



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



FEB – Faculdade de Engenharia de Bauru

Departamento de Engenharia Mecânica

Campus de Bauru

ESTUDO COMPARATIVO DE MEDIÇÃO DE FORÇA DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

PATRIK NASCIMENTO LANÇONI

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP – Campus de Bauru,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica**

Bauru, SP – Janeiro de 2008



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



FEB – Faculdade de Engenharia de Bauru

Departamento de Engenharia Mecânica

Campus de Bauru

ESTUDO COMPARATIVO DE MEDIÇÃO DE FORÇA DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

PATRIK NASCIMENTO LANÇONI

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP – Campus de Bauru,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica**

Bauru, SP – Janeiro de 2008



Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais.



Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha existência.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pela orientação e pela inestimável amizade.

Aos meus pais, Antonio Roberto Lançoni e Terezinha de Jesus Nascimento Lançoni, que sempre me apoiaram em tudo. Aos meus irmãos Betanio e Geisla.

Ao Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni, pelas inestimáveis contribuições durante as simulações. Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, coordenador do Laboratório de Usinagem por Abrasão. Ao Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, por ter cedido os aparelhos para medição da força de corte. Ao Prof. Dr. Yukio Kobayashi, coordenador do curso de pós graduação quando me ingressei.

Aos colegas de laboratório.

À minha namorada Priscila Moraes Magalhães.

A todos meus amigos, em especial a Bruno Milhoci, Wesley Fernando Usida, Maurício Kenji Imai, Maurício Khenafes, Bruno Fernandes Angelucci, Valéria Rocha, Wellington Allan Hirose e Renata Santos.



Índice

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO.....	2
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. CONCEITOS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	5
2.2.1. Características do Processo de Retificação	6
2.2.2. Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação do Tipo Tangencial Plana.....	8
2.2.3. Operação de Dressagem.....	16
2.3. INVERSORES DE FREQUÊNCIA	18
2.3.1. Inversor Paralelo Monofásico	18
2.3.2. Inversores Trifásicos	19
2.4. MOTOR DE INDUÇÃO	21
2.4.1. A transformação para as Variáveis DQ.....	22
2.4.2. Circuito Equivalente	27
2.4.3. Perdas do Motor de Indução	29
2.5. SIMULAÇÃO.....	32



2.5.1. Programa Simulink/Matlab.....	33
2.6. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	34
2.6.1. Introdução	34
2.6.2. Processamento de Sinais.....	35
2.6.3. Monitoramento da Força e Potência.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. INTRODUÇÃO	41
3.2. ESCOLHA DO TIPO DE OPERAÇÃO DE USINAGEM	42
3.3. REBOLO	43
3.4. PEÇAS DE TRABALHO	43
3.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA	44
3.6. MEDIÇÃO DAS CORRENTES E TENSÕES ELÉTRICAS.....	44
3.6.1. Calibração.....	49
3.7. MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO REBOLO	50
3.8. MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE	52
3.9. FLUIDO DE CORTE	53
3.10. PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	54
3.11. SOFTWARE PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS	54
3.12. MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIOS	57
3.13. OPERAÇÃO DE DRESSAGEM	60
3.14. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DA MESA.....	61
3.15. OPERAÇÃO DE RETIFICAÇÃO	62
3.16. PROCESSAMENTO DOS DADOS	62
3.17. SIMULAÇÕES	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5. CONCLUSÕES	80
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82



ANEXO I - ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**RESPONSÁVEL PELO ACIONAMENTO DO REBOLO DA RETIFICADORA PLANA UTILIZADA ...87****ANEXO II ROTINAS CRIADAS NO MATLAB.....89**



Índice de Figuras

Figura 1 - Retificação Cilíndrica Externa (MALKIN, 1989).....	5
Figura 2 - Retificação Plana (MALKIN,1989).....	6
Figura 3 Formação do cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de Boothroyd & Knight, 1989)	7
Figura 4 Variáveis de entrada e saída para máquinas e processos de retificação (Adaptado de KING & HAHN, 1986).....	9
Figura 5 Espessura de corte equivalente para uma operação tangencial plana do tipo pendular (AGUIAR, 1997).....	11
Figura 7 Componentes de força para retificação plana	13
Figura 8 Processo de Dressagem do Rebolo.....	17
Figura 9 Inversor Monofásico	19
Figura 10 Inversor Trifásico	20
Figura 11 Enrolamento Trifásico do Estator com o Correspondente DQ (AGUIAR, 1990).....	23
Figura 12 Enrolamento Trifásico do Rotor Com o Correspondente DQ	25
Figura 13 Representação Esquemática do Motor de Indução para o Modelo DQ	26
Figura 14 Circuito Equivalente do Motor Para uma Fase	28
Figura 15 Esquema dos Equipamentos	41
Figura 16 Retificadora Plana Utilizada nos Ensaios.....	43
Figura 17 Inversores Utilizados	44
Figura 18 Sensor Hall Utilizado na Medição da Corrente Elétrica.....	45
Figura 19 Sensor de Tensão	46
Figura 20 Diagrama dos Módulos dos Sensores.....	47
Figura 21 Diagrama do Módulo Condicionador de Sinais da Corrente e Tensão	48
Figura 22 Módulo Curvopower2 Utilizado nos Ensaios	49



Figura 23 Encoder Acoplado ao Motor.....	51
Figura 24 Módulo para Aquisição da Velocidade	51
Figura 25 Dinamômetro Utilizado nos Ensaios e seu Condicionador de Sinais	52
Figura 26 Bocal do Fluido de Corte.....	53
Figura 27 Interface gráfica do programa de aquisição de dados.....	55
Figura 28 Diagrama do Programa de Aquisição de Dados	56
Figura 29 Equipamentos de Aquisição de Dados	58
Figura 30 Corpo de prova fixado ao dinamômetro.....	59
Figura 31 Processo de Retificação	60
Figura 32 Ajuste da Velocidade Tangencial da Mesa	61
Figura 33 Diagrama da Simulação.....	64
Figura 33 Parâmetros do Motor inseridos no Simulink.....	66
Figura 34 Formas de Onda Medidas Antes do Inversor para 60Hz.....	67
Figura 35 Formas de Onda Medidas Depois do Inversor.....	68
Figura 36 (a) Sinais de força perpendicular, tangencial e normal, todos em (N); (b) Sinais de velocidade (rad/s), potência elétrica (W) e potência mecânica (W).....	69
Figura 37 Comparação Entre Potências Elétricas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 50Hz.....	72
Figura 38 Comparação Entre Potências Elétricas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 60Hz.....	72
Figura 39 Comparação Entre Potências Elétricas Simuladas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 50Hz.....	74
Figura 40 Comparação Entre Potências Elétricas Simuladas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 60Hz.....	74
Figura 41 Potências Elétrica e Mecânica em função da profundidade (50 Hz).....	75



Figura 42	Potências Elétrica e Mecânica em função da profundidade (60 Hz).....	76
Figura 43	Rendimento do Sistema em Função da Profundidade de Corte para 50Hz e 60Hz	77
Figura 44	Rendimento do Sistema Simulado em Função da Profundidade de Corte para 50Hz e 60Hz.....	78



Lista de Abreviaturas e Símbolos

a – profundidade de corte	[μm]
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	
a_d - penetração de dressagem	[μm]
b - largura de retificação	[mm]
b_d - largura de atuação do dressador	[mm]
b_s ou LR – largura do rebolo	[mm]
CBN – Nitreto Cúbico de Boro	
CNC – Comando Numérico Computadorizado	
d_e - diâmetro de equivalente	[mm]
d_s - diâmetro do rebolo	[mm]
d_w - diâmetro da peça	[mm]
f – frequência da tensão	[Hz]
F_n - força normal de corte	[N]
F_t - força tangente de corte	[N]
G – Relação entre volume retificado e desgaste do rebolo	[-]
h_{eq} - espessura equivalente de corte	[μm]
$h_{m\acute{a}x}$ – espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
h' – profundidade de corte crítica	[μm]
l_c - comprimento de contato	[mm]
L – espaçamento médio entre grãos abrasivos	[μm]
n – rotação do rebolo	[rpm]
P – potência de corte na retificação	[W]
Q_w – taxa de remoção	[mm^3/s]
Q'_w – taxa de remoção por unidade de largura	[mm^2/s]
Ra – Rugosidade média	[μm]
RMS – Raiz Média Quadrática (Root Mean Square)	
RPM – Rotações Por Minuto	
S_d - passo de dressagem	[mm]
u - energia específica de retificação	[J/mm^3]
u_{ch} - energia referente à formação do cavaco	[J/mm^3]
U_d - grau de recobrimento de dressagem do rebolo	[-]
u_{pl} - energia de deslocamento de material por deformação plástica	[J/mm^3]
u_{sl} - energia de deslizamento grão-peça	[J/mm^3]
V_{AV} – tensão média	[V]
V_f - velocidade de mergulho	[m/s]
V_s - velocidade de corte do rebolo	[m/s]
V_{sd} - velocidade de dressagem	[m/s]
V_w - velocidade periférica da peça	[m/s]
μ_X – média das amostras	[unidade]
σ_X – desvio-padrão das amostras	[unidade]



Resumo

Os processos de usinagem são de extrema importância no ramo da indústria metalúrgica, uma vez que quase todas as peças de metais em que se exige uma alta precisão e qualidade no acabamento são produzidas por meio destes processos. Dentre os processos de usinagem destaca-se o processo de retificação, por sua precisão e bom acabamento. É essencial que se conheça bem este processo, já que por ser a última etapa da manufatura, qualquer problema compromete a peça e perde-se o trabalho realizado em todas as etapas anteriores. O presente trabalho visa um estudo comparativo entre a força de corte na retificação medida com um dinamômetro piezelétrico e a potência elétrica do motor que aciona o rebolo. A força de corte é reconhecida como sendo a principal variável de estudos dos processos de usinagem. Tradicionalmente a força de corte é tomada por meio de um dinamômetro, porém este é um dispositivo relativamente caro e de difícil montagem. Usualmente, a força no processo de retificação é tomada por meio de um sensor de corrente, obtendo-se um sinal analógico proporcional à potência consumida pelo motor. Entretanto, esta potência não corresponde à potência mecânica utilizada no corte, e, portanto, imprecisões ocorrem. Neste trabalho, os sinais de potência elétrica e força de corte foram coletados com alta taxa de aquisição, com variações da profundidade de corte e da frequência do motor que aciona o rebolo. Os resultados obtidos mostraram que os sinais de potência elétrica do motor que aciona o rebolo sempre foram proporcionais aos sinais de força de corte. Desta forma, é possível substituir o dinamômetro na retificação por sensores de corrente e tensão, com resultados confiáveis.



Abstract

The machining processes are of great importance in the metallurgical industry, since all the metal workpieces demanding high precision and finishing quality are produced through these processes. Among the machining processes the grinding process can be highlighted by its precision and superior finishing. As being the last manufacturing stage, it is very important to have sound knowledge of the grinding process because minor problems can jeopardize the ground part, and then all the previous manufacturing operations will also be lost. This work aims at comparing the cutting force between the one measured through a piezoelectric dynamometer and that one measured by electrical power of the induction motor that drives the grinding wheel. The cutting force is acknowledged as being the most important variable for studying the machining processes. Traditionally, the cutting force is taken by a piezoelectric dynamometer, which is relatively expensive equipment besides requiring a nontrivial setup. Generally, the cutting force in the grinding process is taken by a Hall Effect current sensor to produce an analog signal proportional to the power consumed by the electric motor. However, that power does not correspond to the mechanical power used to grind, and thus imprecision takes place. In this work, the electric power and cutting force were collected by using a high sampling rate acquisition for several cutting depths and two electrical frequencies to drives the induction motor. The results showed the electric power signals behaved, in general, proportional to the cutting force measured by the dynamometer. Thus, the Hall Effect current and voltage sensors can be replaced by the dynamometer in the grinding process with reliable results.



1. Introdução

O progresso industrial está intimamente ligado à sua capacidade de usinar ou formar materiais em formas geométricas precisas. Dentre os métodos de usinagem destaca-se o processo de retificação, por sua precisão e bom acabamento final. A retificação tem sido uma das mais importantes técnicas usadas para se obter peças de alta precisão, sendo responsável por uma considerável parcela do total de operações de usinagem nos países industrializados. Uma alta percentagem de itens manufaturados são usinados por retificação em algum estágio de seu processo de produção, ou são processados por máquinas cuja precisão é um resultado direto de operações abrasivas. Além disso, geralmente esta é a ultima etapa do processo de manufatura e qualquer problema que comprometa a peça resulta na perda de todo o trabalho realizado em nas etapas anteriores. Entretanto, o processo de retificação ainda é pouco dominado tecnologicamente quando comparado com outros processos convencionais de usinagem.

A dificuldade de se dominar o processo de retificação decorre do fato que a remoção do cavaco não ocorre da mesma forma que em outros processos de usinagem, como fresagem e torneamento. Nestas operações a ferramenta de corte possui geometria de corte definida, enquanto que na retificação a ferramenta apresenta inúmeras arestas cortantes sem que haja aresta definida, ou seja, possui geometria de corte irregular.

Devido às políticas de mercado cada vez mais globalizadas e competitivas é necessário que se tenha reduções de custos e aumento da qualidade das peças produzidas. Para tanto, deve-se adotar sistemas inteligentes, que monitoram o processo de retificação por meio de sensores em ambientes industriais, o que leva a um aumento da produção com redução das peças danificadas, resultando em um menor custo de produção.

Um problema crucial que deve ser superado para atingir a capacidade máxima de um sistema de usinagem autônomo é o desenvolvimento de sistemas eficazes de sensores



para monitorar suas operações. O sensoriamento tem se tornado de extrema importância no processo industrial, como se pode notar nas máquinas modernas, em que são encontrados sensores de diversos tipos (acelerômetros, sensores de força, balanceamento, *encoders* e sensores de velocidade e posição) (ARONSON, 1997).

A finalidade da medição das variáveis do processo de retificação é otimizar este processo com relação ao custo, produtividade, taxa de remoção do material etc. Existem muitas variáveis e fenômenos a serem medidos no processo de retificação tais como força de corte, vibração e condição da ferramenta. A detecção da força de corte é especialmente importante por uma série de razões, por exemplo: melhor acabamento na superfície e exatidão dimensional, vida da ferramenta prolongada, e melhor utilização da máquina, resultando assim, em alta produtividade (SHIRAISHI, 1989).

Dentre os parâmetros relacionados com a usinagem, a importância do monitoramento das forças de corte em usinagem é bem reconhecida em toda a comunidade científica e no meio industrial. A força de corte é o indicador mais importante do estado e da qualidade da usinagem (JEONG, 2002). Em particular, a informação da força de corte *on-line* e em tempo-real é muito útil para predizer o desgaste da ferramenta, detectar quebras, e outros danos. Muitas empresas desenvolvem diversos dispositivos para medir a força de corte em torneamento, retificação, fresamento, entre outros. (LI, 2005).

Segundo Mannan (1992), os sensores de corrente do motor constituem o método mais adequado, dentre os sensores utilizados no processo de corte, em termos de desgaste da ferramenta, levando-se em conta os custos. A maior vantagem do uso de medidas dos parâmetros do motor, como corrente e potência, para detectar defeitos no processo de corte é que os instrumentos de medida não interferem no processo de usinagem.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo o estudo comparativo entre a medição da força de corte por meio da potência e corrente elétricas do motor de acionamento do rebolo e



a medição da força por meio de um dinamômetro piezelétrico em um processo de usinagem por abrasão no processo de retificação plana tangencial. Este estudo contempla a confiabilidade de se relacionar a medida de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo com a força de corte.

1.2. Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, discorrendo sobre a importância da automação no processo de retificação e a necessidade de monitorar e controlar força de corte nesse processo, além de sintetizar os objetivos principais e os meios utilizados e desenvolvidos ao longo do trabalho.

O segundo capítulo é a revisão bibliográfica acerca do sistema de retificação. Contempla os conceitos básicos do processo, as variáveis envolvidas, motor de indução, simulação, monitoramento da força de corte e potência do motor que aciona o rebolo, e processamento de sinais.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho, a escolha do tipo de operação de retificação, materiais e rebolo empregados, o projeto de um medidor de potência, desenvolvimento de um software para aquisição de dados, montagem do banco de ensaios, dressagem do rebolo, determinação da velocidade de deslocamento da mesa da máquina e velocidade de corte, além dos ensaios realizados, processamento dos sinais, simulações e processamento de dados.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados na máquina retificadora e as simulações desenvolvidas para o processo.

O quinto capítulo apresenta as conclusões sobre os resultados do capítulo quarto, bem como as considerações finais e sugestões para futuros projetos.

A bibliografia consultada finaliza o trabalho. Como anexos estão os dados do motor trifásico que aciona o rebolo e as rotinas desenvolvidas no Matlab.



2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

A maioria dos processos de usinagem ou corte é baseada em uma superfície criada de duas dimensões, o que significa que dois movimentos relativos são necessários entre a ferramenta de corte e o material de trabalho. Estes movimentos são definidos como movimentos primários, que determinam principalmente a velocidade de corte, e o movimento de corte, que fornecem a zona de corte do material. O rebolo pode ser definido como uma ferramenta de corte de múltiplos pontos de geometria aleatória. Isso faz com que seja muito difícil seu estudo.

O monitoramento de alguns parâmetros da usinagem auxilia o operador no controle do processo, resultando em um melhor acabamento, maior vida útil da ferramenta de corte, e menores perdas de peça provocadas por fenômenos como a queima.

Dentre estes parâmetros, a importância do monitoramento das forças de corte em usinagem é bem reconhecida em toda a comunidade científica. Tanto na indústria como na pesquisa é de grande importância o conhecimento das forças de corte na usinagem. A força de corte é o indicador mais importante do estado e da qualidade da usinagem (JEONG, 2002).

Essas forças encontram aplicação no cálculo da estrutura dos mecanismos de acionamento das máquinas; permitem realizar o cálculo da potência de usinagem e a determinação do rendimento da máquina, para diferentes cargas e velocidades de trabalho. O transdutor de força é o sensor utilizado para medidas diretas de força, sendo comum a utilização de sensores piezelétricos para as medidas de força. Em particular, uma informação em tempo real e disponível para uso imediato pode ser muito útil para prever o desgaste da ferramenta, quebras, e outras inspeções de difícil verificação. Muitas companhias, como a Kistler, desenvolvem uma série de equipamentos para medidas de força de corte em torneamento, retificação e furação. Várias pesquisas vêm sendo feitas para desenvolvimento de sistemas de monitoramento usando as medidas de força. Porém, estes sensores são relativamente caros,



sendo a relação custo/desempenho muito elevada, e mesmo sendo utilizado no meio acadêmico, na indústria são raramente utilizados (LI, 2005).

2.2. Conceitos do Processo de Retificação

Para alcançar superfícies de precisão de alta qualidade e de maneira oportuna, é importante controlar o processo de retificação para criar superfícies lisas e contínuas, obtendo uma geometria com tolerâncias desejadas e minimizando os danos superficiais e internos e para a peça retificada e o rebolo. Para isto a velocidade, posição, e força devem ser controladas durante a retificação. O controle da velocidade se relaciona com a superfície final resultante, enquanto o controle posicional determina a precisão geométrica. O controle da força de retificação não apenas reduz a possibilidade de dano na peça, mas também afeta o acabamento da superfície e sua geometria. As variações na força normal durante o processo de retificação mudam a quantia de desvio no sistema, afetando adversamente a precisão posicional. As variações significantes na força também podem afetar a superfície final (KURFESS, 2001).

A operação de retificação cilíndrica externa de mergulho e plana e alguns de seus parâmetros estão ilustrados nas Figura 1 e Figura 2, respectivamente.

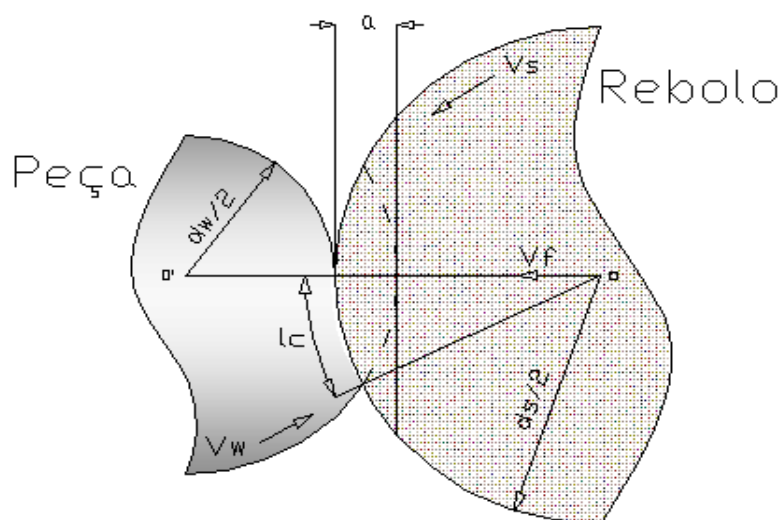


Figura 1 - Retificação Cilíndrica Externa (MALKIN, 1989)

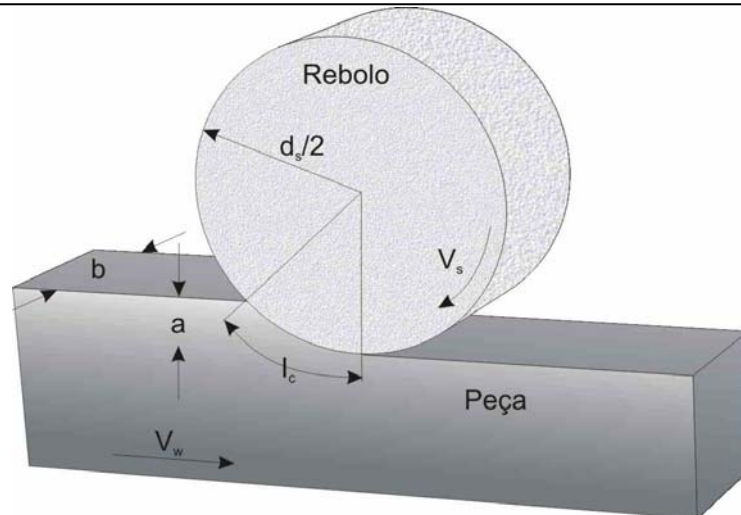


Figura 2 - Retificação Plana (MALKIN,1989)

Os parâmetros de usinagem descritos na Figura 2 são:

- b – largura da peça;
- a – profundidade de corte;
- d_s – diâmetro do rebolo;
- V_s – velocidade do rebolo;
- V_w – velocidade da mesa;
- l_c – comprimento de contato;

2.2.1. Características do Processo de Retificação

A retificação, ou usinagem por abrasão, é referida aos processos de remover material na forma de cavacos pequenos por meio da ação mecânica de grãos abrasivos dispostos irregularmente, que são aglomerados em um rebolo ou cinto abrasivo (GREEN apud HOWES, et.al., 1999)

A retificação é um processo de usinagem que consiste na remoção de material da peça mediante abrasivo. O abrasivo é constituído de grãos cortantes que removem cavacos muito pequenos de material, motivo pelo qual o acabamento da peça é melhor que o obtido por outros processos de usinagem, tais como torneamento e a fresagem.



