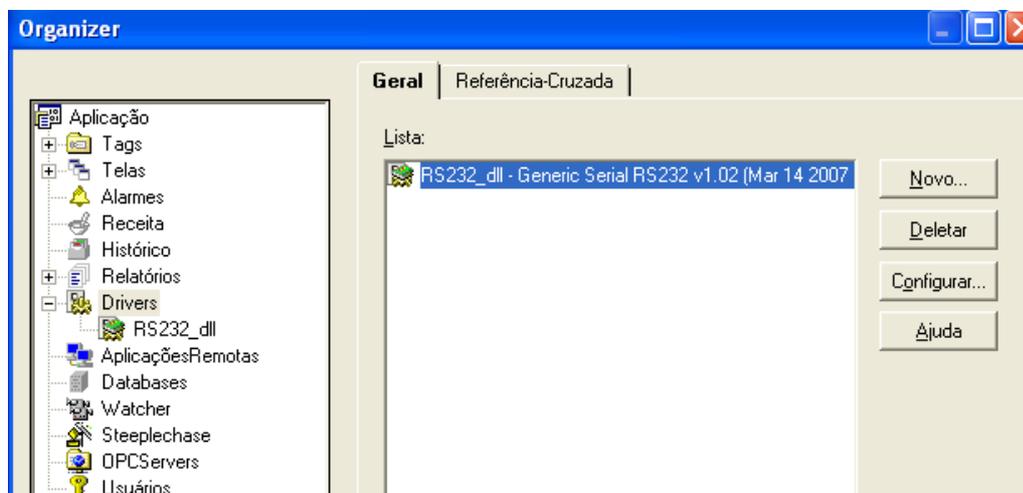


Figura 3.11 - *Driver* RS232.dll Implantado no Elipse SCADA.

Para ser feita a comunicação pela entrada serial é necessário configurar esse *driver* com os parâmetros que governam o funcionamento na troca de mensagens entre dispositivos, os valores configurados nos parâmetros P que definem: porta de comunicação, taxa de transmissão, valor do tamanho do caractere, paridade e bits de parada paridade e intervalo de tempo do *time-out*, em milissegundos estas aplicações são demonstradas conforme Figura 3.12.

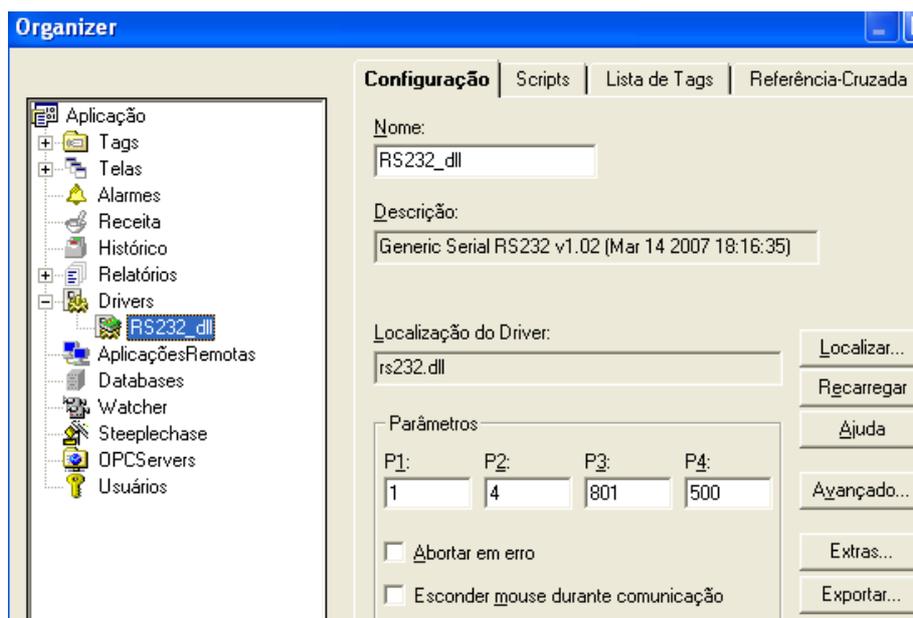


Figura 3.12 - Configuração dos Parâmetros no Elipse SCADA.