Ao contrário dos processos de fabricação com ferramenta de geometria definida, como a fresagem e o torneamento, na retificação a remoção de cavaco é precedida por uma infinidade de arestas de corte geometricamente não definidas. Cada grão abrasivo da superfície do rebolo funciona como uma ferramenta de corte. Porém, com o agravante de que geralmente os ângulos de ataque e de corte são totalmente desfavoráveis, como pode ser observado na Figura 3. Nesta Figura a formação do cavaco por um grão abrasivo é caracterizada pelo ângulo de ataque negativo, pequeno ângulo de corte e desgaste do grão. Além disso, têm-se seções e comprimentos de cavaco variáveis e distintos (BOOTHROYD & KNIGHT apud AGUIAR, 2003).

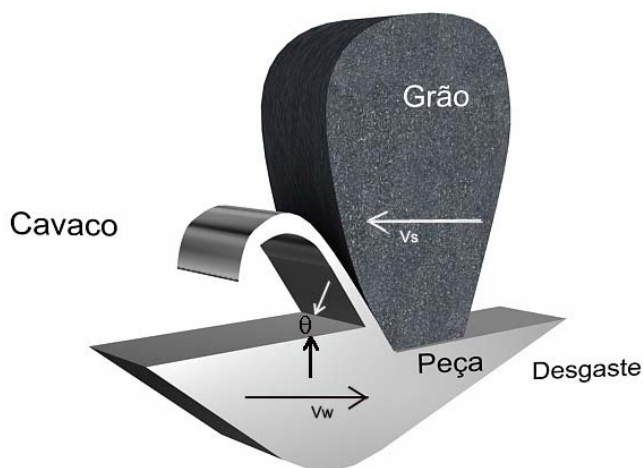


Figura 3 Formação do cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de Boothroyd & Knight, 1989)

O processo de retificação pode ser descrito como um processo de usinagem semelhante ao processo de fresamento, usando uma “fresa” com milhares de minúsculos dentes. Cada dente remove um cavaco extremamente pequeno de uma superfície da peça de trabalho (SALMON, 1992).

Existem muitos tipos de operações retificação: de desbaste e precisão; interna, externa, plana e “centerless”; utilizando-se superabrasivos ou abrasivos convencionais. Segundo King (1986), todos os tipos agem de uma maneira semelhante. Quando uma superfície abrasiva em movimento entra em contato com a peça, e se a força é alta o bastante, o material é



removido da peça e o rebolo se desgasta. Estes dois fatores sempre irão ocorrer, contudo, o nível da força determina o quão rápido as taxas de remoção de material serão, qual será a rugosidade superficial resultante, e se a peça será metalurgicamente danificada ou não. Os tópicos a seguir relatam alguns parâmetros envolvidos no processo de retificação.

2.2.2. Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação do Tipo Tangencial Plana

Segundo King & Hahn (1986), em operações de planejamento da retificação é necessário definir as entradas e saídas do processo e desenvolver relações entre elas. Para que isto seja feito é importante distinguir as variáveis de entrada da retificadora e entradas do processo de retificação que ocorrem na interação rebolo-peça. Os parâmetros de entrada típicos das máquinas retificadoras são: taxa de avanço, velocidade do rebolo, velocidade da peça, profundidade de dressagem e tempo de centelhamento (*sparkout*). As variáveis do sistema são apresentadas por meio do diagrama da Figura 4.

Nas máquinas de retificação convencionais a taxa de avanço é um parâmetro controlado. Como o rebolo interage com a peça, forças são induzidas entre a interface rebolo-peça; sendo que, quanto maior a força, maior a remoção de material. A força induzida também controla o acabamento superficial, a deflexão da máquina e o princípio do dano térmico. Portanto, a força induzida é uma das mais importantes variáveis que normalmente não são controladas nas máquinas de retificação convencionais.

A capacidade da superfície de corte do rebolo de retificação de remover material, chamada de agressividade do rebolo, também é uma variável importante no processo de retificação.



Figura 4 Variáveis de entrada e saída para máquinas e processos de retificação (Adaptado de KING & HAHN, 1986).

2.2.2.1. Comportamento da Profundidade de Corte (a)

Conforme o aumento da profundidade de corte há um aumento da temperatura, do nível de emissão acústica, da força de corte e os cavacos são mais alongados e finos.(BIANCHI, 1996)

Segundo Bianchi et al. (1996), a deflexão entre o rebolo e a peça aumenta quando a área de contato e, conseqüentemente, o número de grãos em contato com a peça aumentam. Sendo assim, a temperatura durante o processo também aumenta. Portanto, um aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de metal. Os cavacos resultantes são mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão. Desta forma, o atrito e o riscamento entre os cavacos removidos e a peça elevam a temperatura na região de corte tendo como



consequência a elevação de rugosidade, nível de emissão acústica e forças de corte normal e tangencial.

Segundo Malkin (1989), a profundidade de corte pode expressada por meio da Equação (1).

$$a = \pi \times d_w \times \frac{V_f}{V_w} \quad (1)$$

Onde a é a profundidade de corte, d_w é o diâmetro da peça, V_f é a velocidade de mergulho e V_w é a velocidade da mesa.

2.2.2.2. Comportamento da velocidade de corte (V_s)

Segundo Bianchi et. al (1996), a velocidade de corte V_s exerce uma substancial influência sobre o comportamento das forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima superficial da peça, vibrações da máquina, entre outros. Quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, o número de grãos ativos é maior e a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo, pela menor solicitação de cada grão. Em contrapartida, com aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça ocorre uma elevação da temperatura, o que pode ocasionar um dano térmico na peça. Aumentando-se a velocidade de corte com o aumento da rotação do rebolo, há um aumento da potência de corte consumida, já que esta é diretamente proporcional à rotação do eixo árvore da retificadora.

2.2.2.3. Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Representa a espessura da camada de metal arrancada. De acordo com Diniz (2001), representa fisicamente a espessura de material que os grãos removem. A espessura de corte pode ser representada pela Equação (2).

$$h_{eq} = a \frac{V_w}{V_s}$$



Onde a é a profundidade de usinagem, V_w a velocidade da peça e V_s a velocidade de corte (velocidade do rebolo).

O parâmetro h_{eq} está diretamente relacionado com o comportamento do processo de retificação em função de variáveis envolvidas como forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta, entre outros. A Figura 5 apresenta o parâmetro h_{eq} .

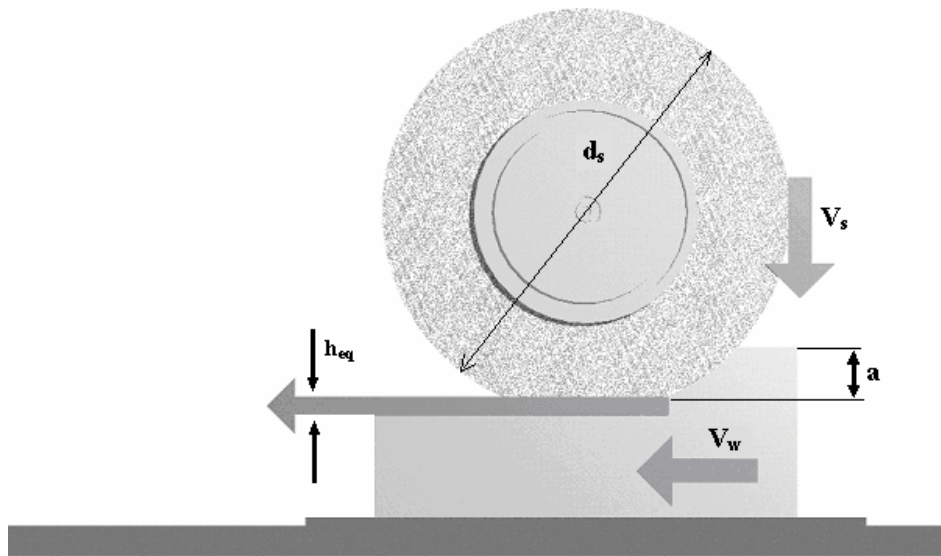


Figura 5 Espessura de corte equivalente para uma operação tangencial plana do tipo pendular (AGUIAR, 1997)

2.2.2.4. Comprimento de contato (l_c)

Segundo Malkin (1989), é um parâmetro que relaciona o comprimento de contato entre peça e o rebolo e o diâmetro equivalente, e pode ser descrito pela Equação (3)

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (3)$$



2.2.2.5. Espessura teórica máxima de cavaco ($H_{máx}$)

Segundo Bianchi (1992) a espessura teórica máxima do cavaco é diretamente proporcional ao parâmetro espessura equivalente de corte, sendo determinada pela Equação (4):

$$H_{máx} = \frac{2L}{l_c} \times h_{eq} \quad (4)$$

Onde L é o espaçamento médio entre os grãos abrasivos.

Quando a profundidade de usinagem a é aumentada, a espessura máxima do cavaco também aumenta, mas não na mesma proporção. Se a velocidade do rebolo aumenta, $h_{máx}$ diminui, as forças de corte diminuem e a vida do rebolo aumenta.

2.2.2.6. Relação G

Segundo Bianchi (1990), o parâmetro G foi definido como sendo a relação entre o volume de metal retificado e o desgaste volumétrico do rebolo. Este parâmetro é representado pela Equação (5).

$$G = \frac{Q_w}{Q_s} \quad (5)$$

Onde Q_w é o volume de metal retificado (mm^3/s) e Q_s é o volume de rebolo gasto (mm^3/s).

Esta relação caracteriza o desgaste de um rebolo sob determinadas condições de trabalho. Se o desgaste do rebolo for grande, a relação G é pequena. Isto significa que houve auto-afiação e, portanto, o rebolo permanece agressivo pela renovação dos grãos abrasivos. Se o desgaste do rebolo for pequeno a relação G é alta e, desta forma, não há liberação dos grãos gastos e o rebolo perde a agressividade pelo desgaste do topo dos grãos.

2.2.2.7. Força, Potência e Energia Específica

As forças são desenvolvidas entre o rebolo e a peça de trabalho devido à ação da retificação. Na retificação plana tangencial, o vetor de força total exercida pela peça contra o



rebolo pode ser separada em uma componente tangencial (F_t) e componente normal (F_n), conforme ilustrado na Figura 6 (MALKIN, 1999).

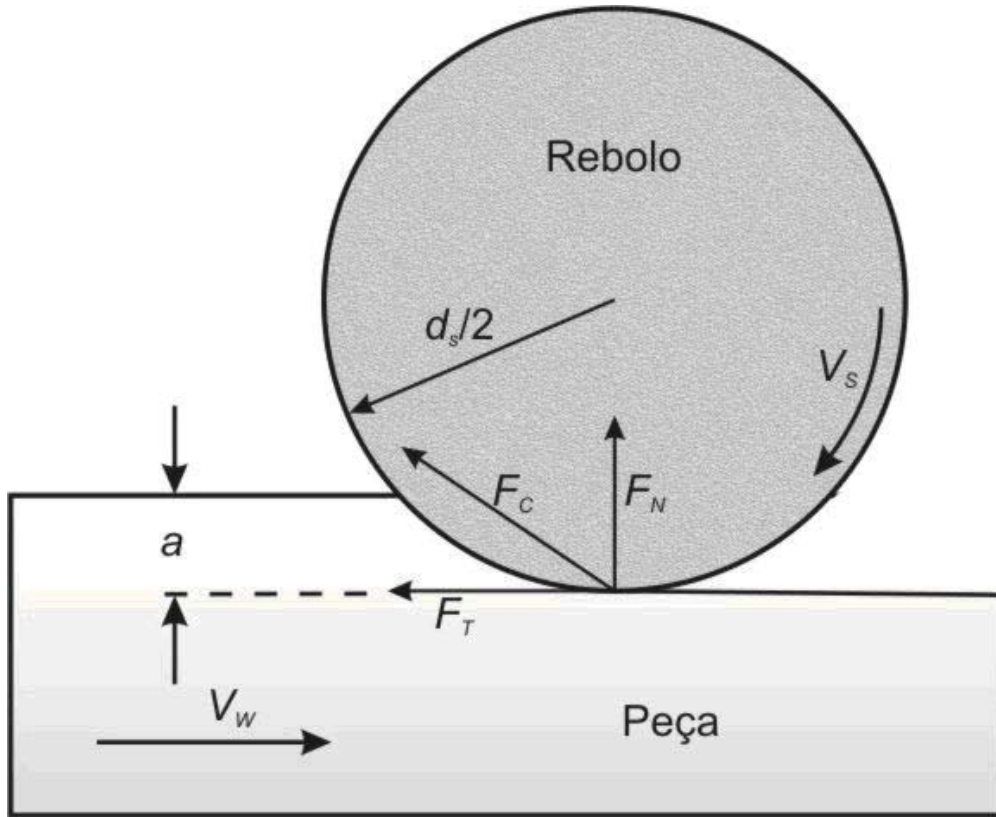


Figura 6 Componentes de força para retificação plana

A potência de retificação P associada com as componentes da força normal pode ser escrita como na Equação (6) (SALMON, 1994).

$$P = F_t(v_s \pm v_w) \quad (6)$$

O sinal positivo ou negativo indica se as velocidades estão na mesma direção. Como v_w geralmente é muito menor que v_s , a potência total pode ser simplificada pela Equação (7).

$$P = F_t v_s \quad (7)$$

A energia específica de retificação (u) é obtida com a seguinte relação da Equação (8) (BIANCHI, 1990).

$$u = \frac{P}{Q_w}$$



Onde Q_w é a taxa de remoção volumétrica em mm^3/s , e u em J/mm^3 .

2.2.2.8. Rebolo

De acordo com Diniz (2001), os rebolos são classificados de acordo com:

- Material do grão abrasivo
- Tamanho do grão
- Dureza do rebolo
- Estrutura do rebolo
- Tipo de liga aglomerante

Como grão abrasivo, tem-se principalmente os tipos óxido de alumínio, utilizado na usinagem de materiais como aço carbono, ligas de aço, aço rápido, carbetos de silício, indicado para materiais de alta dureza; nitreto de boro cúbico (CBN) para materiais ferrosos; e diamante, indicado em cerâmica e vidros.

A dureza de um rebolo é a resistência oposta ao arrancamento dos grãos, ou seja, uma capacidade de reter os grãos. Essa capacidade depende do tipo de ligante, do tamanho do grão e dos vazios, da espessura das pontes de ligantes. Um rebolo macio solta facilmente os grãos e se desgasta mais rapidamente, enquanto que um rebolo duro retém fortemente os grãos abrasivos. A dureza ideal a ser utilizada é aquela que os grãos gastos e arredondados são arrancados por si só, de modo que o rebolo se afia automaticamente, com mínima necessidade de utilizar a operação de re-afiação do rebolo (KRAR, 1995). Um rebolo duro consegue segurar o grão por mais tempo e, com isso, a perda de afiação acontece mais rapidamente. Com um rebolo macio, o aglomerante não consegue suportar as tensões geradas pelo processo e solta o grão, gerando o desgaste (DINIZ, 2001).

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. Grãos mais grossos são utilizados em rebolos para



operações de corte e limpeza, enquanto os mais finos são utilizados para polimento e lapidação (KRAR, 1995).

De acordo com Diniz (2001), a estrutura do rebolo indica a concentração volumétrica de grãos abrasivos no rebolo. A estrutura aberta é indicada por pelos números 0, 1, 2, 3; a estrutura média por 4, 5, 6 e de 7 a 12 a estrutura é fechada. Uma estrutura mais aberta em geral resulta em um acabamento mais grosseiro que em uma estrutura fechada. Rebolos com estrutura aberta oferecem mais espaços para alojamentos do cavaco reduzindo a tendência ao entupimento de porosidades.

2.2.2.9. Fluido de Corte

As altas temperaturas que ocorrem na zona de retificação podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, como por exemplo, queima (no caso de aços), têmpera excessiva da camada superficial com possível reendurecimento e aumento da fragilidade, redução da resistência à fadiga, e trincas. O fluido de corte também tem um importante efeito como lubrificante (MALKIN, 1989).

As indústrias mecânicas ainda hoje não selecionam e aplicam os fluidos de corte, de modo que possam obter o melhor desempenho. Tal fato resulta em prejuízos para as empresas, pois quando adequadamente aplicado, os fluidos de corte podem aumentar a produtividade e reduzir custos por meio da utilização de altas velocidades de corte e elevadas taxas de avanço. Além disso, uma aplicação eficaz pode aumentar a vida da ferramenta, diminuir a rugosidade, ampliar a precisão geométrica e reduzir a potência consumida pela máquina (BARADIE apud FERNANDES, 2005).

Salmon (1992) divide a ação dos fluídos de corte em quatro categorias: assistidos na energia de retificação, assistidos quimicamente o material removido do processo, lubrificação da ação de corte, e lavar os resíduos da retificação da interface rebolo-peça.



Ainda segundo Salmon (1992), os fluidos de corte podem ser divididos em três grupos: gases, comumente o ar, fluidos à base d'água e apenas óleo.

A existência ou não do fluido de corte afeta na seleção da dureza do rebolo. Operações refrigerantes eficientes permitem o uso de rebolos com dureza mais elevada sem modificar a estrutura superficial da peça, que na maioria das vezes já está tratada termicamente. O uso de refrigerantes e durezas mais elevadas permite um incremento na produtividade do rebolo (DINIZ, 2001)

2.2.3. Operação de Dressagem

A dressagem é considerada por diversos autores como diretamente responsável pela topografia dos rebolos, um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante as operações de retificação. A vida do rebolo, o tempo de ciclo de retificação e a qualidade final da peça são os itens mais afetados pela operação de dressagem (MARINELLI apud HELLMEISTER et al., 2004).

A maioria dos trabalhos encontrados na bibliografia utiliza como variáveis do processo a profundidade de dressagem (a_d) e o passo de dressagem (S_d) (AGUIAR, 2003). O parâmetro grau de recobrimento (U_d) é a relação entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o passo de dressagem (S_d), de acordo com a expressão (10):

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (9)$$

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (10)$$

Segundo Bianchi (1992), existem dois efeitos resultantes da operação de dressagem: o macroefeito e o microefeito.



O macroefeito é formado em função do formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo de dressagem em que é realizada a operação. Este fenômeno determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas. Pode-se dizer que o macroefeito é a rosca que o dressador produz na face do rebolo. O microefeito é formado pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador. A agressividade das arestas depende das condições de dressagem e da friabilidade (capacidade em formar novas arestas de corte quando fraturado) do grão abrasivo. O fenômeno do microefeito está portanto relacionado com o tipo de aresta que é formada nos grãos abrasivos durante a operação de dressagem, podendo tornar o rebolo mais agressivo ou não. A Figura 8 mostra a configuração da operação de dressagem (BIANCHI apud AGUIAR, 1999).

A Figura 7 apresenta um esquema do processo de dressagem do rebolo com um dressador de ponta única.

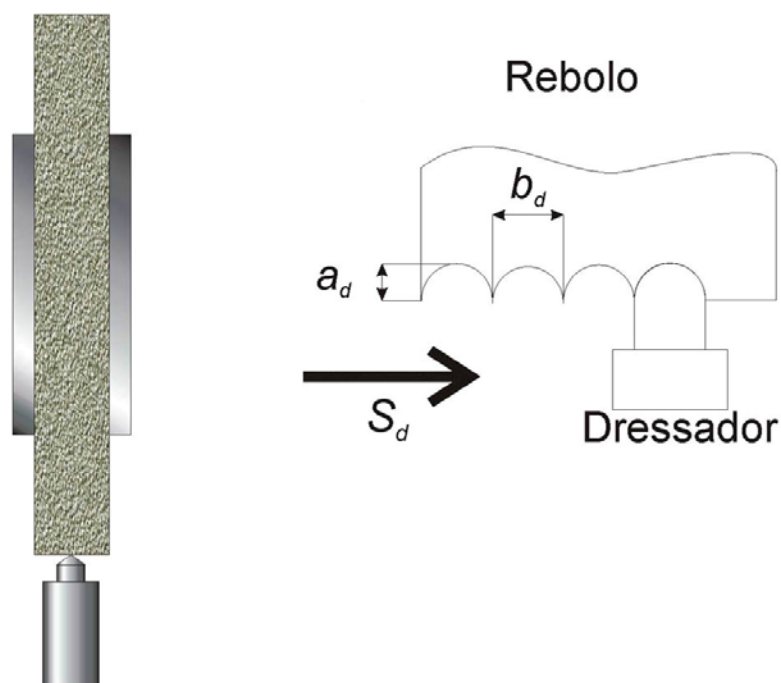


Figura 7 Processo de Dressagem do Rebolo.



2.3. Inversores de Frequência

Os inversores são usados para transferir energia de uma fonte de corrente contínua para uma carga de corrente alternada, com frequência e fase arbitrárias. Mais especificamente, eles são usados tipicamente em sistemas de alimentação para fornecer potência a motores de corrente alternada com frequência ajustável. Os inversores para sistemas de alimentação de motores empregam tiristores como elementos de chaveamento controlado, para formar as ondas de corrente alternada desejadas (FITZGERALD, 1975).

2.3.1. Inversor Paralelo Monofásico

O circuito inversor básico que utiliza os princípios de inversores mais complexos é o circuito inversor paralelo monofásico mostrado na Figura 8. O inversor converte energia elétrica da fonte de corrente contínua V_0 a forma de CA com a tensão V_t aplicada à impedância de carga. A frequência da tensão alternada é determinada inteiramente pelos pulsos de gatilho aplicados aos tiristores T_{r1} e T_{r2} . Em adição aos tiristores, o circuito inclui um indutor L , um transformador de saída, e um capacitor de comutação C . Os meios para gerar os pulsos de gatilho não são mostrados, mas usualmente consistem de um oscilador ou multivibrador, um circuito para dar a forma adequada aos pulsos, e transformadores de pulsos para aplicar os pulsos aos gatilhos dos tiristores (FITZGERALD, 1975).

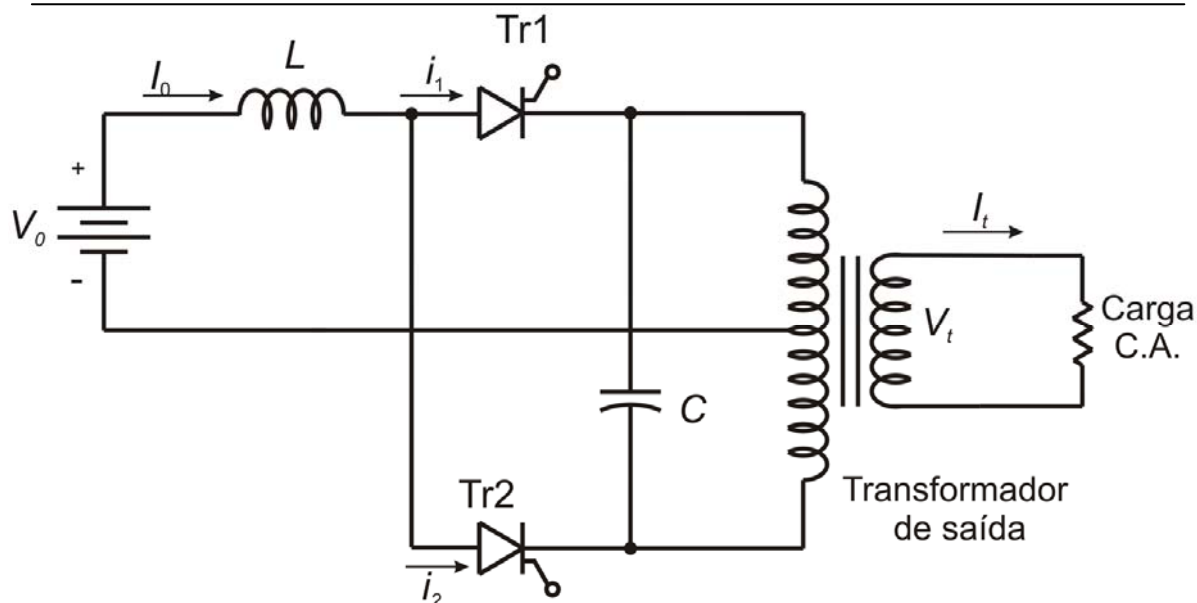


Figura 8 Inversor Monofásico

O circuito inversor da Figura 8 funciona fazendo os tiristores conduzir alternadamente; quando um tiristor está conduzindo, o outro está bloqueado, e a fonte de tensão V_0 é aplicada diretamente a uma metade do enrolamento do transformador, formando uma metade do ciclo da tensão de saída. Quando o outro tiristor é disparado, o capacitor de comutação força o primeiro tiristor a bloquear, e a tensão da fonte é aplicada à outra metade do enrolamento do transformador para formar o segundo meio ciclo da tensão de saída. O indutor serve para amortecer a ação dos elementos do inversor sobre a fonte de tensão fixa. A forma de onda de saída é essencialmente uma onda quadrada que pode ser filtrada para obter uma onda senoidal, se necessário.

2.3.2. Inversores Trifásicos

Os inversores para fornecimento de potência a frequência ajustável para sistemas de alimentação de motores de corrente alternada, são usualmente inversores trifásicos. Semelhantemente ao inversor monofásico, o inversor trifásico absorve energia de uma fonte corrente contínua, que pode ser uma bateria ou um sistema de distribuição de corrente contínua, mas usualmente é um retificador. Uma bateria pode ser mantida flutuando no barramento de



corrente contínua para assegurar um fornecimento de energia a aplicações críticas, quando o suprimento de corrente alternada ao retificador for interrompido. O inversor trifásico tem um mínimo de seis tiristores arranjados em uma configuração em ponte; estes tiristores são chaveados sequencialmente para sintetizar, nos terminais de corrente alternada da ponte do inversor, as tensões trifásicas que são aplicadas ao motor. Os tiristores são bloqueados com auxílio de capacitores de comutação. Isto ocorre através dos tiristores que estão começando a conduzir, como no inversor monofásico descrito anteriormente, na chamada autocomutação, ou através de tiristores auxiliares, na comutação forçada. Em comutação forçada, o tempo de condução de cada tiristor pode ser controlado independentemente da frequência, para obter controle da forma de onda ou da tensão (FITZGERALD, 1975).

Há uma ampla variedade de circuitos inversores trifásicos. Um circuito básico é mostrado na Figura 9 no qual cada tiristor conduz durante 180° do ciclo e é cortado por autocomutação. Cada seção monofásica do inversor, consistindo de dois braços de ponte em oposição, opera como um inversor monofásico.

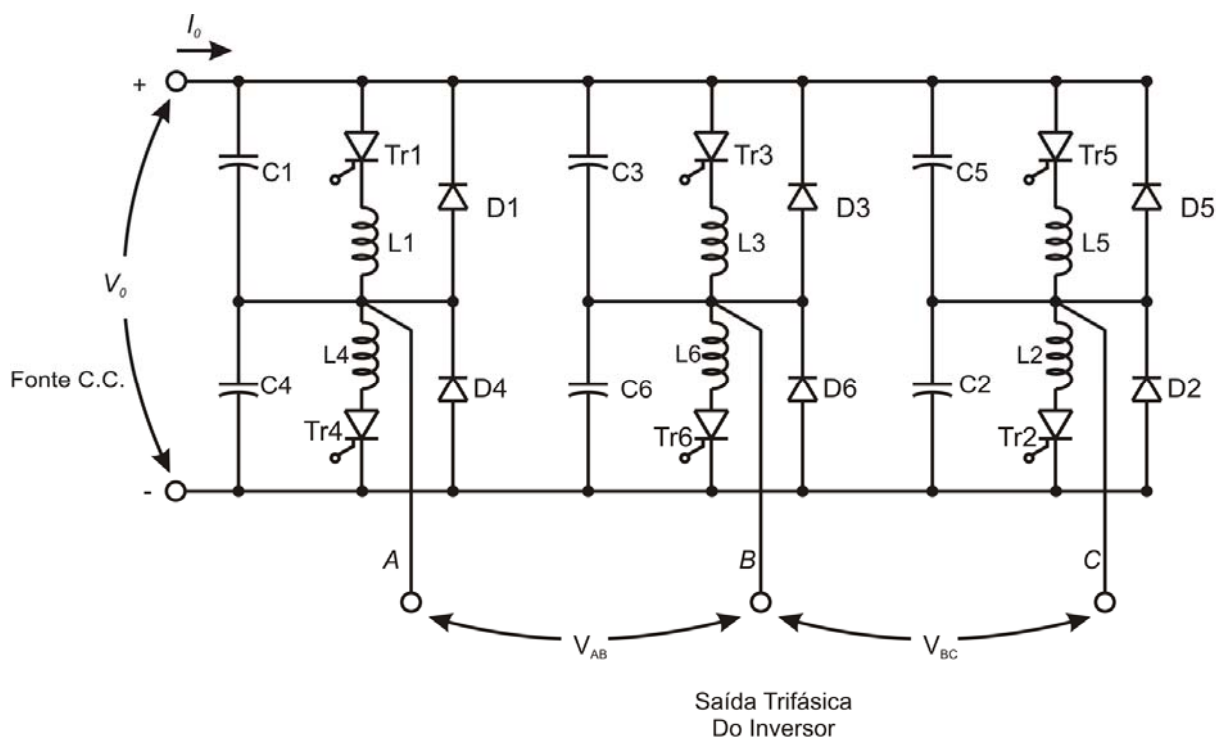


Figura 9 Inversor Trifásico



As tensões de fase são aproximações de ondas senoidais, do tipo três-degraus-por-meio-ciclo, enquanto as tensões de linha são pulsos positivos e negativos de 120° de largura. Quando as tensões do inversor são aplicadas a um motor, o motor responde à fundamental e às harmônicas das formas de onda para produzir conjugados positivos e de frenagem, e ambas as perdas normais e adicionais.

2.4. Motor de Indução

Na retificadora o rebolo é acionado por um motor de indução trifásico. As características desse motor influenciam diretamente o resultado da retificação e estão diretamente relacionadas com a força de usinagem. Neste trecho é relatada a constituição do motor que aciona o rebolo e suas características.

O motor de indução é o tipo de motor elétrico mais utilizado e difundido, tanto para motorização de sistemas, quanto para processos industriais. Sua principal vantagem é a eliminação do atrito de todos os contatos elétricos deslizantes e uma construção bastante simples, o que possibilitou sua construção a um custo mais baixo, sendo que estas máquinas são fabricadas para uma grande variedade de aplicações, desde alguns watts até muitos megawatts (LEONHARD, 1985).

A rotação síncrona do motor de corrente alternada é definida pela Equação (11).

$$n_s = \frac{4\pi f}{p} \quad (11)$$

Sendo f a frequência de alimentação, p o número de pólos da máquina e n a rotação, em rad/s.

O escorregamento é dado pela Equação (12).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (12)$$



Onde ω_r é a velocidade do rotor e ω_s é a velocidade síncrona do campo girante, que para uma frequência f e p número de pólos, é dada pela Equação (13).

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (13)$$

Quando se trata de acionamento de motores de indução, muitas vezes é utilizado o termo “*velocidade de escorregamento*”. A velocidade de escorregamento (ω_{sr}) é a diferença absoluta entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, que pode ser expressa pela Equação (14).

$$\omega_{sr} = \omega_s - \omega_r \quad (14)$$

2.4.1. A transformação para as Variáveis DQ

De acordo com Aguiar (1990), as equações de torque resultantes do modelo clássico da máquina de indução trifásica não são lineares, uma vez que dependem do ângulo de deslocamento do rotor, o qual é função do tempo. Devido a essas dificuldades foram desenvolvidas técnicas baseadas em transformações lineares para se estabelecer modelos mais simples a partir do modelo original estabelecido. Um destes modelos é a transformação DQ.

Fisicamente a transformação DQ transforma a máquina simétrica trifásica numa máquina simétrica bifásica, com mesma potência mecânica, torque, velocidade e número de pólos. Por isso é também conhecida com o nome de transformação trifásica-bifásica (BARBI, 1985). Por não depender de tensão de alimentação senoidal, o modelo DQ pode ser utilizado para realizar simulações de motores de indução alimentados com inversores de frequência.

O enrolamento trifásico de estator e os correspondentes enrolamentos da máquina bifásica equivalente estão representados na Figura 10. Os eixos dq são ortogonais e



giram à velocidade síncrona. Além desta, existe a possibilidade de escolher os eixos estacionários em relação ao estator ou ainda fixos no rotor (LEE apud AGUIAR, 1984).

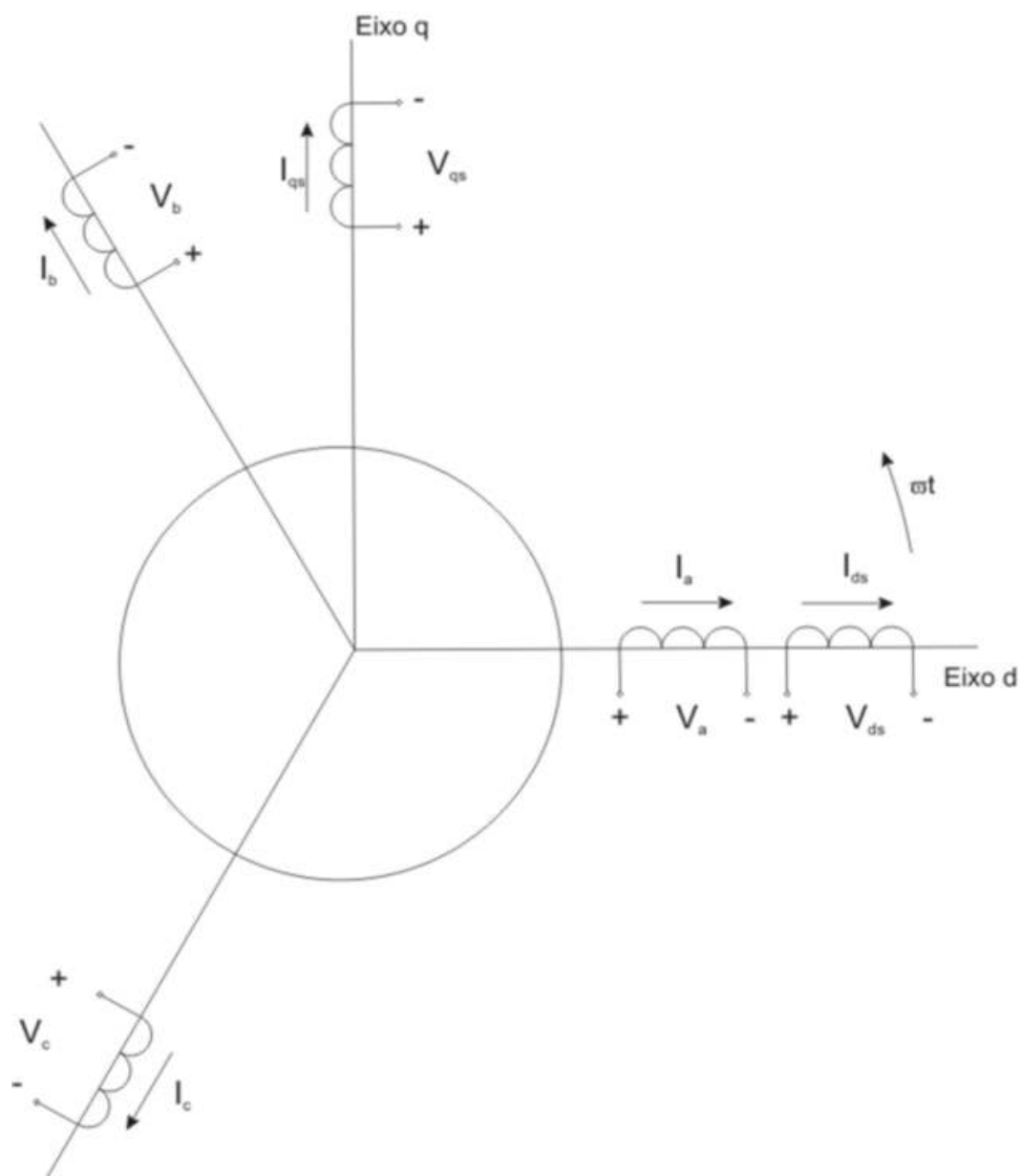


Figura 10 Enrolamento Trifásico do Estator com o Correspondente DQ (AGUIAR, 1990)

Na transformação o numero total de espiras de estator e rotor é mantido, sendo necessário somente um rearranjo das espiras. O resultado é que as espiras são agrupadas de tal maneira que o novo modelo bifásico tenha em cada fase a metade das espiras do enrolamento em questão (ELLISON apud AGUIAR, 1972).



Assim, as novas correntes de estator i_{ds} , i_{qs} dadas pela transformação são, na forma matricial:

$$i_{ds} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varpi t & \cos(\varpi t - 120^\circ) & \cos(\varpi t + 120^\circ) \\ -\sin \varpi t & -\sin(\varpi t - 120^\circ) & -\sin(\varpi t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

E a transformação inversa resulta em:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varpi t & -\sin \varpi t \\ \cos(\varpi t - 120^\circ) & -\sin(\varpi t - 120^\circ) \\ \cos(\varpi t + 120^\circ) & -\sin(\varpi t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para as tensões, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varpi t & -\sin \varpi t \\ \cos(\varpi t - 120^\circ) & -\sin(\varpi t - 120^\circ) \\ \cos(\varpi t + 120^\circ) & -\sin(\varpi t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (17)$$

A transformação inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{da} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varpi t & \cos(\varpi t - 120^\circ) & \cos(\varpi t + 120^\circ) \\ -\sin \varpi t & -\sin(\varpi t - 120^\circ) & -\sin(\varpi t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

De maneira análoga ao que foi feito para o estator, procede-se para as variáveis do rotor em relação aos eixos d e q. A Figura 11 representa o enrolamento trifásico do rotor e os correspondentes enrolamentos da máquina bifásica equivalente. Os eixos DQ são ortogonais e giram à velocidade síncrona. Além desta, existe a possibilidade de escolher os eixos estacionários em relação ao estator ou ainda fixos no rotor (LEE apud AGUIAR, 1984).

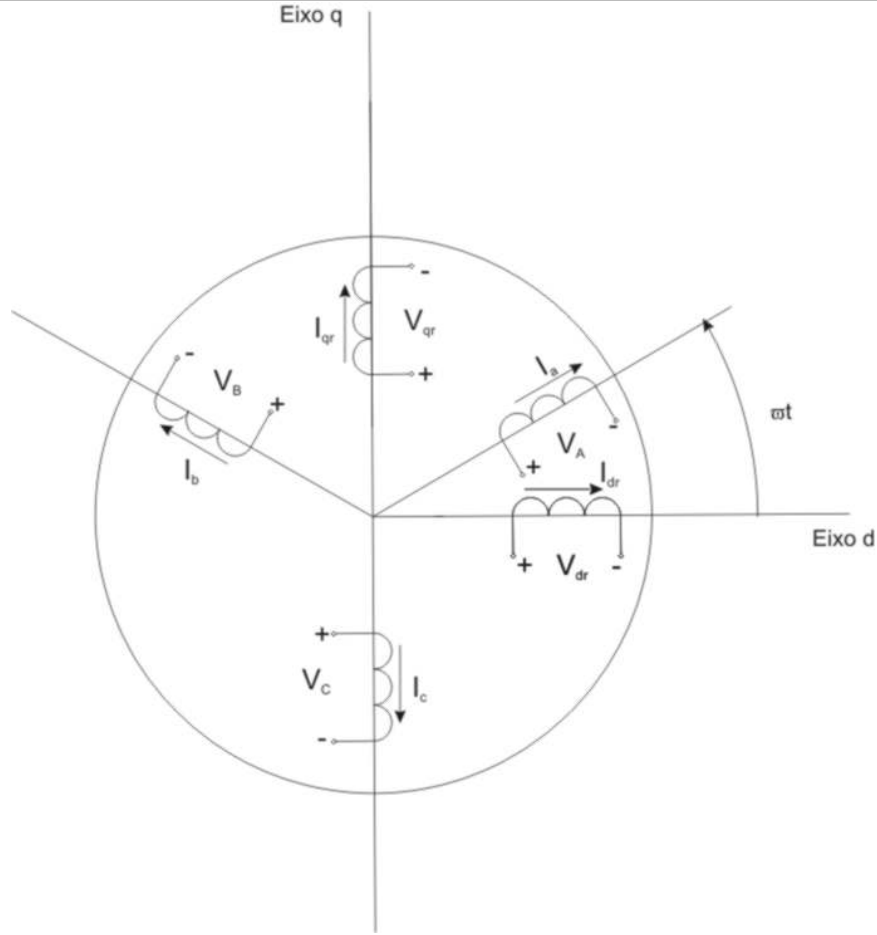


Figura 11 Enrolamento Trifásico do Rotor Com o Correspondente DQ

Portanto, de acordo com Aguiar (1990), as correntes do rotor no modelo dq resultam em:

$$\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s + 120^\circ) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - 120^\circ) & -\sin(\theta_s + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (19)$$

A relação de correntes difásico-trifásico para o rotor é obtida fazendo-se as mesmas considerações feitas anteriormente para o caso do estator, ou seja:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \cos(\theta_s - 120^\circ) & -\sin(\theta_s - 120^\circ) \\ \cos(\theta_s + 120^\circ) & -\sin(\theta_s + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (20)$$



De maneira análoga ao procedimento efetuado para o estator, obtém-se para

as tensões:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \cos(\theta_s - 120^\circ) & -\sin(\theta_s - 120^\circ) \\ \cos(\theta_s + 120^\circ) & -\sin(\theta_s + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (21)$$

A transformação inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s + 120^\circ) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - 120^\circ) & \sin(\theta_s + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (22)$$

O novo modelo pode ser representado conforme mostrado na Figura 12.

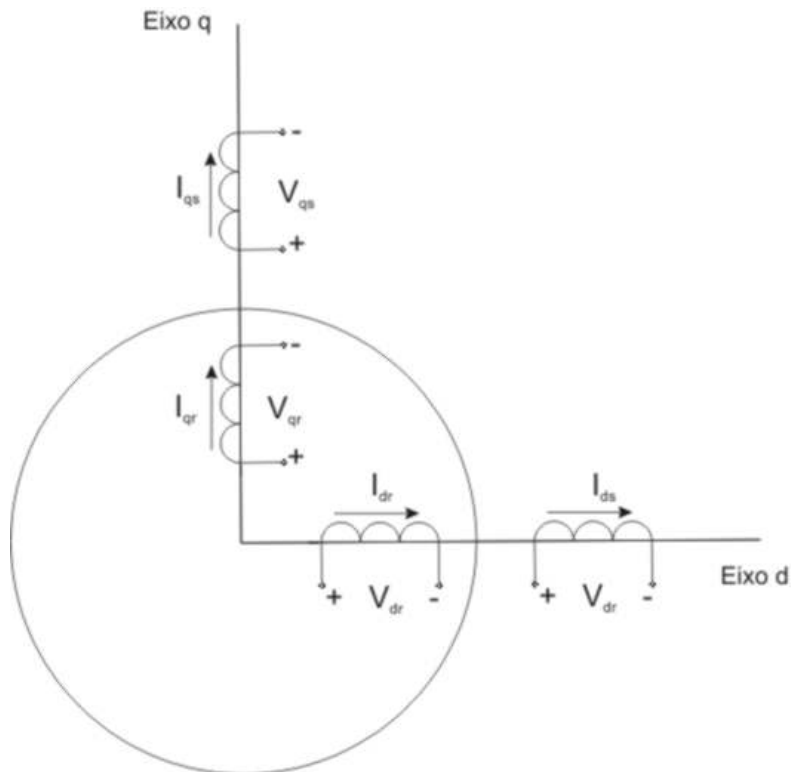


Figura 12 Representação Esquemática do Motor de Indução para o Modelo DQ

A partir do modelo DQ obtido e representado na Figura 12, as seguintes equações podem ser obtidas:



$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_{ss} p & -\omega L_{ss} & M_{sr} p & -\omega M_{sr} \\ \omega L_{ss} & r_s + L_{ss} p & \omega M_{sr} & M_{sr} p \\ M_{sr} p & -M_{sr} p \theta_s & r_r + L_{rr} p & -L_{rr} p \theta_s \\ M_{sr} p \theta_s & M_{sr} p & L_{rr} p \theta_s & r_r + L_{rr} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Onde $p = \frac{d}{dt}$ e M_{sr}

Desta forma, a potência total desenvolvida internamente pela máquina pode ser escrita como:

$$P = [I]^T [r] [I] + [I]^T [L_v] [I] + [I]^T [L_v] [I] + [I]^T [L_m] [I] \quad (24)$$

O terceiro termo da Equação (24) representa a potência convertida em potência mecânica. Substituindo-se a matriz (23) neste termo, resulta em termos de grandezas rotóricas:

$$P_{mec} = -M_{sr} [i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}] p \theta_s \quad (25)$$

Onde P_{mec} é a potência mecânica desenvolvida no rotor

Desta forma, o conjugado disponível para movimentar a carga (mais as perdas rotacionais) e proporcionar a aceleração é obtido dividindo-se a expressão (25) pela velocidade relativa do rotor ($-p\theta_s$), resultando:

$$T_{mec} = M_{sr} [i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}] \quad (26)$$

2.4.2. Circuito Equivalente

A partir do equacionamento realizado anteriormente chega-se, após um tratamento matemático, às seguintes expressões:

$$V_s = r_s I_s + j \omega (L_{ss} - M'_{sr}) I_s + j \omega M'_{sr} (I_s + I'_r) \quad (27)$$



$$\frac{V_r'}{s} = \frac{V_r'}{s} I_r' + j\omega(L_{rr}' - M_{sr}')I_s + j\omega M_{sr}'(I_s + I_s') \quad (28)$$

Entre os aspectos importantes de desempenho em regime permanente estão as variações de corrente, velocidade, e perdas, em função do conjugado de carga, o conjugado de partida, e o conjugado máximo. Todas estas características podem ser determinadas do circuito equivalente.