Deve-se lembrar de que essas configurações essencialmente têm que estar em conformidade, com os parâmetros de comunicação de dados dos microcontroladores, observar as diretivas “#use rs232” definidas nas diretivas do compilador PCW.

Devido à diversidade de comandos que podem ser enviados aos equipamentos, é necessária que seja declarado no diálogo “Extras” do *driver* uma lista dos comandos a serem enviados e o modo como será interpretado o dado de retorno deste comando. Onde *[SendCommands]*, *[ReceiveResponse]* e *[End]* são obrigatórios e delimitam as seções do arquivo. A seção *[SendCommands]* especifica os comandos que serão utilizados; o primeiro terá índice 1, segundo índice 2, etc. Estes índices servem para identificar o comando no parâmetro N1 dos *tags* PLC. A seção *[ReceiveResponse]* lista o modo de interpretação dos dados retornados: o primeiro parâmetro indica o total de *bytes* a ser retornado pelo equipamento, o segundo parâmetro indica o ponto inicial no qual devem ser retornados os dados para a *tag* PLC e o terceiro parâmetro indica quantos *bytes* devem ser retornados a partir do ponto inicial para a *tag* PLC. Na Figura 3.13 podemos verificar essas configurações dos comandos definidas para o projeto.

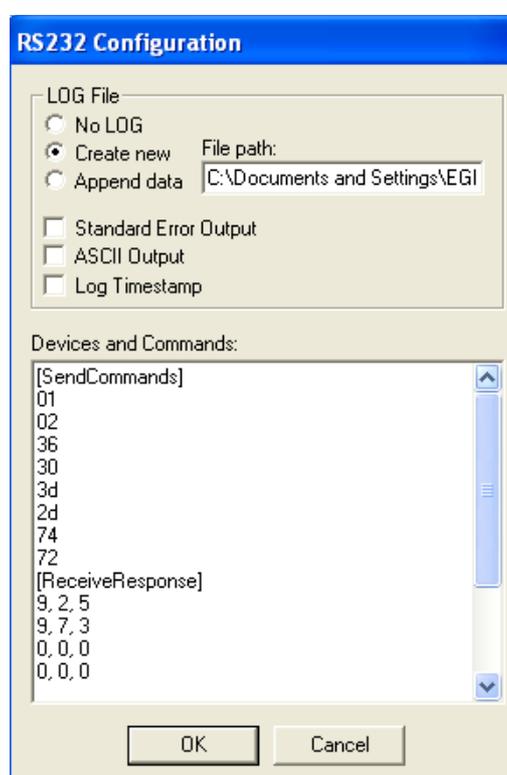


Figura 3.13 – Tela de Configuração dos Parâmetros Extras

Configuração dos TAGS

Após ter definido a configuração do *driver* do supervisório, a próxima etapa a ser estabelecida diz respeito à criação dos *tags* do supervisório. *Tag* é um elemento que está associado diretamente ao valor de uma variável do processo em que se está trabalhando.

Na Figura 3.14 podemos visualizar os *tags* criados para o aplicativo desenvolvido.

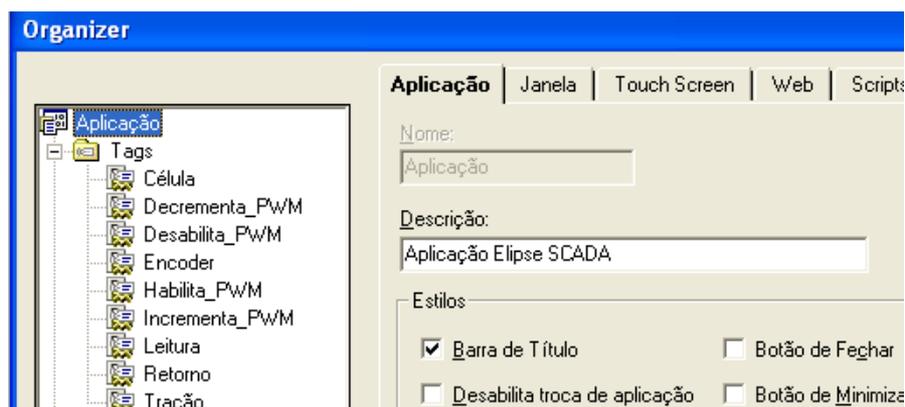


Figura 3.14 - Tags Criados para o Aplicativo.