A partir das equações (27) e (28) chega-se ao circuito da Figura 13, que representa o circuito equivalente do motor de indução.

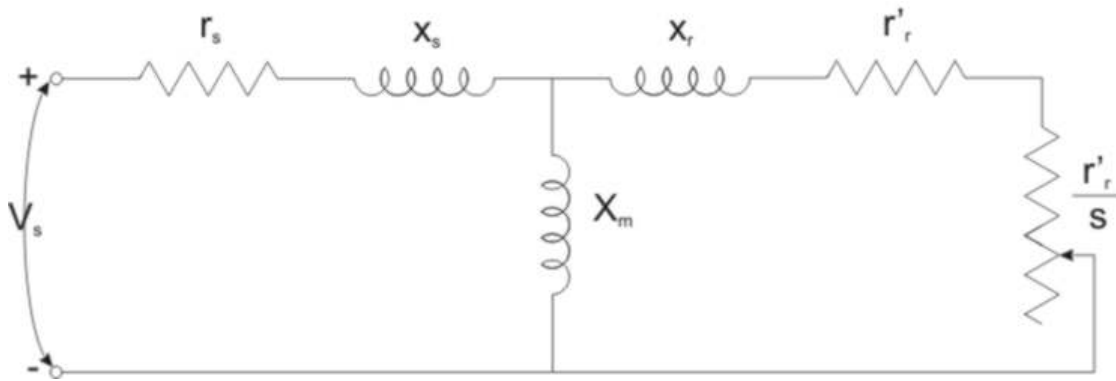


Figura 13 Circuito Equivalente do Motor Para uma Fase

Onde r_s é a resistência de fase do estator; r_r' a resistência de fase do rotor referida ao estator; x_s a reatância de dispersão por fase do estator, x_r' a reatância de dispersão por fase do rotor referida aos estator; X_m o componente da reatância própria do estator devido ao fluxo mútuo.

A partir do modelo DQ e do circuito equivalente do motor obtém-se todas as equações necessárias na análise do motor. O modelo DQ é utilizado neste trabalho no programa de simulação do sistema motor e inversor de frequência.



2.4.3. Perdas do Motor de Indução

A consideração das perdas das máquinas é importante por três razões: as perdas determinam o rendimento da máquina e influenciam apreciavelmente o custo de funcionamento; as perdas determinam o aquecimento da máquina e daí a potência nominal, ou potência de saída que pode ser obtida sem excessiva deterioração da isolamento; e as quedas de tensão ou componentes de corrente associadas às das perdas precisam ser levadas em conta apropriadamente em uma representação de máquinas. O rendimento das máquinas, semelhante ao de transformadores ou de qualquer dispositivo de transformação de energia, é dado pela Equação (29) (FITZGERALD, 1975).

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} \quad (29)$$

Que também pode ser expressa como:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{entrada} - \text{perdas}}{\text{entrada}} = 1 - \text{perdas} \quad (30)$$

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{saída}}{\text{saída} + \text{perdas}} \quad (31)$$

As máquinas rotativas em geral funcionam eficientemente, exceto com pouca carga. Os rendimentos dos motores de indução situam-se numa larga faixa, com valores mais baixos para as máquinas pequenas e mais altos para as médias e grandes. Dependem do tamanho e do número de pólos dos motores. O rendimento de motores médios, em carga nominal, por exemplo, está na vizinhança de 74% para tamanhos de 1 CV, 89% para 50 CV, 93% para 500 CV, e 97% para 5000CV. O rendimento de motores de baixa velocidade é usualmente menor do que o de motores de alta velocidade, numa faixa total de 3% a 4% (FALCONE, 1979).

As fórmulas das Equações (30) e (31) são frequentemente usadas para máquinas elétricas, pois nelas o rendimento é mais comumente determinado pela medição de



perdas, em lugar da medição direta da entrada e da saída sob carga. As medições das perdas têm a vantagem de conveniência e economia, e de produzir valores mais exatos e precisos do rendimento, pois um dado erro percentual na medição de perdas produz apenas cerca de um décimo deste erro percentual no rendimento.

No caso das perdas no motor de indução trifásico, tem-se perda no cobre do estator e rotor, perdas rotacionais e suplementares, perdas por correntes de Foucault e histerese, e perdas por efeito pelicular, sendo as por corrente de Foucault proporcionais ao quadrado da frequência e as de histerese e efeito pelicular proporcionais à frequência (AGUIAR, 1997).

As perdas no cobre, ou I^2R , existem, naturalmente, em todos os enrolamentos da máquina. Em geral, as perdas são calculadas considerando as resistências do enrolamento medidas em corrente contínua, a 75°C. Esta norma decorre da variação da resistividade dos materiais condutores com a temperatura (JORDÃO, 1980).

As perdas mecânicas consistem de atritos nas encovas e nos mancais, e de ventilação, natural ou forçada, provocada pelas partes girantes. As perdas por atrito e ventilação podem ser medidas pela determinação da potência de entrada à máquina girando em velocidade apropriada, mas sem carga. As perdas por atrito nos mancais dependem de vários fatores, desde seu tipo até seu estado de lubrificação. O mesmo ocorre com as perdas mecânicas por atrito de escovas deslizantes sobre partes girantes (JORDÃO, 1980).

As perdas no ferro em circuito aberto, ou em vazio, consistem das perdas por histerese e corrente de Foucault que se originam da variação de densidades de fluxo no ferro da máquina, estando energizado somente o enrolamento de excitação principal. Em máquinas de corrente contínua e síncronas, estas perdas são limitadas, na maior parte, ao ferro da amadura, embora as pulsações de fluxo originadas nas aberturas das ranhuras produzem igualmente perdas no ferro do campo, particularmente nas sapatas polares ou superfícies do ferro do campo. Em máquinas de indução, as perdas são confinadas quase totalmente, no ferro do estator. As



perdas no ferro podem ser medidas pela medição da 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, e depois subtraindo as perdas por atrito e ventilação e, se a própria máquina é o motor durante o ensaio, também as perdas no cobre da armadura em vazio (ou as perdas no cobre do estator em vazio, para um motor de indução). Usualmente, são tomados valores para traçar uma curva de perdas no ferro nominal. As perdas no ferro em cargas são determinadas então para uma tensão em vazio igual à tensão nominal menos a queda na resistência ôhmica da armadura em carga (correção fasorial para máquinas CA). Para motores de indução, entretanto, esta correção é dispensada, e as perdas no ferro são determinadas na tensão nominal. Para a determinação do rendimento apenas, não há necessidade de separar as perdas no ferro e as perdas por atrito e ventilação. A soma destas duas perdas é chamada a perda rotacional em vazio.

As perdas por correntes de Foucault dependem do quadrado da densidade de fluxo, da frequência, e da espessura das chapas. Nas condições normais das máquinas, estas perdas podem ser expressas, com boa aproximação, pela Equação (32)

$$P_f = K_f (B_{\max} f \tau)^2 \quad (32)$$

Onde τ é a espessura das chapas, $B_{\max}$ é a indução máxima, f é a frequência, e K_f é uma constante de proporcionalidade cujo valor depende das unidades usadas, do volume do ferro, e da resistividade do ferro. A variação das perdas por histerese pode ser expressa somente por uma equação empírica. A relação mais comumente usada é dada pela Equação (33):

$$P_h = K_h f B_{\max}^n \quad (33)$$

Onde K_h é uma constante de proporcionalidade que depende das características e volume de ferro e das unidades usadas, e o expoente n varia entre 1,5 e 2,5,



com um valor de 2,0 freqüentemente usado para estimativas em máquinas. Nas Equações (32) e (33), a freqüência pode ser substituída pela velocidade e a densidade de fluxo pela tensão apropriada quando as constantes de proporcionalidade convenientemente são alteradas. Tais substituições estão implícitas quando os ensaios de perdas no ferro são realizados à velocidade nominal e tensão correta.

Quando a máquina está em carga, a distribuição espacial da indução é bastante alterada pela força magneto-motriz (FMM) das correntes de carga, e as perdas reais no núcleo aumentam muito. Por exemplo, as harmônicas de FMM causam perdas apreciáveis no ferro perto das superfícies do entreferro. O aumento total nas perdas no ferro é classificado como parte das perdas suplementares.

As perdas suplementares consistem das perdas que aparecem da distribuição não-uniforme de corrente no cobre, e das perdas adicionais no ferro produzidas por distorção do fluxo magnético devido à corrente de carga. São perdas difíceis de se determinar com precisão (FITZGERALD, 1975)

Segundo Hildebrand (2001) as perdas harmônicas nas máquinas assíncronas aumentam geralmente com o aumento das freqüências de chaveamento dos inversores de freqüência. O aumento é pronunciado em baixas freqüências fundamentais. Ainda segundo ele, a separação das perdas totais e avaliação dos componentes de perda de componente única resultaram em indicações de que as perdas harmônicas no cobre são significantes. Este efeito se tornará mais distinto para o motor gaiola de esquilo.

2.5. Simulação

Sistemas de eletrônica de potência tais como “drivers” de velocidade variável são sistemas complexos, possuindo componentes de diferentes naturezas, tais como conversores de potências construídos com elementos elétricos lineares, não lineares semicondutores de chaveamento de potência, máquinas elétricas, e sistemas de controle contendo elementos lineares e não lineares. A modelagem e simulação efetivas de tais sistemas requerem uma



ferramenta de software que possa manipular todas essas funções em um ambiente integrado (LE-HUY, 2001).

Os experimentos com componentes elétricos de potência elevada podem ser caros e consumir muito tempo. As simulações oferecem uma maneira rápida e econômica, se não a única, com a qual se pode conduzir os estudos para conhecer mais estes componentes (ONG, 1998).

2.5.1. Programa Simulink/Matlab

Segundo Xie (2003), o Matlab possui vantagens únicas, tais como alta eficiência de programação, apoio de um algoritmo numérico, um bloco de eletrônica de potência que oferece muitos modelos de dispositivos de eletrônica de potência, interface gráfica amigável, e sua arquitetura é aberta o torna possível ser personalizado, expandido e integrado com modelos de sistemas complicados e esquema de controle para fins específicos.

Existem muitas ferramentas disponíveis no Matlab que podem ser facilmente usadas para projetar e otimizar o desempenho de um sistema utilizando inversor PWM em malha aberta ou fechada (WONG, 1999).

O Simulink/Matlab tem como principal vantagem ser totalmente gráfico e com isso o diagrama de blocos torna-se bem visível e de fácil interpretação, além de possuir um tempo de simulação curto, mesmo comparado como o Matlab. Apresenta as desvantagens de não manipular grandezas complexas, e não possui uma interface de pós-processamento muito amigável. Entretanto o Simulink disponibiliza as variáveis desejadas no ambiente Matlab, tornando-as assim mais fácil de manipular (Cad, 2000).

As ferramentas do Simulink são divididas em blocos de componente, conhecidas como “toolboxes”, dentre eles blocos de componente desenvolvidos para simulação de equipamentos de comunicação, controle de sistemas, operação em redes neurais e lógica Fuzzy, simulação aeroespacial, entre outros. O bloco “SimPowerSystem” contém os



componente elétricos e eletrônicos de potência e o “SimMechanics” os de simulação de componentes mecânicos.

As “toolboxes” não apenas disponibilizam os principais componentes para simulação, mas também introduzem um método sistemático para a construção de blocos de componentes adicionais. O ambiente Simulink permite um acesso direto a habilidade computacional do Matlab de forma conveniente, com um ambiente de programação orientado a diagrama de blocos (LOGUE, 2000)

De acordo com Le-Huy (2001), as simulações de componentes elétricos podem ser feitas com detalhes suficientes em circuitos eletrônicos de potência e sistemas de controle. Isto é muito útil para análise de formas de onda e para controle dos parâmetros de sintonia.

O PSB (Power System Block set) consiste de uma ferramenta gráfica que permite construir esquemas e simulações de sistemas de potência no ambiente Simulink. Esta ferramenta utiliza o ambiente Simulink para representar componentes e dispositivos encontrados em redes elétricas de potência. Diagramas podem ser montados simplesmente usando procedimentos de clicar e arrastar na janela do Simulink (SYBILLE, 2000).

Com a função “Ode23” do Matlab, a resposta do inversor PWM pode ser obtida de forma precisa e rápida. As formas de onda obtidas com o Matlab tiveram pequenas diferenças em relação às obtidas com o PSPice devido a perdas de potência de chaveamento não ideal e diodos usados no PSPice (WONG, 1999).

2.6. Monitoramento do Processo de Retificação

2.6.1. Introdução

Atualmente, a demanda por sistemas de monitoramento está aumentando continuamente devido à automatização dos processos de manufatura. No passado, a detecção de defeitos era suficiente. Hoje é necessário evitar qualquer defeito. Desta forma, os sistemas de



monitoramento devem ser rápidos e confiáveis para a garantia de um número mínimo de defeitos (TÖNSHOFF, 1999).

O monitoramento da condição de ferramenta é uma das técnicas mais importantes para ser desenvolvida nos processos cortantes automáticos e pode auxiliar na prevenção de danos em máquinas ferramentas e peças de trabalho. Os pesquisadores e engenheiros procuram monitorar as condições de ferramenta, mas existem poucos sistemas de monitoração confiáveis utilizados na indústria atualmente (LI, 1999).

A automatização e o aumento da produtividade melhoraram os sistemas de manufatura desde que o controle numérico foi introduzido na indústria. Entretanto, é difícil determinar com precisão as condições de corte, e os operadores experientes ainda produzem resultados melhores do que máquinas que operam sem o controle humano. Isto retarda o crescimento contínuo de sistemas de manufatura (JEONG, 2002).

Novos desenvolvimentos em anos recentes abriram novas oportunidades para realçarem o monitoramento da condição de ferramenta por integração de sensores e diagnóstico de falha “on-line”. O propósito do monitoramento da condição de ferramenta é obter informações melhores sobre a condição das máquinas-ferramentas utilizadas, a condição da peça de trabalho, e em última instância, no processo de manufatura propriamente dito. Estas informações podem então ser utilizadas para diagnóstico de máquina-ferramenta e processo de controle, que é crucial para assegurar alta produtividade e boa qualidade final (PATHARE, 1998).

2.6.2. Processamento de Sinais

A seguir são apresentadas as ferramentas de processamentos de sinais utilizadas direta ou indiretamente neste trabalho.



2.6.2.1. Valor Eficaz ou RMS

O RMS é definido como o valor médio quadrático de uma faixa de frequência selecionada do sinal. Este tratamento de sinal é muito utilizado em sinais de emissão acústica. O RMS para qualquer instante de tempo pode ser calculado pela Equação (34) (WEBSTER apud AGUIAR et al., 1999):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int V(t)^2 dt} \quad (34)$$

Onde T é o tempo de integração.

2.6.2.2. Transforma Discreta de Fourier

A DFT é um procedimento matemático usado para determinar o conteúdo harmônico, ou em frequência, contida em uma sequência discreta de um sinal. Embora, um sinal discreto seja um conjunto de valores obtidos por uma amostragem periódica de um sinal contínuo no domínio do tempo, pode-se observar que a DFT é útil em analisar qualquer sequência discreta sem levar em consideração o que a sequência de fato representa. A origem da DFT, naturalmente, é a transformada de Fourier contínua $X(f)$, definida pela Equação (35).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (35)$$

onde $x(t)$ é algum sinal contínuo no domínio do tempo.

No campo do processamento de sinais, a Equação (35) é usada para transformar uma expressão de uma função $x(t)$ no domínio do tempo contínuo em uma função do domínio da frequência contínua $X(f)$. Uma posterior avaliação de $X(f)$ torna possível a determinação do conteúdo em frequência de qualquer sinal prático de interesse, e abre um amplo campo de análise de sinais e possibilidades de processamento nos campos da engenharia e física. Pode-se questionar que a transformada de Fourier é o mecanismo matemático mais dominante e comum disponível para a análise de sistemas físicos.



Com o advento do computador digital, os esforços iniciais dos pioneiros na área de processamento digital levaram ao desenvolvimento da DFT definida como a seqüência discreta no domínio da frequência $X(m)$, e dada pela Equação (36) na forma exponencial.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nm/N} \quad (36)$$

onde $x(n)$ é uma seqüência discreta de valores amostrados no domínio do tempo da variável contínua $x(t)$. O símbolo “ e ” na Equação (36) é o logaritmo natural; $j = \sqrt{-1}$; $m=0,1,2,3,\dots,N-1$, é o índice da saída da DFT no domínio da frequência; N é o número de amostras da seqüência de entrada e o número de pontos de frequência na saída da DFT.

2.6.2.3. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Embora a DFT seja o procedimento matemático mais direto para determinar o conteúdo em frequência de uma seqüência no domínio do tempo, ela é extremamente ineficiente. Conforme o número de pontos da DFT aumenta, a quantidade necessária de cálculos se torna excessiva.

Em 1965, um artigo publicado por Cooley e Tukey abordou-se um algoritmo muito eficiente para implementar a DFT, e agora o algoritmo é conhecido como transformada rápida de Fourier (FFT) (YANG & CHEN apud AGUIAR, 2003).

A DFT é tipicamente utilizada na prática como uma forma comum do algoritmo FFT. A FFT não é uma transformada de Fourier propriamente dita, mas simplesmente um algoritmo computacional eficiente que reduz a complexidade computacional da DFT de ordem $\{N^2\}$ para ordem $\{N \log_2 N\}$. Quando N é grande, a economia de esforço computacional promovida pelo algoritmo FFT é tão grande que em muitas situações seria praticamente impossível sem ela (JENKINS, 1999).



2.6.2.4. Média e Desvio Padrão

Empregados para a determinação do valor médio e a dispersão do sinal, respectivamente. Deseja-se descrever muitas vezes a amplitude da distribuição, a simetria e a sua forma. Todas essas características são resumidas pelos momentos da distribuição, ou derivadas (SPIEGEL, 2003).

O desvio padrão pode ser expresso pela Equação (37).

$$\sigma = \left(\frac{(x_i - \mu)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

Onde μ é a média da população e N é o tamanho da população.

2.6.3. Monitoramento da Força e Potência

As forças de retificação possuem influência direta no desgaste do rebolo, temperatura de retificação e na superfície final da peça. Então, é muito importante seu estudo. Relacionado a isso muitos estudos têm sido realizados. Contudo, uma medida da força de retificação é insatisfatório devido à dificuldade da instalação dos instrumentos de medida no ponto de mergulho (LEE, 2001).

A força de corte é o indicador mais importante do estado da máquina e da qualidade da usinagem. Para a medida da força de corte geralmente é utilizado um dinamômetro como sensor, mas este dispositivo é caro e sensível a choques mecânicos e a cargas constantes. Além disso, a montagem do sensor pode interferir na operação da máquina. É mais econômico estimar a força de corte utilizando a corrente elétrica do motor de avanço (JEONG, 2002).

A medida de força é um elemento crítico no controle do processo de retificação, sendo em geral realizado por sensores de tipo “strain gage” ou piezelétrico. Sensores baseados em “strain gage” não apresentam nenhum desvio quando carregados em níveis de força constante; porém, sua resposta é geralmente baixa e dependente na aplicação e geometria. Embora sua eletrônica de sensor geralmente possua uma taxa de amostragem alta,



aproximadamente 1000 Hz de taxa de amostragem, as frequências naturais destes sensores podem limitar sua largura de banda e, tipicamente, seus sinais de sensor analógicos são filtrados por um filtro passa - baixa de 100 a 200 Hz. Um transdutor de força do tipo piezelétrico pode ser utilizado para se ter sinais de força com largura de banda maior. Infelizmente, valores de força constantes ou quase estáticos são difíceis de medir em períodos de tempo longos com este instrumento porque o cristal de quartzo sofre desvios significativos com medidas de carga constante. A dureza do dinamômetro piezelétrico é substancialmente mais alta que com strain gage, com valores nominais de aproximadamente 10.000.000 libras-por-polegada (1.9 MN/mm) (KURFESS, 2001).

O princípio de medida de força baseado na variação da resistência elétrica provém da relação entre o comprimento de um fio e sua resistência. O comprimento do fio é alterado sob a ação de uma força. Este é o princípio de funcionamento dos extensômetros. As células de carga, que são sensores para medida de força, usam pontes de extensômetros.

Para medir a potência elétrica despendida pela máquina durante o processo de retificação, pode ser utilizado um sensor de efeito Hall em vários tipos de aplicações industriais. O princípio do sensor de efeito Hall é baseado no efeito Hall, que foi descoberto pelo Dr. Edwin Hall, em 1879. A corrente flui através de um cabo pelo motor de uma máquina retificadora e produz um campo magnético. Se o cabo passa em um sensor de efeito Hall, uma tensão induzida no sensor é desenvolvida devido à força de Lorentz. Esta tensão é conhecida como tensão Hall e a soma da tensão Hall é proporcional à corrente original que flui pelo cabo. Então pela medida das mudanças da tensão Hall, a potência dependida pelo motor pode ser facilmente obtida durante o processo de retificação (KWAK, 2005).

Conhecer o conteúdo harmônico é importante não apenas para pesquisa do comportamento de vários dispositivos de eletrônica de potência, mas também para determinar com precisão as medidas. Um aumento na frequência de amostragem das medidas para algumas



centenas de quilohertz é necessário para melhorar a precisão de medida da potência para algumas dezenas de por cento. As formas de onda são exibidas em seus valores RMS período a período ao redor de um ponto de equilíbrio. Para medidas eficientes, os canais de medidores multifase devem ser capazes de se sincronizar independentemente para cada entrada ou saída de frequência. A entrada é a rede elétrica de alimentação e a saída é ajustada de acordo com a rotação do motor desejada (CZAKOWSKI, 1997)

Portanto, é essencial fazer a aquisição dos sinais de potência, corrente e tensão elétricas do motor com taxa suficiente para se ter os sinais das frequências harmônicas significativas, que chegam a 20 kHz. Apenas uma tomada do valor RMS pode muitas vezes não ser suficiente para se ter boa precisão.

De acordo com Xiaoli Li (2005), os sinais de corrente elétrica resultantes dos sensores de efeito hall podem ser empregados para medida indireta de força em um sistema de torneamento CNC, podendo-se ter as forças tangencial e axial por técnicas de redes neurais e lógicas fuzzy; a força normal de corte e o coeficiente de fricção podem ser calculados por um modelo de corte mecânico.



3. Materiais e Métodos

3.1. Introdução

Para a realização do presente trabalho foi necessário o desenvolvimento de vários procedimentos experimentais acerca dos parâmetros de retificação e condições para a correta captura dos dados de força e potência elétrica do motor, além do desenvolvimento de módulos condicionadores de sinais e de um programa de aquisição de dados.

Para tanto, dividiu-se os procedimentos em quatro etapas:

- Análise dos equipamentos utilizados e testes iniciais;
- Realização de simulações do processo;
- Ensaios finais, realizados a partir das experiências dos ensaios preliminares e das simulações;
- Análise dos ensaios finais.

A Figura 14 mostra a disposição dos equipamentos utilizados.

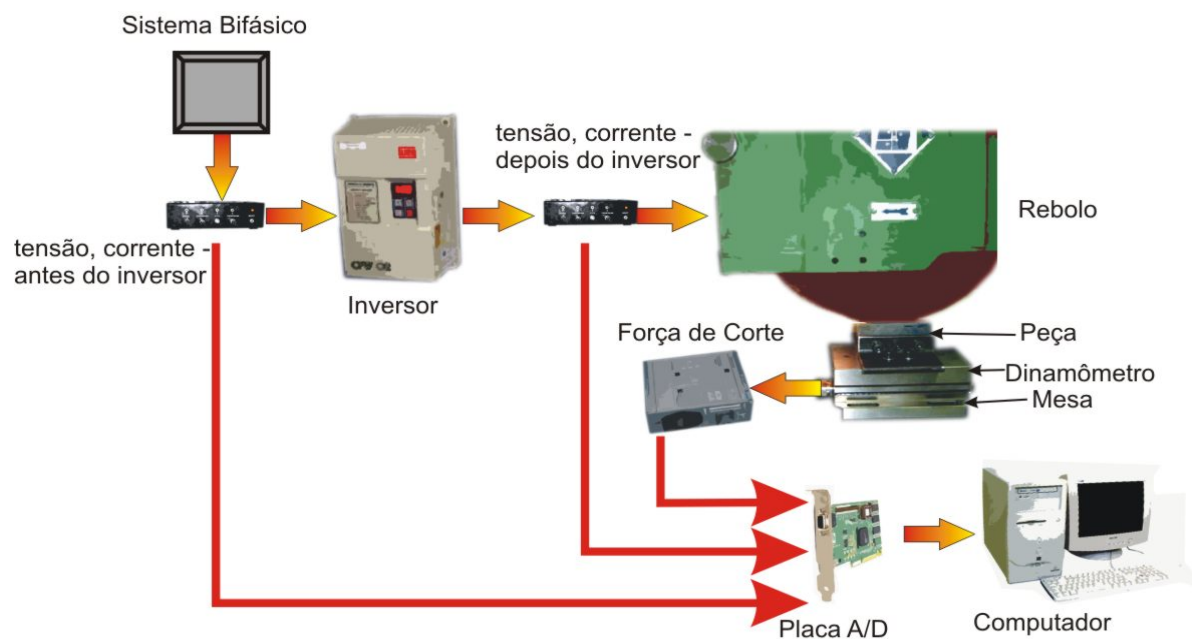


Figura 14 Esquema dos Equipamentos



Os sensores constituíram-se de um dinamômetro, utilizado para medir a força de corte, dois módulos para medida da tensão e corrente antes e depois do inversor de frequência e um “*encoder*”, para medição da velocidade do rebolo. A placa A/D, ou placa de aquisição de dados, converte os sinais analógicos resultantes dos sensores e módulos em um sinal digital, para ser gravado no computador. Posteriormente os dados correspondentes aos ensaios foram processados e analisados. Nas seções seguintes são descritos cada um dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais, bem como os métodos utilizados.

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Usinagem por Abrasão do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Unesp – Bauru, enquanto que o procedimento de análise dos resultados foi realizado no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS), do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP – Bauru.

3.2. Escolha do Tipo de Operação de Usinagem

Para a realização deste trabalho foi escolhida a retificação plana. O processo de retificação plana é um dos mais utilizados nas indústrias dependentes de processos de usinagem por abrasão e seu estudo é relativamente simples e os resultados podem ser estendidos aos outros tipos de operação de retificação. Outro motivo da escolha é que seria difícil medir a força de corte em uma retífica cilíndrica. A máquina utilizada foi uma retificadora tangencial plana do fabricante Sulmecânica. A Figura 15 mostra a máquina retificadora utilizada.



Figura 15 Retificadora Plana Utilizada nos Ensaio

3.3. Rebolo

Os rebolos são escolhidos a partir do tipo de ensaio a ser realizado, da peça a ser retificada e do resultado e precisão desejados. Normalmente são escolhidos a partir de experiências vividas anteriormente pelo usuário e ou fornecedor. Entretanto, pode-se ter uma melhor oportunidade de acerto se forem observadas algumas orientações básicas como a correta determinação do tipo de grão abrasivo, granulometria, ligante, dureza e a porosidade do rebolo (DINIZ, 2001).

Neste trabalho, o tipo de rebolo não foi uma escolha determinante, uma vez que o objetivo não é a qualidade final da peça. Utilizou-se um rebolo convencional de óxido de alumínio do tipo 38A80-PVS, do fabricante Norton, com dimensões originais de 296,50 mm de diâmetro e 40,21 mm de espessura.

3.4. Peças de Trabalho

As peças utilizadas nos ensaios foram construídas de aço ABNT 1020 por ser um aço mole, de baixo custo, muito utilizado na indústria e de fácil usinagem. Esta escolha não



foi determinante, conforme os objetivos propostos. Os corpos de prova utilizados possuíam a forma de um prisma retangular de dimensões de 98,65 mm de comprimento, 46,39 mm de altura e 8,67 mm de largura.

3.5. Inversores de Frequência

Para o controle da velocidade do motor que aciona o rebolo foi utilizado o inversor de frequência de 380V, 7,5 CV, da marca WEG, modelo CFW-C5.

O movimento transversal do rebolo foi controlado por outro um inversor de frequência de 220V, 2 CV, do fabricante WEG, modelo CFW-C2. Desta forma ajustou-se o tempo da dressagem em relação à frequência de saída do inversor de frequência. A Figura 16 mostra os dois inversores montados no painel de energia.



Figura 16 Inversores Utilizados

3.6. Medição das Correntes e Tensões Elétricas

Para as medições das potências elétricas, dois módulos foram construídos, sendo um para a medida da corrente e tensão de entrada do inversor de frequência, e o outro para a medida da corrente e tensão de saída do inversor, correspondente à energia que alimenta o motor de indução trifásico de 7,5 CV, responsável pelo acionamento do eixo árvore da retificadora. A potência foi obtida multiplicando-se os sinais das tensões e corrente elétricas e



tomando-se as médias. A medição da potência elétrica apenas na entrada do inversor pode não corresponder diretamente à força de corte, uma vez que o inversor de frequência modifica a dinâmica do processo de energização dos enrolamentos do motor e, conseqüentemente, sua resposta transitória.

Para a medição da corrente elétrica, utilizou-se um sensor de efeito Hall AS-20S, do fabricante Nana Eletronics Co., Ltd, e para a medição da tensão elétrica um sensor de tensão elétrica baseado no efeito hall, do fabricante LEM, modelo LV 25-P. As Figura 17 e Figura 18 mostram os sensores utilizados para medição da corrente e tensão elétricas, respectivamente. Esses componentes possuem saídas muito lineares, por possuírem componentes que realizam a compensação de não linearidades. Componentes como transformadores de tensão e corrente serviriam para tal aplicação e são baratos, porém não possuem boa linearidade por apresentarem problemas de saturação dos núcleos, e devido a esse fato não apresentariam a confiabilidade requerida.

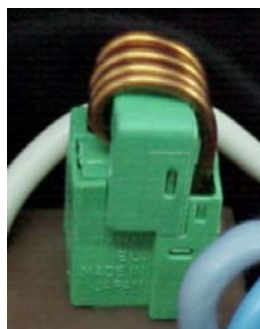


Figura 17 Sensor Hall Utilizado na Medição da Corrente Elétrica

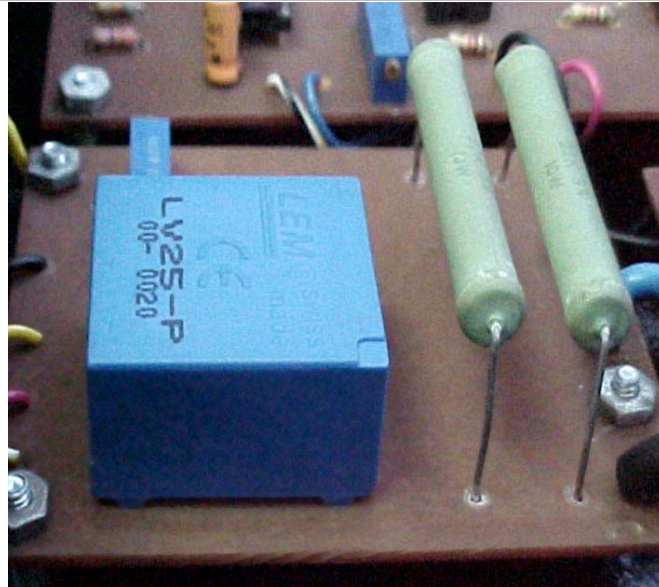


Figura 18 Sensor de Tensão

Inicialmente, o projeto previa a construção de um circuito que coletasse os sinais de corrente e tensão e os multiplicasse por meio de um circuito integrado analógico próprio para essa função. Esse circuito foi construído com um circuito integrado MPY634KP, que é um multiplicador analógico. Tomando-se o sinal de saída do multiplicador ter-se-ia a potência ativa do motor com o uso de um filtro passa-baixa, para se ter a média do sinal multiplicado. Esse filtro constituía-se de capacitores e resistores para a obtenção da média da potência, obtendo-se assim a potência ativa do motor. Entretanto, o filtro passa baixa possuía frequência de corte abaixo de 1Hz e os sinais de potência levavam mais de 1 segundo para atingir o valor de estado estacionário, sendo este tempo considerado elevado para este tipo de medição, uma vez que a duração de cada passada era de aproximadamente 3 segundos. Por outro lado, o uso de capacitores de menor valor faria com que o sinal da potência atingisse o valor máximo mais rapidamente, mas introduzindo muito ruído no sinal de potência medido. Além disso, para a medição da potência na saída do inversor ainda seriam necessárias outras manipulações do sinal de corrente e tensão, uma vez que a saída é trifásica e não senoidal. Em razão dessas dificuldades optou-se por empregar um circuito que forneça o sinal da corrente e da tensão elétrica diretamente para a placa de aquisição de dados.. A medida da potência ativa



foi realizada em análises posteriores, durante o tratamento dos sinais. A Figura 19 mostra o diagrama esquemático dos módulos dos sensores.

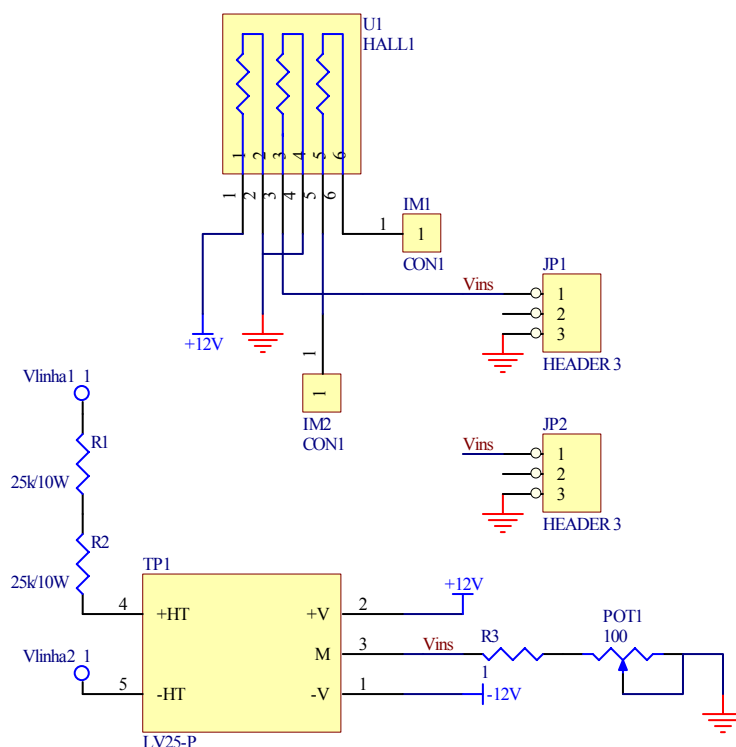


Figura 19 Diagrama dos Módulos dos Sensores

Para a medida de tensão, uma corrente proporcional à tensão deve atravessar um resistor externo, cujo valor é selecionado de acordo com a tensão máxima a ser medida, e instalado em série com o circuito primário do transdutor. Para uma tensão máxima de 550V é necessário um resistor de 50k Ω /10W, sendo utilizado no circuito os resistores R1 e R2 em série. Foi necessário acrescentar o resistor R3 e o *trimpot* Pot1, uma vez que a saída do sensor de tensão é em corrente, com máximo de 20mA. O *trimpot* permite o ajuste do nível de tensão desejado na saída.

Após a aquisição dos sinais de tensão e corrente pelos módulos faz-se um condicionamento desses sinais, para que fiquem compatíveis com as entradas da placa de aquisição. Para isso, foi desenvolvido um módulo condicionador de sinais, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 20.

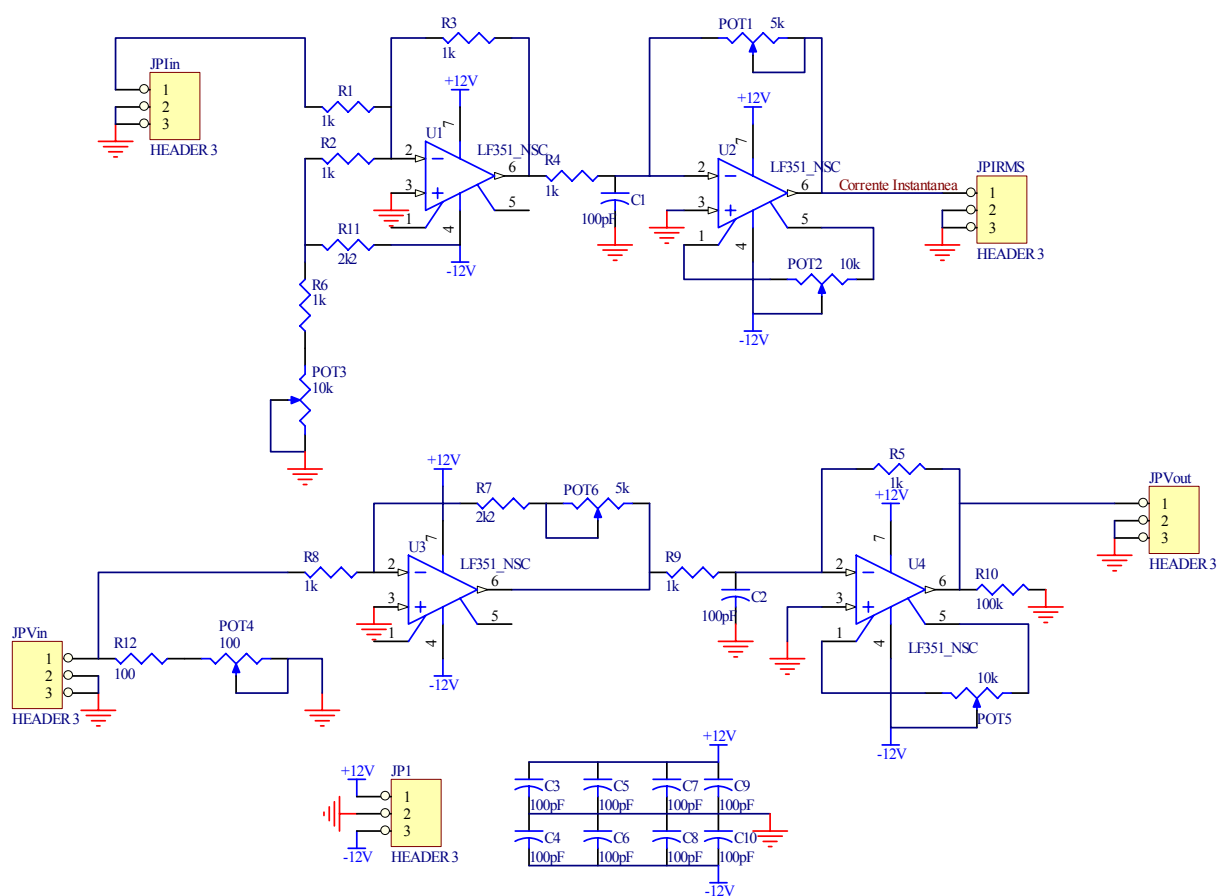




Figura 21 Módulo Curvopower2 Utilizado nos Ensaios

Optou-se por medir a tensão e a corrente antes e após o inversor de frequência e calcular os valores das potências antes e após o inversor durante a análise dos dados.

3.6.1. Calibração

Os módulos de medição e condicionamento dos sinais de tensão e corrente elétrica foram devidamente calibrados para se ter a saída dos sensores em Volts e Ampères. A calibração da tensão foi realizada com a utilização de um transformador variável e um multímetro na escala de tensão alternada, enquanto que a calibração da corrente foi realizada com a utilização de um banco de resistores e o multímetro na escala de corrente alternada. Para a calibração dos módulos de tensão e corrente, obtiveram-se as equações (38) e (39), que foram utilizadas no processamento dos sinais.

$$V_{motor} = 200,42V_V + 0,168 \quad (38)$$

$$I_{motor} = 13,39V_I - 1,1 \quad (39)$$

Onde V_V é a tensão lida pela placa de aquisição correspondente ao canal de tensão, em V; V_{motor} a tensão correspondente em V; V_I a tensão lida pela placa no canal correspondente à corrente, em V; e I_{motor} a corrente elétrica correspondente, em A

As formas de onda das saídas dos módulos foram devidamente conferidas com o auxílio de um osciloscópio digital, do fabricante Tektronix, modelo TDS 340A. O multímetro utilizado na calibração foi o ET-2400, do fabricante Minipa.



As potências elétricas antes e depois do inversor de frequência foram calculadas durante as análises dos sinais, por meio dos sinais da tensão e corrente antes e depois do inversor. A Equação (40) mostra a expressão utilizada no cálculo da potência antes do inversor, enquanto a Equação (41) mostra a expressão da potência depois do inversor.

$$P_{antes} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V(k) \times I(k) \quad (40)$$

$$P_{depois} = V_{rms} \times I_{rms} \times \cos \alpha \quad (41)$$

Sendo N o número de pontos considerados; V_{rms} e I_{rms} tomados em 60Hz ou 50Hz, α o ângulo entre a corrente e tensão.

3.7. Medição da Velocidade do Rebolo

A medição da velocidade do rebolo foi realizada com o uso de um *encoder* industrial blindado, do fabricante ABRAF, modelo TH 10 R 30000. O mesmo foi acoplado junto ao eixo do motor de indução com o auxílio de um acoplamento flexível. A Figura 22 mostra o *encoder* acoplado ao eixo do motor que aciona o rebolo.



Figura 22 Encoder Acoplado ao Motor

A saída do *encoder* é um sinal pulsado, enquanto que a entrada da placa de aquisição deve ser um sinal analógico. Para a conversão do sinal de saída foi construído um módulo que converte os pulsos na saída do “*encoder*” para um sinal de tensão proporcional à velocidade do motor e dentro dos limites da placa de aquisição. A Figura 23 mostra o módulo construído e utilizado nos ensaios.



Figura 23 Módulo para Aquisição da Velocidade

Para a calibração do “*encoder*” foi utilizado um tacômetro digital do fabricante Lutron, modelo DT-2235B. A medida da rotação do rebolo foi realizada com o



posicionamento do eixo do aparelho junto ao centro do rebolo. A Equação (42) de calibração obtida

$$N_s = 359,04 \cdot V_c - 17,54 \quad (42)$$

Em que N_s é a rotação do rebolo em rpm e V_c a tensão medida pela placa de aquisição de dados, em Volts

3.8. Medição da Força de Corte

A Medição de força de corte foi realizada com o uso de um dinamômetro piezelétrico do fabricante Kistler – Modelo 5233, que possui três coordenadas: x (perpendicular ao corte), y (tangencial ao corte) e z (normal ao corte). O dinamômetro possui um módulo condicionador de sinais próprio, com os circuitos de filtro e amplificadores devidos, bastando enviar os sinais resultantes para a placa de aquisição de dados.

A Figura 24 (a) mostra o dinamômetro utilizado nos ensaios e a Figura 24 (b) o seu módulo condicionador de sinais.

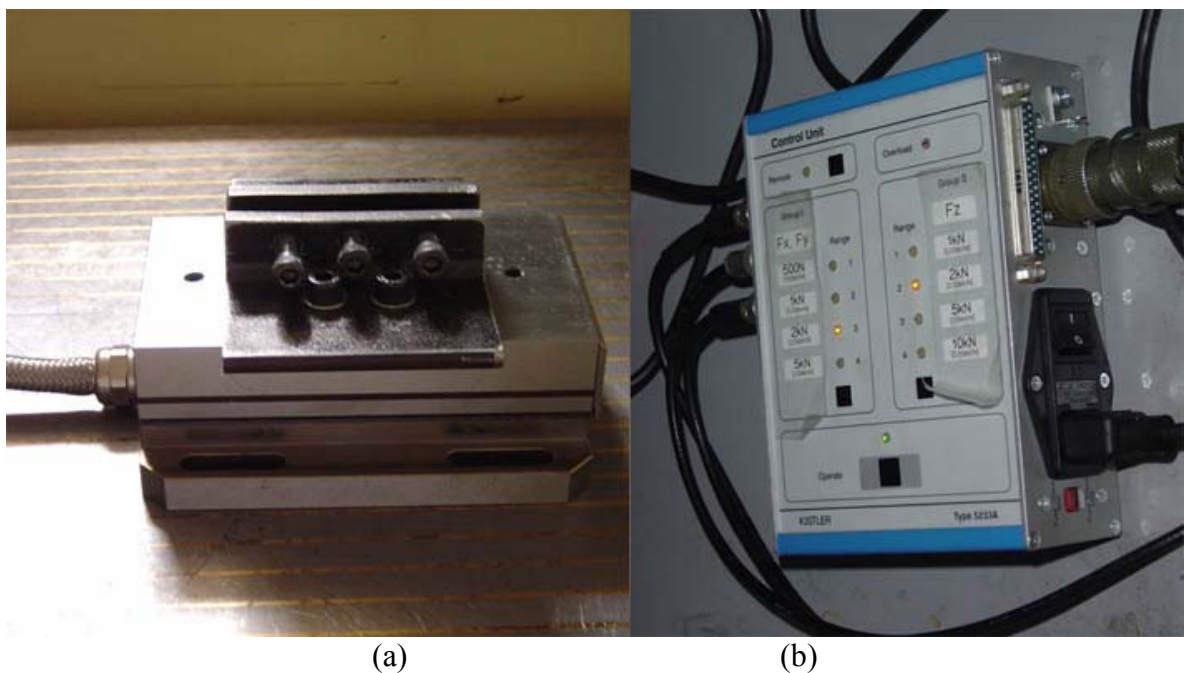


Figura 24 Dinamômetro Utilizado nos Ensaios e seu Condicionador de Sinais



A saída do módulo condicionador de sinais do dinamômetro é calibrada automaticamente, sendo que foi escolhida a escala de 2 kN, ou seja, 2,5 mV/N.