Cada *tag* tem uma função específica a desempenhar. Os *tags* tipo PLC, que tem como característica a troca de informações entre dispositivos são definidos através dos parâmetros N onde são configurados os parâmetros de endereçamento referentes a índice de comando na lista de comando, formato de envio de comando, formato de retorno e quantidade de dados a serem lidos.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Metodologia dos Testes Integrados no Sistema Físico

Para o conhecimento das incertezas, das medidas realizadas no deslocamento do eixo da máquina, da força de tração mecânica e, assim, comprovar a confiabilidade e a validação dos resultados foi adotado o nível de confiança (Z) de 95% ($Z=2,0$) e o desvio padrão (σ), ou incerteza, variável de acordo com as medidas. Isolando n na equação (2.22) se obtém a equação (4.1):

$$n = \left(\frac{Z\sigma}{\Delta}\right)^2 \quad (4.1)$$

A partir desta equação é possível determinar o número de amostras necessárias para atingir o nível de confiança estabelecido. Considerou-se como desvio médio (Δ) aceito $\pm 5g$ para a célula de carga de 50kg e $\pm 0,05mm$ para o deslocamento.

Para determinação da tensão mecânica se utilizou padrões de pesos e com eles foram estabelecidas os seguintes valores de 1000g, 5500g e 9500g. Com os pesos foram realizadas as medidas para alcançar o nível de confiança. A aferição foi realizada com a célula de 50 kg somente, em função de a célula de carga para 500kg estar com uma deformação plástica e não é possível sua utilização para ensaios mecânicos, seu uso só é possível para fins didáticos em aula.

A seguir serão mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2 os resultados obtidos nas medidas. Especificamente, a Tabela 4.1 ilustra as medidas realizadas para determinação da incerteza das informações de força e a Tabela 4.2 ilustra as medidas realizadas para determinação da incerteza das medidas de deslocamento.

Tabela 4.1 – Representação das Medidas de Força

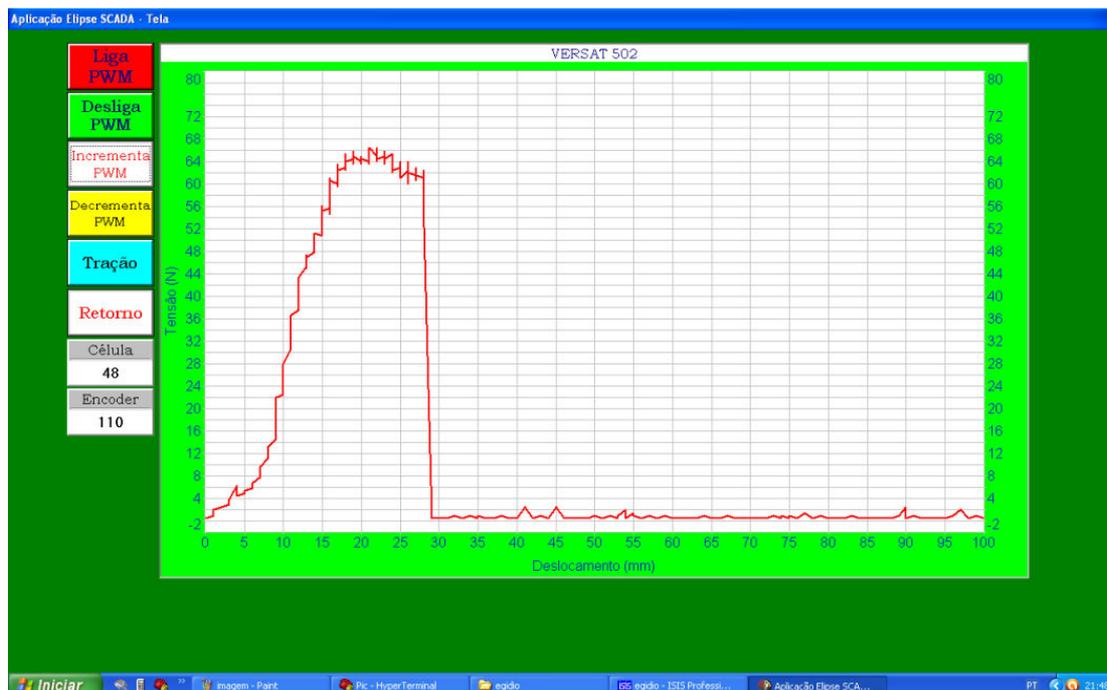
Medidas	Teste para 1000g	Teste para 5500g	Teste para 9500g
1	998	5509	9493
2	995	5503	9492
3	1012	5496	9497
4	1007	5492	9506
5	994	5507	9503
6	996	5512	9511
7	1010	5509	9509
8	995	5501	9495
9	1005	5496	9507
10	1013	5497	9509
Incerteza (mm)	7,68	6,84	7,27
Incerteza (%)	0,77%	0,12%	0,08%
Nº de medidas (n)	10	8	9
Confiabilidade Real	2,06	2,07	2,06