Sabe-se que a potência mecânica é o produto do torque pela velocidade do motor, sendo o torque o produto da força de corte tangencial pelo raio do rebole. Assim, a pode ser calculada de acordo com a Equação (43) .

$$P_{mec} = F_t . r . \omega \quad (43)$$

onde: P_{mec} = Potência mecânica do motor (W), F_t = Força de corte tangencial (N), r = Raio do rebole (0,1729 m), e ω = velocidade do rebole (rad/s)

3.9. Fluido de Corte

Foi utilizado um fluido de corte com a finalidade de reduzir o calor gerado sobre a peça, bem como lubrificar a mesma durante a retificação. A Figura 25 mostra o bocal do fluido de corte utilizado nos ensaios. O fluido de corte utilizado consiste de emulsão em água com óleo solúvel, do fabricante Agena, modelo Agecool 939/B a 4%.



Figura 25 Bocal do Fluido de Corte



3.10. Placa de Aquisição de Dados

A placa de aquisição de dados é responsável pela conversão dos sinais de analógico para digital, para que o computador possa gravar os sinais, que são analisados posteriormente. Para a aquisição dos dados, foi utilizada a placa de aquisição de dados AT-MIO-16E-10, de 12 bits e taxa de amostragem máxima de 100MHz, do fabricante National Instruments, devidamente instalada num microcomputador PC. A referida placa foi configurada e uma interface foi desenvolvida com o software LabVIEW 6.1 para a aquisição e posterior armazenamento dos dados em arquivos. Junto com a placa é utilizado um bloco de conectores do fabricante National Instruments, modelo BNC2110, que tem a função de facilitar a conexão das saídas dos sensores para as entradas da placa.

A taxa de amostragem utilizada nos ensaios foi de 4.000 amostras por segundo, em cada canal.

3.11. Software Para a Aquisição de Dados

O software utilizado na aquisição dos sinais foi desenvolvido com o uso da plataforma LabVIEW 6.1, do desenvolvedor National Instruments.

Os programas desenvolvidos no LabVIEW são chamados de VI's, ou instrumentos virtuais, pois o aspecto final dos programas é semelhante a dos instrumentos de medidas e controle reais. A programação é realizada de forma gráfica, diferente da maioria dos compiladores, que utilizam códigos de programação em uma linguagem escrita própria. A linguagem gráfica do LabVIEW assemelha-se a um diagrama em blocos, sendo bastante intuitiva, e assim proporciona resultados rápidos com boa qualidade visual.

Entretanto, o LabVIEW é uma linguagem interpretativa, ou seja, os códigos são interpretados em tempo de execução, ao contrário da maioria das linguagens de programação, que são compiladas. Essa característica faz com que os programas desenvolvidos



no LabVIEW sejam muito mais lentos que os desenvolvidos em linguagens de programação convencional. Porém, essa desvantagem não supera as vantagens da rapidez, facilidade e confiabilidade com que os programas são construídos. Em vista disso, decidiu-se utilizar o LabVIEW para a aquisição dos sinais.

No LabVIEW, a programação se divide em duas partes. A primeira consiste em construir o chamado “Front Panel”, ou seja, a interface gráfica entre microcomputador e usuário; a segunda parte consiste em implementar a rotina propriamente dita no chamado “Block Diagram”, ou diagrama de blocos.

O programa desenvolvido é responsável pela configuração da placa de aquisição de dados. Após a aquisição dos dados o programa salva os dados adquiridos em um arquivo de texto com o nome especificado pelo usuário.

A Figura 26 mostra a interface do programa construído especialmente para a aquisição dos dados.

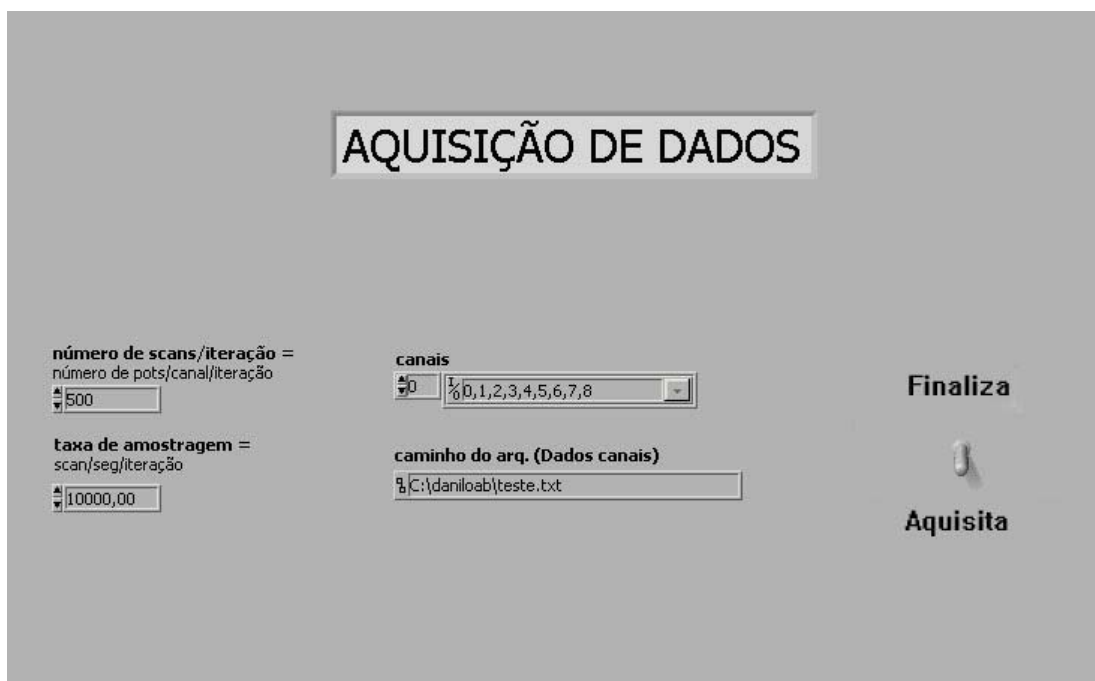


Figura 26 Interface gráfica do programa de aquisição de dados



O programa desenvolvido possui uma interface simples, em que o usuário apenas escolhe o número de amostras, a taxa de amostragem, os canais da placa de aquisição e o nome para o arquivo ser salvo. O diagrama de blocos desenvolvido é mostrado na Figura 27.

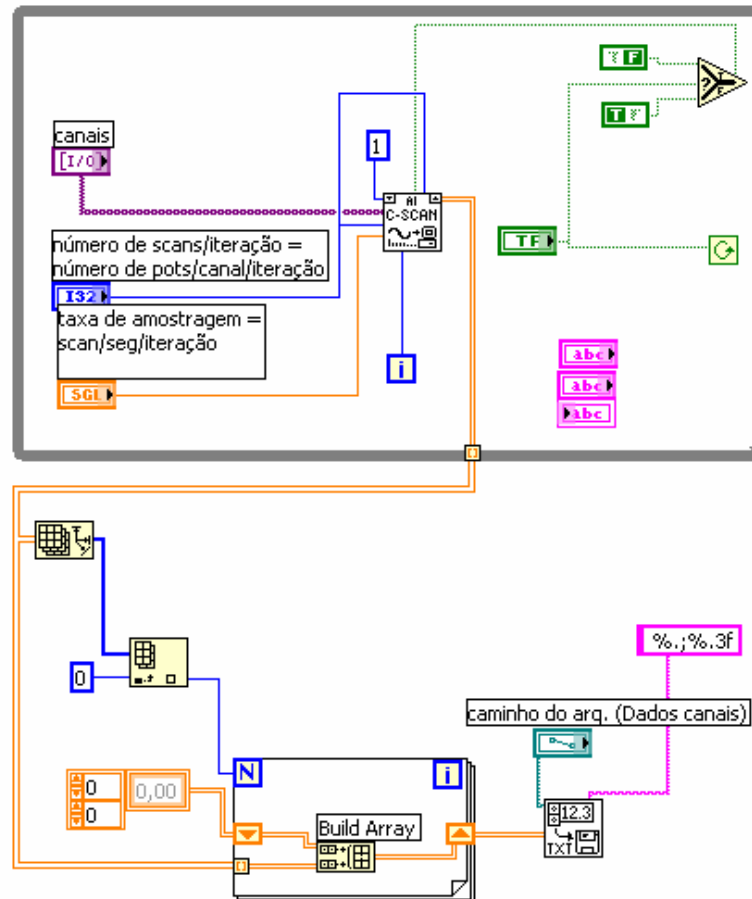


Figura 27 Diagrama do Programa de Aquisição de Dados

No diagrama de blocos do programa há um “loop” principal do tipo “while”, que é executado até que a chave da interface gráfica seja posicionada em “finaliza”. Durante esse intervalo de tempo o programa coleta os dados referentes aos sinais e os armazena em um “buffer”, representado pelo ponto que liga a parte interna do “loop” à parte externa. O bloco “C-Scan” é o responsável por toda a aquisição. É configurado com as entradas “canais”, que indica quais canais serão ativados, “número de scans/iteração”, que indica quantas amostras serão coletadas em cada iteração do “loop”, e “taxa de amostragem”, que é o número de pontos a ser capturados por segundo. O bloco “TF” é uma variável lógica que representa a chave no painel



frontal. Quando essa chave é posicionada em “finaliza” o “loop” é finalizado. Após a finalização do “loop” os dados são ordenados em uma matriz e gravados em um arquivo do tipo texto. Os vetores de dados são convertidos em matrizes no bloco “Build Array”, que esta inserido em uma estrutura de repetição do tipo “for”. O número de colunas é o número de canais ativos e o numero de linhas depende do tempo de aquisição e da taxa de amostragem. O bloco “TXT” é o responsável por salvar a matriz dos dados em um arquivo com o nome definido por “caminho do arq”.

Vários testes foram realizados para verificação do funcionamento do programa, com várias taxas de amostragem, para que não restasse nenhuma dúvida acerca do comportamento do programa.

O LabVIEW também permite trabalhar com o processamento de sinais, uma vez que possui uma biblioteca com recursos próprios para tal fim. Decidiu-se, porém, utilizar o software Matlab por este possuir mais recursos para se operar com sinais e uma arquitetura que permite modificar facilmente a forma como são apresentados os gráficos.

3.12. Montagem do Banco de Ensaios

Durante os ensaios, os módulos de aquisição, condicionamento de sinais, fontes e o computador foram dispostos em uma estante móvel para se ter organização e fácil acesso aos instrumentos. A Figura 28 mostra a disposição dos equipamentos de aquisição de dados utilizados nos ensaios.

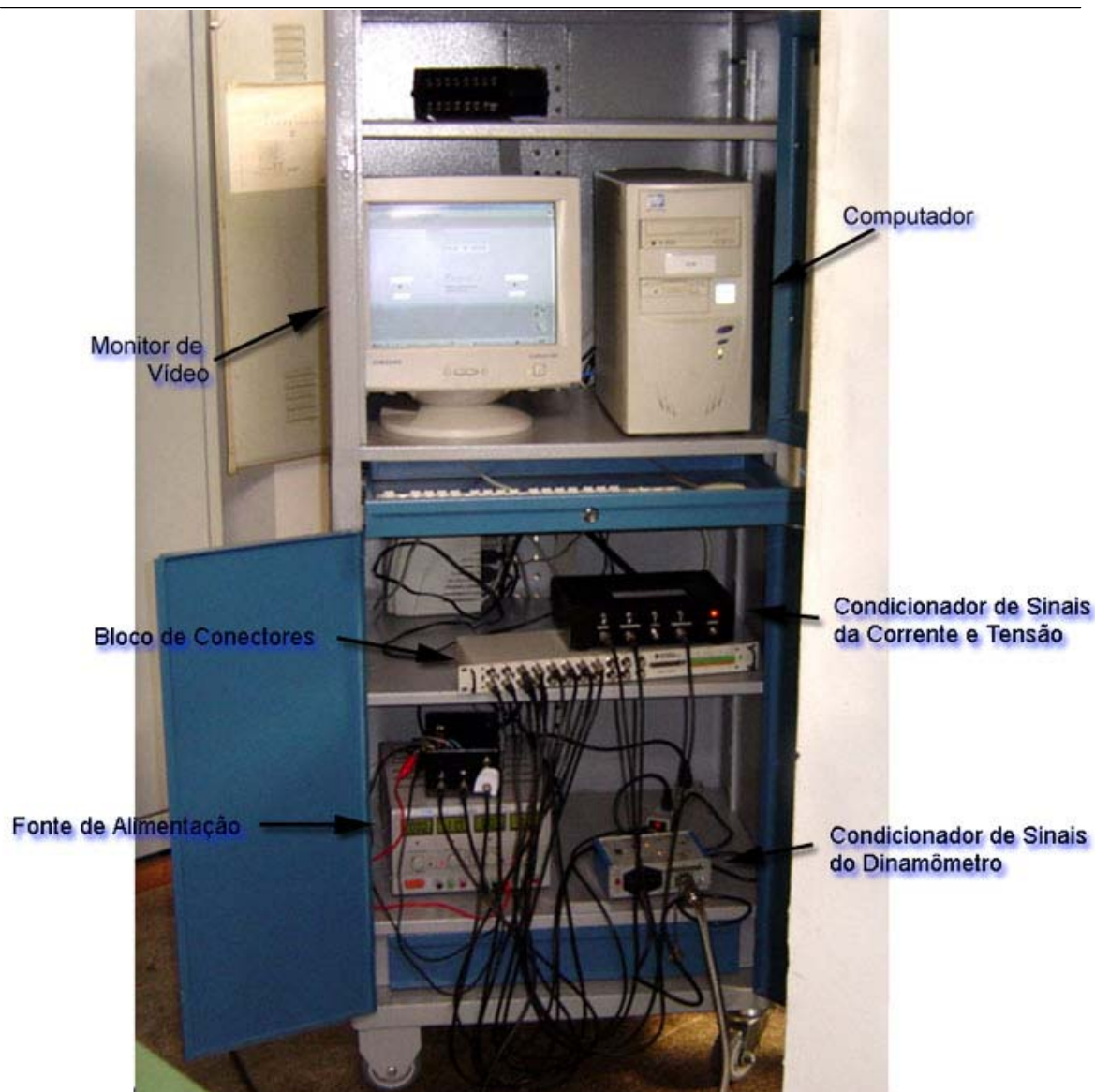


Figura 28 Equipamentos de Aquisição de Dados

O corpo de prova foi parafusado em um suporte de fixação, que por sua vez foi parafusado ao dinamômetro, como mostra a Figura 29.

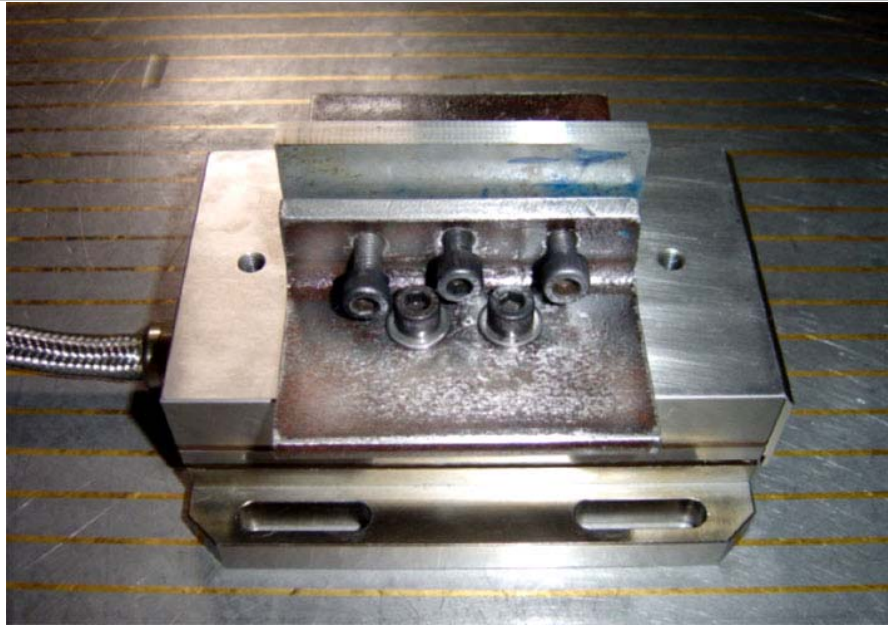


Figura 29 Corpo de prova fixado ao dinamômetro.

No início do ensaio o dinamômetro foi fixado junto à mesa da retificadora e alinhado paralelamente à superfície lateral do rebolo. Este procedimento foi utilizado para uniformizar as condições diante de todos os ensaios realizados.

Após o alinhamento da peça, o magneto da mesa da retificadora foi energizado para garantir uma fixação segura, prevenindo desta maneira que, com o movimento da mesa e o contato com o rebolo, a peça se deslocasse e comprometesse os resultados do ensaio.

A Figura 30 mostra o processo de retificação sendo realizado.

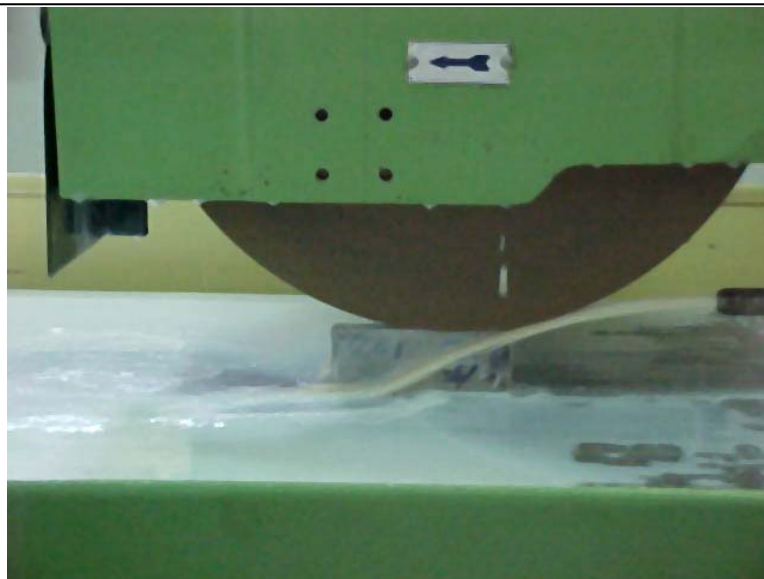


Figura 30 Processo de Retificação

Após o posicionamento correto do corpo de prova, a superfície a ser usinada deve ser nivelada, pois apresenta irregularidades que podem alterar a distribuição da força de corte na interface rebolo-peça. Se esta operação for ignorada, pode-se ter uma região da peça onde o volume removido será maior e conseqüentemente a potência e a força necessárias para esta operação também serão maiores. Em outra região com características opostas pode apresentar redução das forças. Esta é uma situação indesejada neste trabalho, pois o objetivo é coletar sinais de potência uniformemente em toda a superfície da peça.

Para uniformizar a superfície deve-se fornecer um avanço gradual, da ordem de microns, do rebolo em direção à peça. Assim que o rebolo retificar por igual toda a superfície, finaliza-se a operação de uniformização da superfície.

3.13. Operação de Dressagem

Com o procedimento constante da operação de retificação, o rebolo apresenta desgaste em sua superfície. Caso fossem realizados todos os ensaios sem o uso da dressagem, ter-se-iam padrões diferentes para o início e final do ensaio, mesmo mantendo-se constantes os



outros parâmetros da retificação. Nessas condições a força de corte seria maior a medida que os ensaios fossem acontecendo devido ao desgaste do rebolo.

A dressagem do rebolo foi realizada antes de cada ensaio, utilizando-se o grau de recobrimento igual a 1,5, o qual caracteriza uma dressagem para retificação de desbaste. A retificação de desbaste é a que apresenta maiores forças de corte.

3.14. Determinação da Velocidade da Mesa

A velocidade da mesa foi constante durante os ensaios. Seu valor foi medido com o uso de um medidor digital da Lutron, modelo DT-2235B, sendo ajustada em 0,044m/s.

Mediu-se a velocidade tangencial da mesa da retificadora colocando-se a ponta do medidor em um ponto móvel da mesa. A operação de ajuste da velocidade tangencial da mesa pode ser visualizada na Figura 31.



Figura 31 Ajuste da Velocidade Tangencial da Mesa



3.15. Operação de Retificação

A operação de retificação foi definida como uma única passada do rebolo sobre a peça para uma dada profundidade de corte. Os parâmetros de ensaio foram mantidos constantes, ou seja, $V_w = 0,044\text{m/s}$ e $U_d = 1,5$, variando-se apenas a profundidade de corte e a frequência de saída do inversor de frequência. Foram obtidos ensaios para profundidades de corte de $10\mu\text{m}$ a $60\mu\text{m}$, em intervalos de $10\mu\text{m}$; e frequências de saída do inversor de 50Hz e 60Hz. Para cada profundidade de corte foram realizados três ensaios.

Os dados dos ensaios foram gravados em arquivos tipo “texto”, os quais continham colunas de dados que correspondiam a tensão elétrica (antes e depois do inversor de frequência), corrente elétrica (antes e depois do inversor de frequência), forças tangencial, normal e transversal e velocidade do rebolo.

3.16. Processamento dos Dados

Todos os dados coletados foram processados utilizando-se o software Matlab, na versão 6.5. A vantagem em relação a outros programas é que ele possui diversas ferramentas para análise de sinais, além de ser flexível quanto à mudança no código e no formato dos gráficos.