Tabela 4.2 - Representação das Medidas de Deslocamento.

Medidas	Teste para 14 mm	Teste para 28 mm	Teste para 42 mm
1	14,28	28,54	42,32
2	14,24	28,55	42,31
3	14,26	28,57	42,36
4	14,23	28,59	42,34
5	14,27	28,58	42,33
6	14,25	28,69	42,28
7	14,22	28,56	42,32
8	14,29	28,54	42,35
9	14,2	28,56	42,36
10	14,26	28,56	42,34
Incerteza (mm)	0,03	0,04	0,02
Incerteza (%)	0,20%	0,16%	0,06%
Nº de Medidas (n)	2	4	2
Confiabilidade Real	2,54	2,28	2,862992

4.1.1. Testes de Funcionamento

Para o teste de funcionamento se tracionou um corpo de prova para fins de comprovação do funcionamento do sistema implementado. Com a constatação de que o sistema estava funcionando passou-se a medição dos resultados. A curva obtida do resultado de teste de funcionamento pode ser visualizada conforme Figura 4.1



4.2. Resultados

Para avaliação do funcionamento se utilizou um corpo de prova de polímero disponível no laboratório no formato e dimensões conforme normativa ASTM D638 fornecido pelo professor responsável pela disciplina de materiais do curso de Engenharia Mecânica. A Figura 4.2 apresenta o corpo de prova.



Figura 4.2 – Corpo de Prova Utilizado

No teste, a velocidade de deslocamento foi fixada em 3,5mm/min. Através da Figura 4.3, observa-se o comportamento característico do polímero quando submetido à tração. Para esta curva os dados foram cedidos pela coordenação da pós-graduação da Engenharia Mecânica e Materiais.

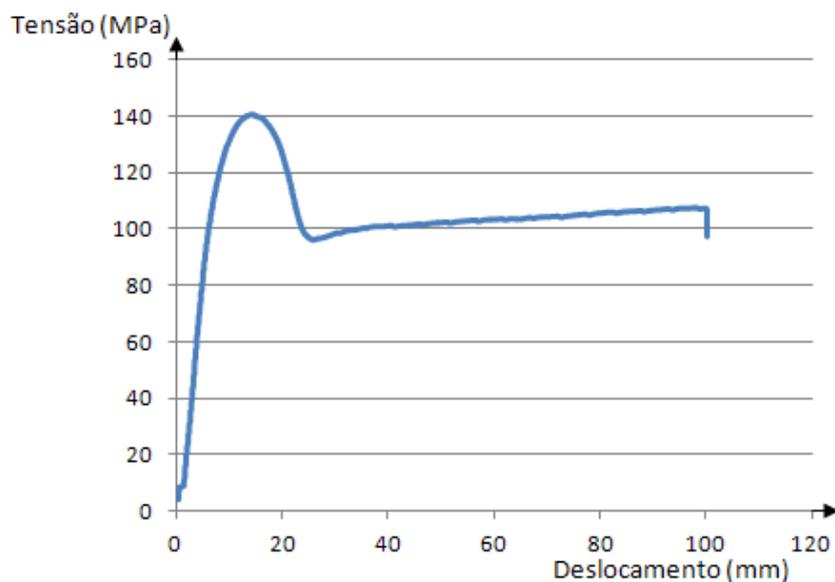


Figura 4.3 – Curva característica de um Polímero.

Na Figura 4.4 observa-se a medição feita no sistema implementado. Pode-se ver que o sistema está fazendo a medição de acordo com o que é uma curva característica deste tipo de polímero, baseado na figura padrão.

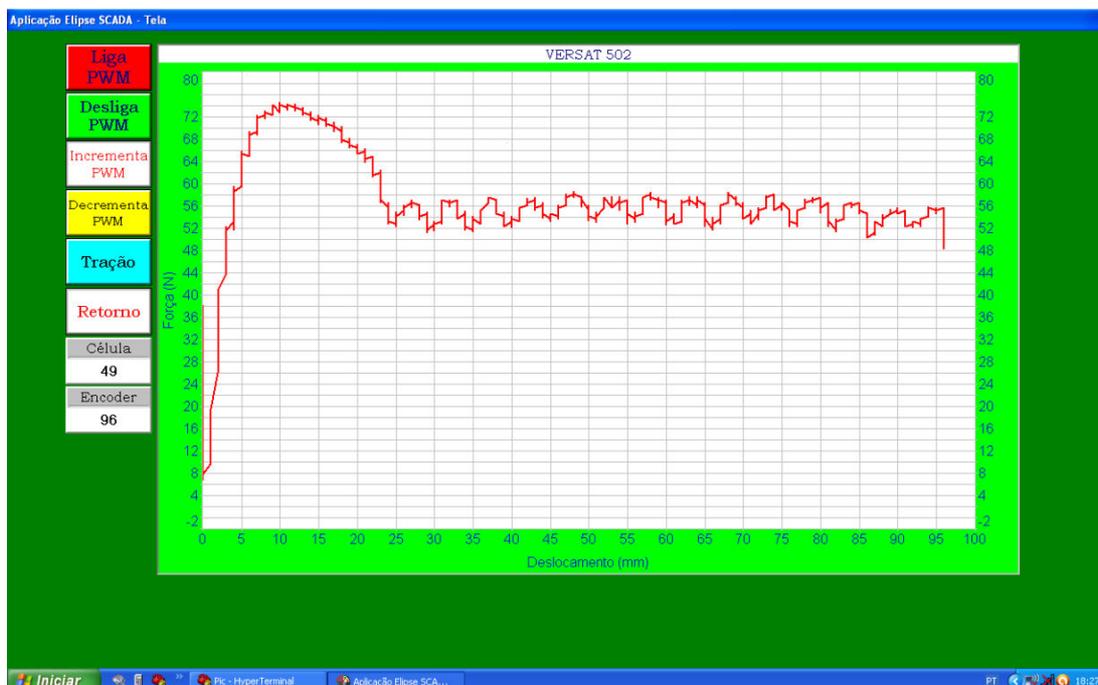


Figura 4.4 – Curva obtida no Ensaio de Tração.



Os ruídos que são observados na curva obtida no ensaio de tração são em função do conversor AD do microcontrolador utilizado. As ondulações também percebidas na curva são o efeito transitório do alongamento do material na fase de deslizamento das discordâncias e no encruamento do material até seu alongamento total onde ocorre a ruptura. Esse efeito transitório do comportamento do material pode se obter uma novo traçado através de uma mediana.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o desenvolvimento deste projeto foram necessários conhecimentos em varias áreas da engenharia elétrica como *software* e *hardware* de eletrônica analógica, digital e de potência, além de automação, devido à programação do aplicativo SCADA.