O processamento consistiu primeiramente na mudança do formato dos arquivos de dados. Os sinais foram gravados em arquivos do tipo “texto”, em formato de matriz contendo o valor lido em cada canal da placa de aquisição, em Volts. No processamento os sinais foram convertidos para as devidas escalas físicas reais, sendo tensão em V, corrente em A, potência elétrica em W, velocidade do rebolo em rpm e forças em kN.

Após esse procedimento utilizou-se um filtro passa-baixa para retirar os ruídos indesejados, presentes nos sinais de força. Para tanto foi desenvolvido um filtro do tipo Butterworth com frequência de corte de 30Hz e ordem 4. As potências elétricas antes e depois



do inversor de frequência foram calculadas com o uso dos sinais de corrente e tensão elétricas. Para os sinais de corrente e tensão elétricas antes e após o inversor foram calculados seus respectivos valores em RMS. Foram ainda calculados os valores de potência mecânica, a partir dos sinais de força de corte e velocidade do rebolo, de acordo com a Equação (43).

Para a conversão foi implementada a rotina denominada “Converte”, que se encontra no anexo II. Dentro da rotina “converte” se encontram mais duas rotinas: “filtering” e “plotar”. A primeira é responsável por filtrar o sinal de velocidade e das forças, visto que apresentaram ruído relativamente elevado. A rotina “plotar” foi desenvolvida com o objetivo de automatizar a construção dos gráficos, com as respectivas legendas e títulos.

3.17. Simulações

Para se ter maior consistência dos resultados e maior compreensão da relação entre a força de corte e a corrente de alimentação do motor, optou-se por simular o sistema constituído pelo motor e pelo inversor. As simulações foram desenvolvidas no programa de simulação Simulink, que faz parte do Matlab. Sua capacidade de trabalhar com circuitos elétricos, motores e componentes mecânicos simultaneamente o levou a ser escolhido como ferramenta de simulação neste trabalho. Outras vantagens são as possibilidades de apresentar os resultados contínuo ou discreto no tempo e a escolha do método de integração.

Após a escolha do tipo de simulação e da montagem do diagrama a ser simulado, é necessária a escolha do tipo de integração que o Simulink se baseará para encontrar as respostas desejadas. O método de integração escolhido foi o ode4, que é baseado no método de Runge-Kutta de 4ª ordem com passo fixo.

O diagrama do sistema desenvolvido no Simulink/Matlab utilizado na simulação para este trabalho é mostrado na Figura 32

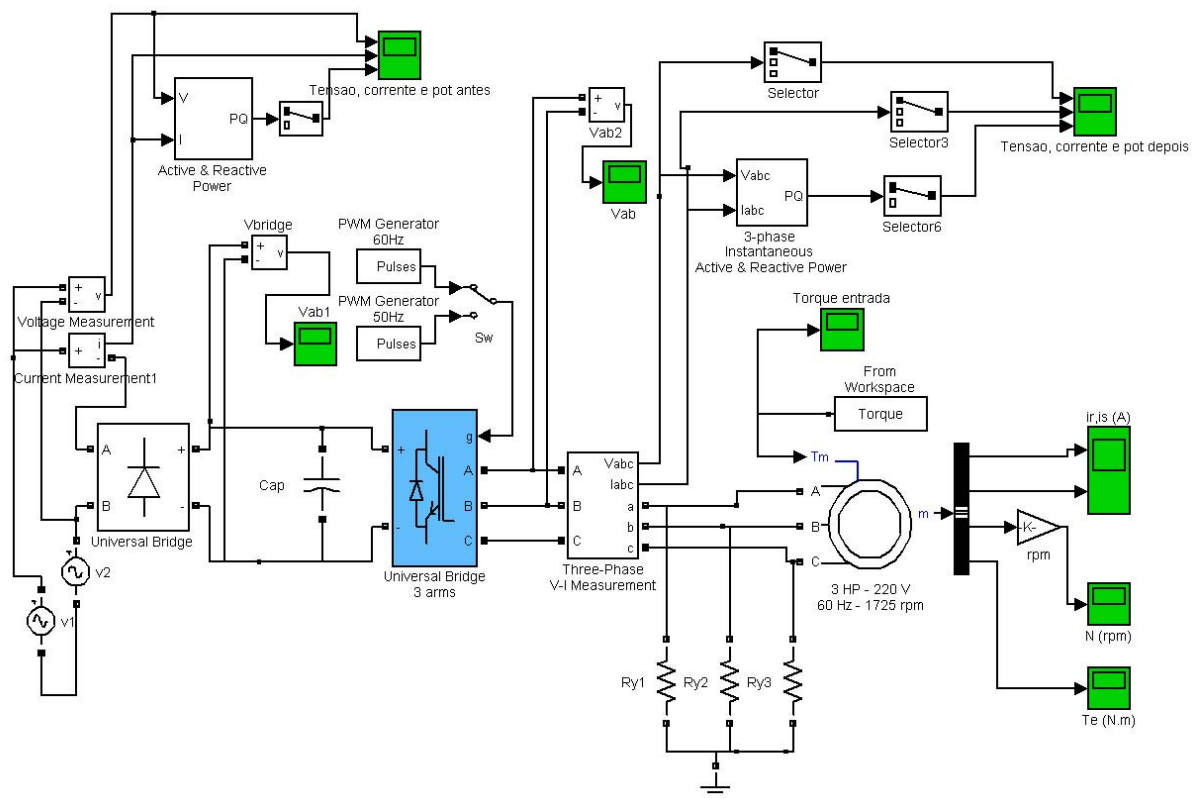


Figura 32 Diagrama da Simulação

O inversor é representado por quatro etapas. A primeira é a ponte universal, representada por um símbolo de um diodo. A segunda etapa é o filtro capacitivo, representado por um capacitor. Os capacitores escolhidos foram de $1000\mu\text{F}$ por serem comumente empregados em inversores de frequência deste porte. A terceira etapa é o gerador PWM, que controla a frequência de chaveamento e a frequência fundamental, sendo a chave Sw responsável pela seleção da frequência desejada. A frequência de chaveamento utilizada foi 10kHz. A última etapa é a ponte de saída trifásica, representada com um símbolo de um IGBT. As resistências Ry1, Ry2 e Ry3 possuem valores elevados e servem para auxiliar a medição das tensões de fase, Va, Vb e Vc, por meio do terra, que é o ponto em comum das resistências.

A tensão de entrada do inversor é representada com duas fontes de tensão senoidais de $220V_{\text{rms}}$ e ângulo de defasagem de 120° . A tensão de saída do inversor de frequência é o correspondente em PWM de uma tensão trifásica de $127V_{\text{rms}}$ em cada fase com



componente fundamental de 50Hz ou 60Hz, que o usuário deve determinar manualmente. O bloco “Three-Phase V-I Measurement” é utilizado para medir a tensão e corrente antes depois do inversor, e os blocos “Voltage Measuret1” e “Current Measuret” são utilizados para medir a tensão e a corrente antes do inversor. O bloco “Active & Reactive Power” recebe os sinais da tensão e corrente antes do inversor de frequência e calcula a potência ativa e reativa, sendo a potência ativa escolhida por meio do seletor que recebe o sinal. O bloco “Active & Reactive Power” recebe os sinais da tensão e corrente antes do inversor de frequência e calcula a potência ativa e reativa, sendo a potência ativa escolhida por meio do seletor.

O motor é representado pelo bloco “Motor”, que pertence à biblioteca “SimPowerSystems” do Simulink e é baseado no modelo DQ, descrito na seção 2.4.1. A parte elétrica do motor é representada por um modelo de espaço de estado de quarta ordem e a parte mecânica por um sistema de segunda ordem. Todas as variáveis elétricas e parâmetros são referidos ao estator.

Alguns dos parâmetros requeridos pelo programa foram obtidos com ensaios previamente realizados no motor de indução trifásico que aciona o rebolo da retificadora plana utilizada no trabalho (7,5 Hp – 4 pólos). Os valores obtidos foram os seguintes:

- Resistência do Estator (R_s): 0,3 Ω
- Indutância do Estator (L_s): 0,0015 H
- Resistência do Rotor (R_r): 0,15 Ω
- Indutância do Rotor (L_r): 0,0007 H
- Indutância Mútua (L_m): 0,035 H

Os demais parâmetros foram obtidos nas especificações do motor disponíveis pelo fabricante, que constam no Anexo I. A Figura 33 mostra os valores dos parâmetros do motor de indução utilizado na retificadora sendo inseridos na janela de configurações do Simulink.



Block Parameters: 3 HP - 220 V 60 Hz - 1725 rpm

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

You can specify initial values for stator and rotor currents. In the Initial conditions parameter you have the possibility to specify the stator current only :

[s() th(deg) isa,isb,isc(p.u.) pha,phb,phc(deg)]:

Or you can choose to enter the stator and the rotor initial currents:

[s() th(deg) isa,isb,isc(p.u.) pha,phb,phc(deg) ira,irb,irc(pu) pha,phb,phc]:

Parameters

Rotor type: **Squirrel-cage**

Reference frame: **Stationary**

Nom. power,L-L volt. and freq. [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:

[7.5*746, 380, 60]

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.3 2*1.5e-3]

Rotor [Rr(ohm) Llr(H)]:

[0.15 0.7e-3]

Mutual inductance Lm (H):

35e-3

Inertia,friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.089 0 2]

Initial conditions (read the details in the description above)

[1,0 0,0,0 0,0,0]

OK Cancel Help Apply

Figura 33 Parâmetros do Motor inseridos no Simulink



4. Resultados e Discussões

A partir dos métodos descritos na seção Materiais e Métodos elaboraram-se os ensaios e as simulações envolvendo a retificação plana tangencial com a finalidade de se comparar o comportamento da potência elétrica consumida pelo motor e pelo inversor de frequência com a força de corte medida por meio de um dinamômetro.

Nos ensaios 01, 02 e 03 foram tomados todos os valores com o motor operando em vazio, ou seja, sem realizar uma retificação e com frequência de saída do inversor de 50 Hz. Nos ensaios 22, 23 e 24 foram tomados os valores para uma frequência de 60 Hz.

Todas as aquisições foram realizadas com taxa de amostragem de 4 kHz e com aproximadamente 10 segundos, o que resulta em aproximadamente 40.000 pontos por ensaio para cada variável medida.

A Figura 34 indica as formas de onda de tensão, corrente e potência elétricas típicas, obtidas antes do inversor de frequência, enquanto a Figura 35 mostra as formas de onda depois do inversor, para o ensaio em 60Hz e 60 μ m.

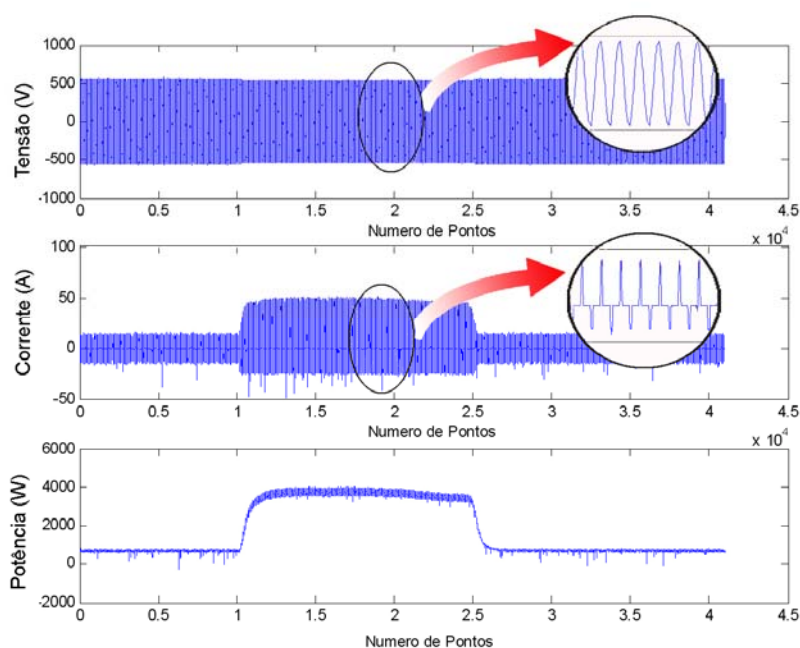


Figura 34 Formas de Onda Medidas Antes do Inversor para 60Hz



Como pode ser observado na Figura 34, a forma de onda da tensão de alimentação do inversor de frequência é uma senóide, enquanto que a corrente é um sinal com um pulso a cada pico da tensão. Isso é a resposta característica de um retificador monofásico, que é a primeira etapa do circuito eletrônico do inversor.

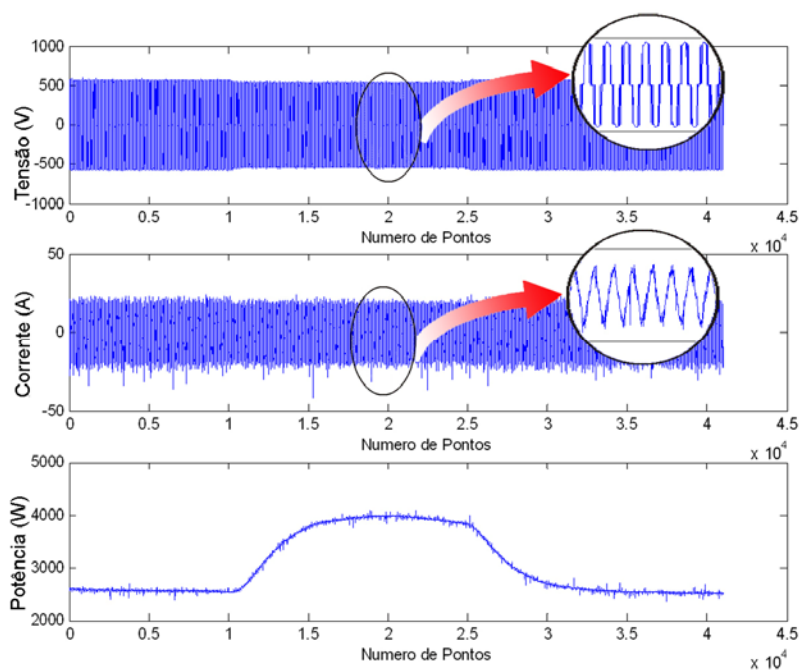


Figura 35 Formas de Onda Medidas Depois do Inversor

Observa-se ainda que nos gráficos da Figura 35 a tensão medida após o inversor de frequência é um sinal típico de saída de um conversor PWM. A corrente se aproxima de uma senóide em razão de os enrolamentos do motor de indução se comportarem como indutores, formando um filtro passa-baixa.

A Figura 36 mostra os gráficos das forças e potências do ensaio com 60 Hz de frequência de saída do inversor e 60 μ m de profundidade de corte.

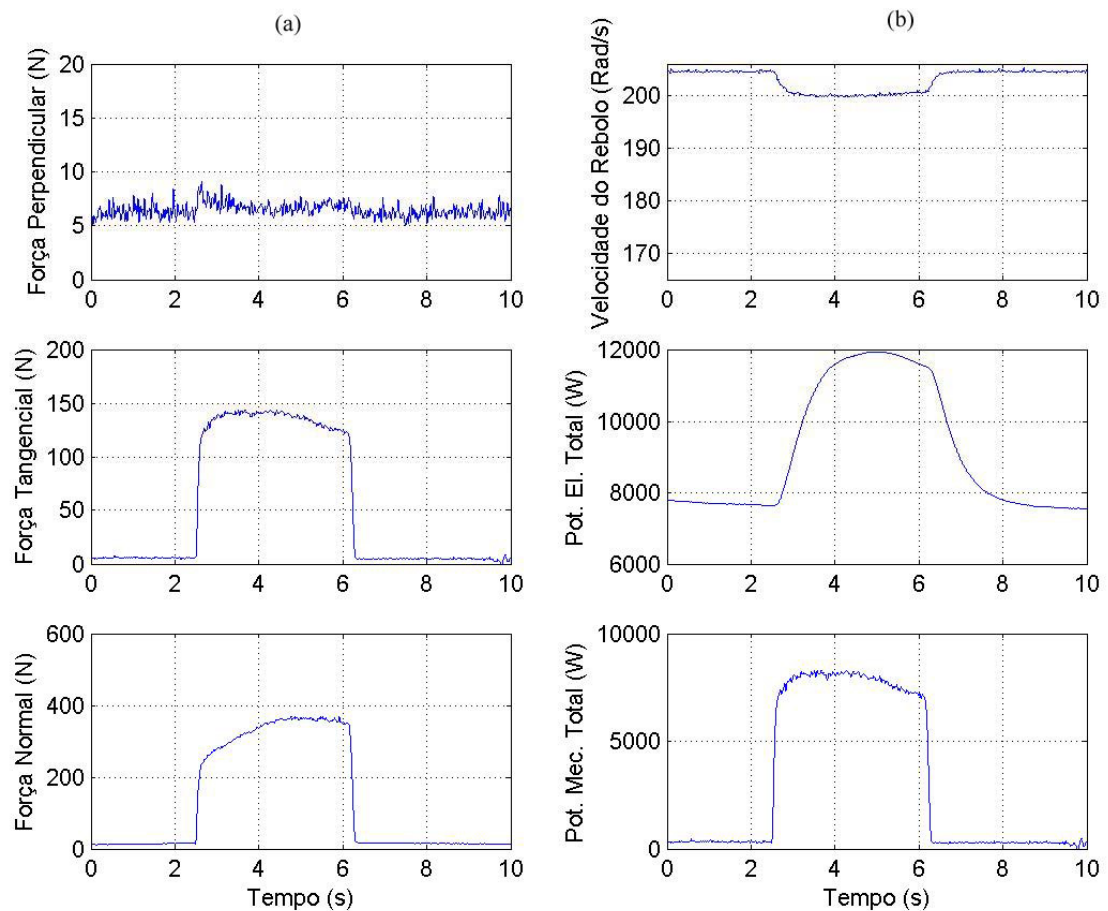


Figura 36 (a) Sinais de força perpendicular, tangencial e normal, todos em (N); (b) Sinais de velocidade (rad/s), potência elétrica (W) e potência mecânica (W)

As medidas de força normal, tangencial e perpendicular apresentaram ruído relativamente excessivo e em conta disso utilizou-se um filtro passa baixa do tipo Butterworth com frequência de corte de 30Hz e ordem 4, durante as análises dos sinais.

O sinal do torque exercido foi obtido multiplicando-se os sinais de força tangencial pelo raio do rebolo. Multiplicando os sinais de torque e velocidade, obteve-se o sinal de potência mecânica. Finalmente, a partir dos sinais de corrente e tensão elétricas, as potências elétricas consumidas pelo motor e inversor foram calculadas. Pode-se verificar que a força perpendicular apresenta uma variação muito pequena, o que é esperado, uma vez que esta não tem relação com os movimentos envolvidos no processo. Uma variação maior nesta força pode indicar problemas, como o desbalanceamento do rebolo.



Embora as forças perpendiculares e normais também fossem medidas pelo sistema de aquisição empregado, as mesmas não serão consideradas para as análises devido ao foco principal deste trabalho, que visa a um estudo comparativo da potência mecânica e das potências elétricas.

De posse de todos os sinais e das rotinas computacionais descritas no Anexo II construiu-se a Tabela 1, na qual estão registrados os valores das potências elétricas antes e depois do inversor de frequência e a potência mecânica de corte durante a usinagem em cada ensaio, bem como a média dos valores dos três ensaios realizados em cada profundidade de corte. Os ensaios em vazio não foram incluídos nesta tabela, por não apresentarem força de corte e potência mecânica. Todos os valores foram considerados durante a passada, excluindo-se os pontos em que o rebolo não esteve em contato com a peça.

Tabela 1 Potências Médias Obtidas

Ensaio	Condições	Pot. Elét. Antes (W)	Pot. Elétrica Média (W)	Pot. Elét. Depois (W)	Pot. Elétrica Média (W)	Pot. Mec.(W)	Pot. Mec. Média (W)	Pot. Mec. Média (CV)
4	50 Hz - 10 μm	1628,2	1359,5	1244,1	1157,9	761,0	625,7	0,9
5		957,1		1106,0		552,9		
6		1493,1		1123,7		563,1		
7	50 Hz - 20 μm	2052,7	2054,8	1665,7	1644,4	1109,6	1090,0	1,5
8		2016,3		1622,9		1059,7		
9		2095,5		1644,6		1100,8		
10	50 Hz - 30 μm	4784,2	3848,1	4155,1	3265,9	3166,3	2510,3	3,4
11		3114,6		2518,0		1978,6		
12		3645,5		3124,7		2386,1		
13	50 Hz - 40 μm	4544,4	4736,0	3948,8	4132,9	3055,6	3160,6	4,3
14		4306,1		3731,0		2868,2		
15		5357,5		4719,0		3558,1		
16	50 Hz - 50 μm	5028,1	4960,5	4400,3	4311,6	3347,9	3319,4	4,5
17		4962,0		4312,2		3339,4		
18		4891,4		4222,2		3270,9		
19	50 Hz - 60 μm	5489,9	5403,0	4847,3	4753,8	3727,6	3669,4	5,0
20		5458,3		4776,8		3709,9		
21		5261,0		4637,3		3570,8		
25	60 Hz - 10	1554,0	1561,8	989,0	1106,6	582,6	545,5	0,7



26	μm	1566,3		1364,8		542,9		
27		1565,0		966,1		511,1		
28	60 Hz - 20 μm	2139,4	2041,0	1354,6	1557,6	993,9	937,9	1,3
29		2034,5		1711,2		954,7		
30		1949,2		1607,1		864,9		
31	60 Hz - 30 μm	2435,3	2367,0	2439,8	1890,1	1296,5	1229,5	1,7
32		2332,5		1611,2		1238,1		
33		2333,3		1619,2		1154,1		
34	60 Hz - 40 μm	5236,7	4771,7	4854,4	4064,6	3477,3	3130,8	4,3
35		4480,4		3598,2		2951,1		
36		4598,2		3741,2		2964,0		
37	60 Hz - 50 μm	6346,8	5814,6	4841,5	5394,5	4312,4	3972,7	5,4
38		5523,2		5424,1		3768,2		
39		5573,9		5918,0		3837,6		
40	60 Hz - 60 μm	6171,9	6121,8	4704,9	4736,9	4176,9	4202,9	5,7
41		6218,4		5006,2		4293,9		
42		5975,1		4499,5		4137,9		

Para se ter melhor visualização dos resultados mostrados na Tabela 1, construiu-se o gráfico da Figura 37, que apresenta a comparação entre as médias dos três valores de potências elétricas antes e após o inversor de frequência, e a potência mecânica, em 50Hz, para cada profundidade de corte, com o respectivo desvio padrão das amostras. A Figura 38 apresenta a mesma comparação para a frequência de 60Hz.