O objetivo principal deste trabalho, que consiste em modernizar o sistema de controle e supervisão, existentes na máquina de ensaios mecânicos, foi alcançado. Com o novo sistema a máquina ficou funcional novamente e, como o projeto ficará na Universidade, a manutenção poderá ser feita pelos próprios técnicos da instituição. Contudo, o uso da máquina para ensaios mecânicos com a célula de carga de 500 kg ficou comprometido em função da célula apresentar uma deformação plástica, assim sendo, só poderá ser usada para fins didáticos.

A implementação do aplicativo supervisorio Elipse SCADA atendeu o objetivo proposto neste projeto. Permitiu a visualização dos dados envolvidos no processo e a interface entre o *software* de controle do microcontrolador e o usuário.

Quanto ao controle da velocidade do motor para o deslocamento do eixo da máquina, através da variação do *duty cycle* do período do PWM, pode-se concluir que está de acordo com o esperado. A partir do aplicativo computacional pode-se alterar a velocidade de forma mais fina do que se fazia com o sistema antigo de controle.

O microcontrolador utilizado não foi uma boa escolha em função da resolução dos canais analógicos, 10 bits. Em função desta resolução, na apresentação dos dados provenientes da célula de carga observa-se uma variação na conversão, comprometendo a incerteza dos resultados provenientes da célula de carga.

Como alterações para próximos trabalhos, sugere-se a troca do microcontrolador por um com uma maior resolução para tratar os dados analógicos. Também a substituição da célula de carga de 500 kg por uma



equivalente, para que possam ser realizados ensaios mecânicos de tração com a capacidade máxima da máquina. Além de melhorias na interface de apresentação gráfica. Isto será obtido com auxílio de um expert da área de materiais.



6. REFERÊNCIAS

- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. – Instrumentação e Fundamentos de Medidas – Volume 1 – 1ª Ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- BECK, JOÃO CARLOS PINHEIRO. - Projeto, Construção e Análise de Células de Carga de Placa e de Anel, 1983.
- BURR - BROWN – Datasheet INA125 – Estados Unidos, 1996.
- CALLISTER, WILLIAM D. Jr. Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução - 7ª Ed. – Quebecor Versailles, 2007.
- ELIPSE. .Manual do *Driver RS232.dll*. Disponível em www.elipse.com.br. Acessado em 20 de setembro de 2011.
- ELIPSE. Manual do Elipse SCADA. Disponível em www.elipse.com.br. Acessado em 20 de setembro de 2011.
- FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. – Máquinas Elétricas – 6ª Ed. – GARCIA, AMAURI; SPIM, JAIME ALVARES; SANTOS, CARLOS ALEXANDRE DOS – Ensaio dos Materiais – Rio de Janeiro: LTC 2008.
- PEDRO URBANO BRAGA DE ALBUQUERQUE; AUZUIR RIPARDO DE ALEXANDRIA – Redes Industriais – 2ª Ed. – São Paulo: Ensino Profissional, 2009.
- PEREIRA, FÁBIO. – Programação em C – 2ª edição - São Paulo: Érica, 2003. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- SOUZA, DAVID JOSÉ DE; LAVINIA, NICOLÁS CÉSAR – Conectando o PIC – 3ª Ed. – São Paulo: Érica, 2002.
- SOUZA, SÉRGIO AUGUSTO DE. – Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos – 5ª Ed. – São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- SPINARDI, MARCELO AUGUSTO. - Projeto Otimizado de Células de Carga Extensométricas, 2006.



APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE

```
#include <16f877A.h> // identifica microcontrolador alvo

#device adc=10

#use delay(clock=4000000) // <- define cristal para 4Mhz.

#fuses XT,NOWDT, PUT, NOBROWNOUT, NOPROTECT, NOLVP,
NOCPD,NOWRT, DEBUG

#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7)

#include <LCD.C> // biblioteca LCD

long rpm,rpmr,tracao,retorno=0;

float celula=0;

long int conta,Conta_encoder=0;

unsigned int teste=0;

short direcao=1;

void Encoder(void); // Declaracao da funcao utilizada na interrupção de
RB0 utilizada no fim do Programa.

void main ()
{
    int16 valor; //leitura de temperatura
    int16 control, ciclo; //valor do PWM, setpoint
    float a,b,c; //constantes do PID
    float rT,eT,iT,dT,yT,uT,iT0,eT0,iT_1,eT_1; //variaveis das equações
    float max,min; //limites máximo e mínimo de controle.
    min=0.0; //inicialização das variaveis
    max=100.0;
    iT_1=0.0;
    eT_1=0.0;
```



```
a=0.1243;           //constantes do PID

b=0.0062;

c=0.6215;

setup_port_a( ALL_ANALOG );

setup_adc( ADC_CLOCK_INTERNAL );

lcd_init();

setup_CCP1(CCP_PWM); // configura CCP1 para o modo PWM
setup_CCP2(CCP_PWM); // configura CCP1 para o modo PWM
set_pwm1_duty ( 0 ); // configura o ciclo ativo em 0 (desligado)
set_pwm2_duty ( 0 ); // configura o ciclo ativo em 0 (desligado)
setup_timer_2 (T2_DIV_BY_16, 255, 1); //define frequência PWM
enable_interrupts(GLOBAL);
enable_interrupts(INT_EXT);
set_tris_b(0b00000001); // configura Pino B0 como entrada.
ext_int_edge(L_TO_H); // Configura o início da interrupção pela borda de
subida. Sinal de Baixo para Alto.

while (true)
{
    if (kbhit() // se uma tecla for pressionada
    {
        teste = (getc()); // verifica a tecla
        switch(teste)
        {
            case '1':printf("%3.0f", celula);

                break;

            case '2' :printf("%03lu", rpm);

                break;

            case '6' : ciclo = 100;
```



```
        break;

    case '0' : ciclo = 0;

        break;

    case '-' : ciclo -= 10;

        break;

    case '=' : ciclo += 10;

        break;

    case 'r' : direcao= 0;

        break;

    case 't' : direcao= 1;

        break;

    }

}

set_adc_channel(0);

delay_us(20);

valor=read_adc(); //Leitura da temperatura

yT=valor;

rT=ciclo; //setpoint

eT=rT-yT; //Cálculo erro

iT=b*eT+iT0; //Cálculo do termo integral

dT=c*(eT-eT0); //Cálculo do termo derivativo

uT=iT+a*eT+dT; //Cálculo de saída PID

if (uT>max) { //Saida PID se e maior que o MAX

    uT=max;}

else {

    if (uT<min){ //Saida PID se e menor que o MIN

        uT=min;}
```



```
    }

    control=uT + ciclo; //Transferencia de saida PID ao sinal PWM

    iT0=iT;           //Guardar variaveis

    eT0=eT;

    set_adc_channel(1);

    delay_us(20);

    celula = Read_ADC();

    celula=(50000*(celula + 1))/1024;

    delay_ms(300);

    tracao=control; // controlador do duty ciclo

    retorno=control;// controlador do duty ciclo

    if (ciclo >1023) ciclo = 1023;

    if (input(PIN_C4)) tracao=0;

    if (input(PIN_C3)) retorno=0;

    if (input (PIN_C3)) rpm=0;

    if (direcao)

    {

    conta=0;

    rpm=conta_encoder * 0.005;

    setup_ccp2(CCP_OFF);

    printf(lcd_putc,"RPMT:%03lu  %04lu", rpm, conta_encoder);

    printf(lcd_putc,"\nKgf:%5.0f  %x", celula,teste);

    lcd_gotoxy(1,1);

    //printf("\r%5.0f%03lu", celula, rpm);

    setup_ccp1(CCP_PWM); // ativa PWM1 (pino C2)

    set_pwm1_duty(tracao);
```



```
    }  
    else  
    {  
        conta_encoder=0;  
        setup_ccp1(CCP_OFF);  
        printf(lcd_putc, "Retorno  %04lu", valor);  
        printf(lcd_putc, "\nKgf:%5.0f  %x", celula, teste);  
        lcd_gotoxy(1,1);  
        setup_ccp2(CCP_PWM); // ativa PWM2 (pino C1)  
        set_pwm2_duty(retorno);  
    }  
}  
}  
#int_ext  
void Encoder()  
{  
    Conta_encoder++;  
}
```