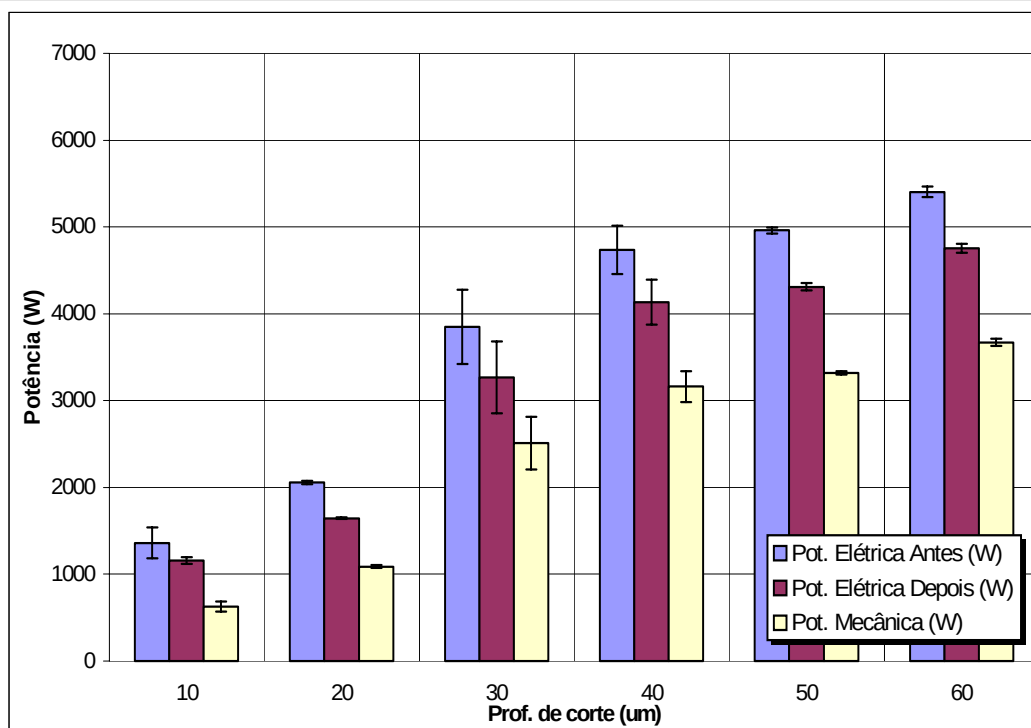


Figura 37 Comparação Entre Potências Elétricas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 50Hz

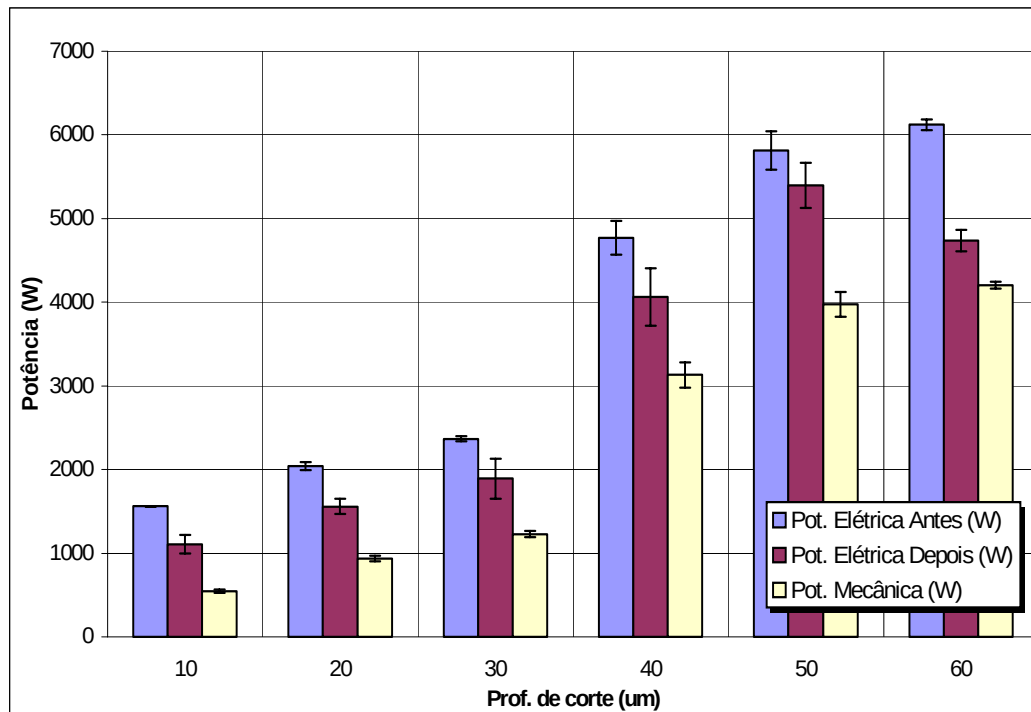


Figura 38 Comparação Entre Potências Elétricas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 60Hz



Os gráficos Figura 37 e Figura 38 indicaram que as potências elétricas medidas antes do inversor apresentaram um comportamento semelhante ao da potência mecânica despendida, para todas as profundidades de corte verificadas.

De acordo com Bianchi (1996), em velocidades de corte maiores a força de corte é menor, uma vez que passam mais grãos para remover a mesma quantidade de material. Desta forma, em 60Hz a força de corte deveria ser menor, porém este comportamento foi pronunciado até 40 μm , sendo que em 50 μm e 60 μm a força de corte foi maior em 60 Hz.

Para profundidades de corte acima de 30 μm a potência elétrica é maior nos ensaios realizados com frequências de 60 Hz quando comparada aos ensaios realizados a 50 Hz em função das perdas mecânicas que são aproximadamente proporcionais à velocidade, e também às perdas por histerese e Foucault. Já a potência mecânica é maior nos ensaios com frequência de 50 Hz, visto que a força de corte é superior a dos ensaios realizados em mesmas condições a 60 Hz

Para efeito de comparação foram traçados também os gráficos envolvendo as simulações. Para tanto foram utilizados os mesmos formatos e escalas dos gráficos mostrados anteriormente. A Figura 39 ilustra o gráfico da comparação entre as potências elétricas simuladas, antes e depois do inversor de frequência e a potência mecânica calculada a partir do dinamômetro para uma frequência de 50 Hz, enquanto que a Figura 40 ilustra o gráfico para 60 Hz.

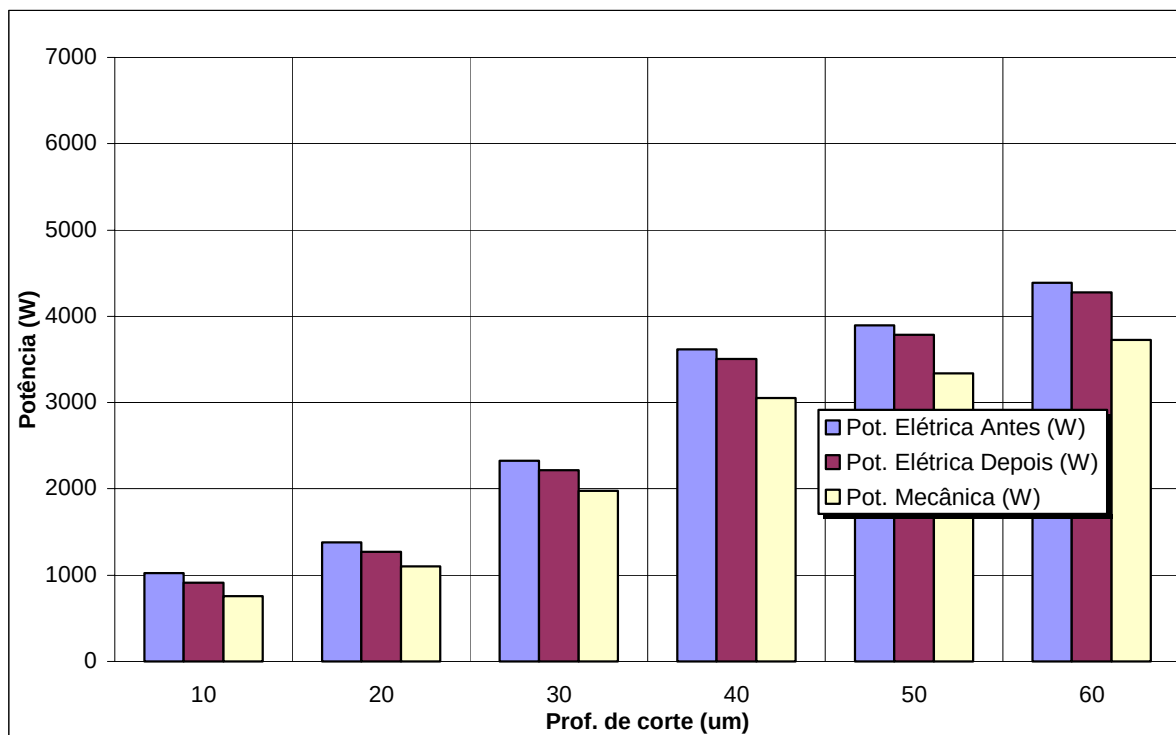


Figura 39 Comparação Entre Potências Elétricas Simuladas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 50Hz

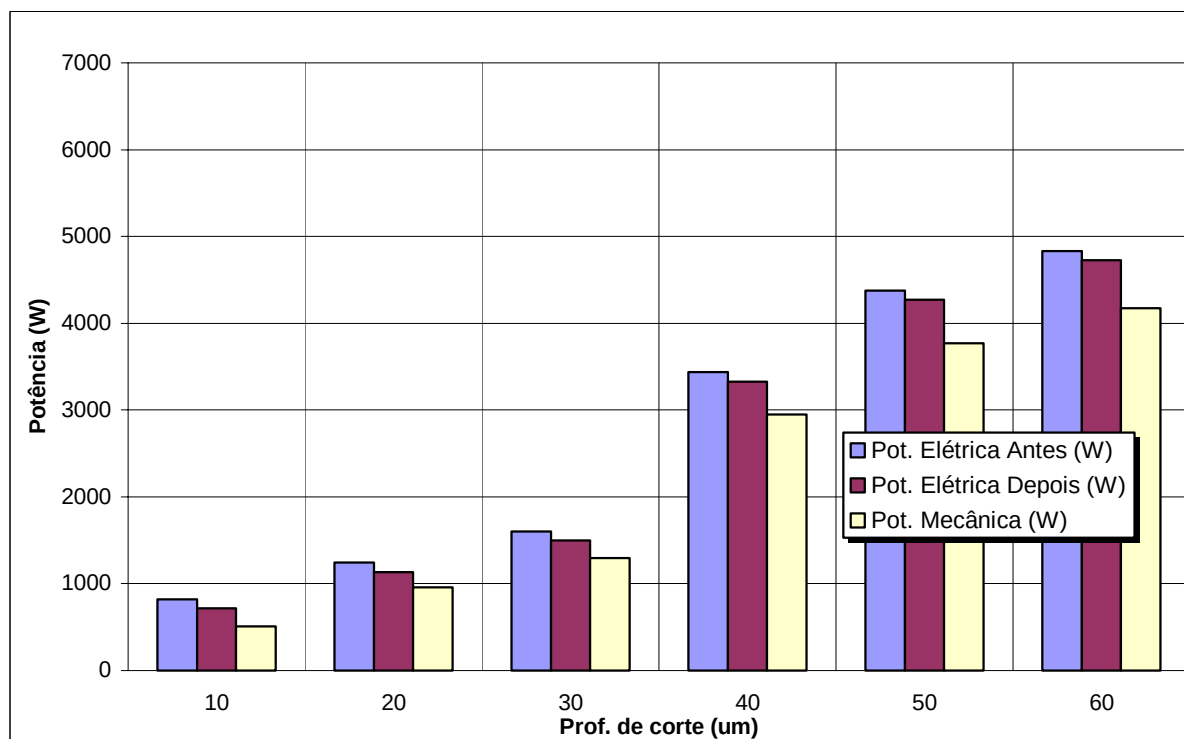


Figura 40 Comparação Entre Potências Elétricas Simuladas Antes e Após o Inversor e a Potência Mecânica, em 60Hz



Em todos os casos as potências elétricas antes e depois do inversor de frequência obtidas nas simulações tiveram comportamentos semelhantes aos obtidos nos ensaios, porém com valores menores devido a menor presença de perdas. Pode-se observar uma diferença considerável entre os valores das potências elétricas antes do inversor e após o inversor dos ensaios. Essa diferença é devido às perdas no inversor de frequência. Nas simulações a diferença foi menor, evidenciando que as perdas não foram totalmente representadas. Os valores das potências elétricas após o inversor nas simulações foram próximos aos dos ensaios, principalmente em profundidades de corte acima de 40 μm . Desta forma o modelo do motor representou bem as perdas elétricas no motor.

A partir dos dados das médias obtidas na Tabela 1 construiriam-se os gráficos das Figura 41 e Figura 42, que indicam as relações entre a potência elétrica consumida pelo motor pela potência mecânica despendida para realizar a retificação, em 50Hz e 60Hz, respectivamente.

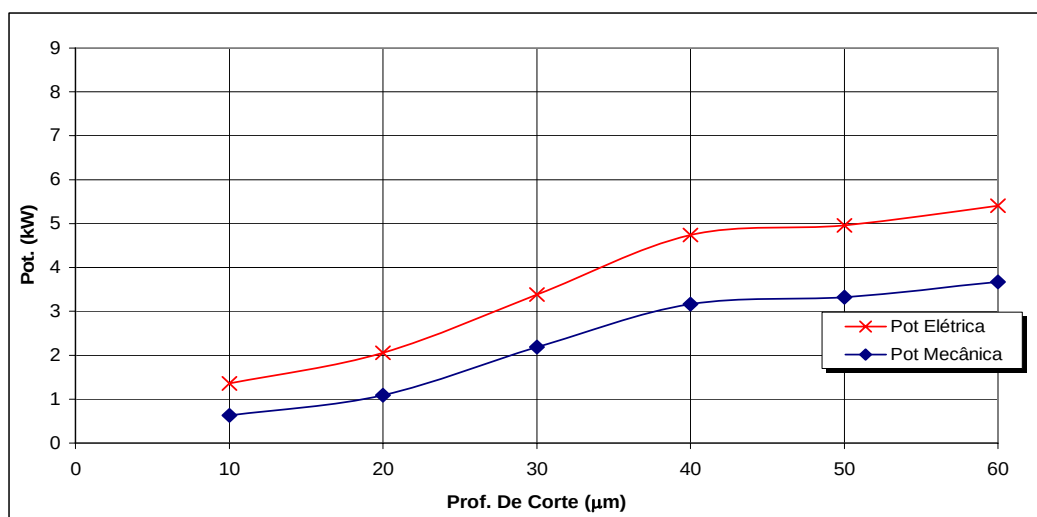


Figura 41 Potências Elétrica e Mecânica em função da profundidade (50 Hz)

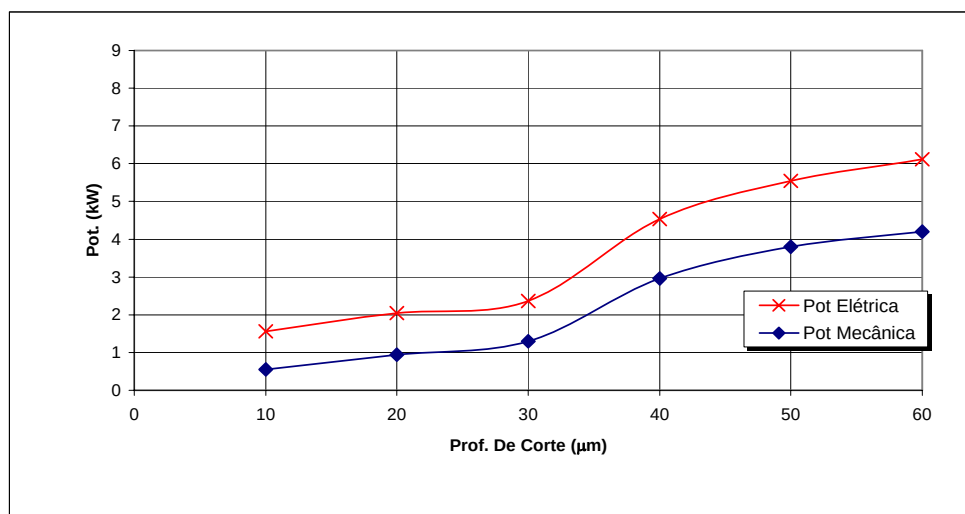


Figura 42 Potências Elétrica e Mecânica em função da profundidade (60 Hz)

A partir dos resultados das Figura 41 e Figura 42 construiu-se também o gráfico da Figura 43, que indica o rendimento do sistema de retificação em 50Hz e 60Hz. O rendimento obtido foi encontrado utilizando a potência mecânica como variável de saída e a potência elétrica na entrada do inversor de frequência como variável de entrada. Também foi traçada uma curva de tendência a partir de uma regressão polinomial de ordem 4. Esta ordem foi escolhida de forma empírica, sendo a curva que mais se aproximou dos pontos. A Figura 44 mostra a mesma gráfico, para o rendimento encontrado nas simulações.

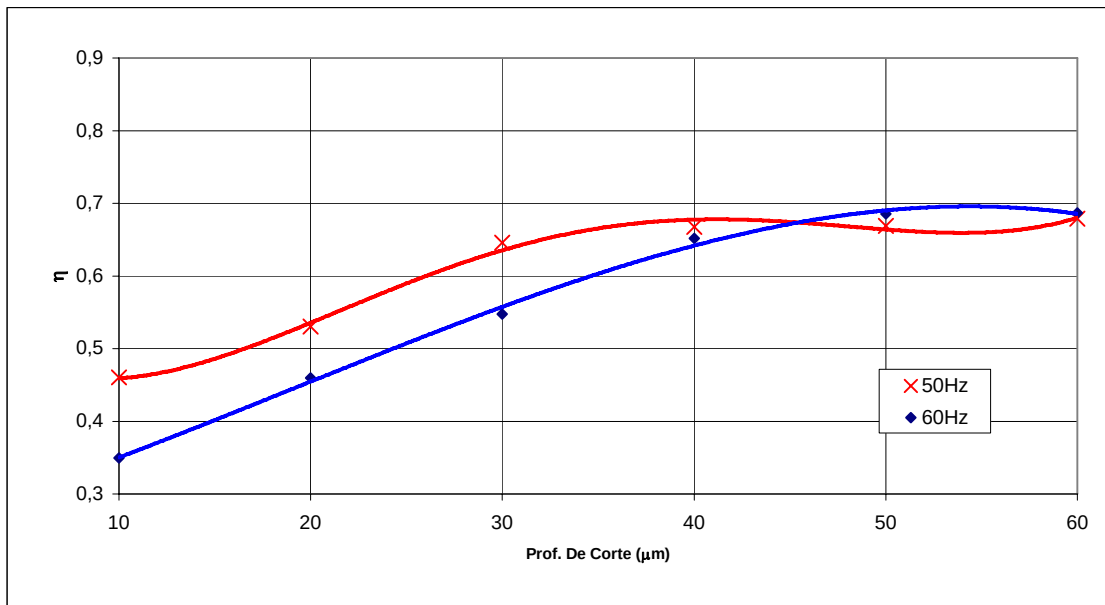


Figura 43 Rendimento do Sistema em Função da Profundidade de Corte para 50Hz e 60Hz

A Equação (44) representa a regressão encontrada para o rendimento em 50Hz, enquanto que a Equação (45) representa a regressão para 60Hz.

$$n = 3.10^{-7} a^4 - 5.10^{-7} a^3 + 0,0021a^2 - 0,0281a + 0,5709 \quad (44)$$

$$n = -6.10^{-10} a^4 - 3.10^{-6} a^3 + 0,0002a^2 + 0,0076a + 0,2613 \quad (45)$$

Onde: n é o rendimento do sistema e a a profundidade de corte, em μm

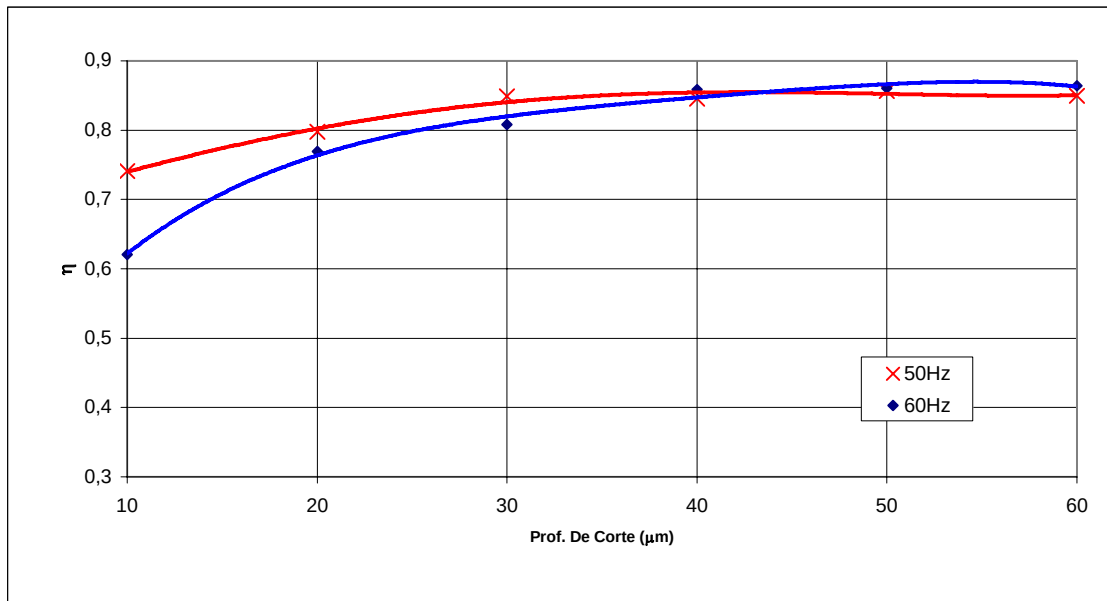


Figura 44 Rendimento do Sistema Simulado em Função da Profundidade de Corte para 50Hz e 60Hz

A Equação (44) representa a regressão encontrada para o rendimento em 50Hz, enquanto que a Equação (45) representa a regressão para 60Hz.

$$n = 3.10^{-8}a^4 - 3.10^{-6}a^3 - 6.10^{-6}a^2 + 0,0082a + 0,6615 \quad (46)$$

$$n = -1.10^{-7}a^4 + 2.10^{-5}a^3 - 0,0015a^2 + 0,0448a + 0,3024 \quad (47)$$

De acordo com a Figura 43, nota-se que não há uma relação linear entre os valores da potência elétrica e a profundidade de corte. Em profundidades de corte menores que 30μm a diferença entre a potência elétrica e a mecânica foi relativamente grande, enquanto que para profundidades de corte acima de 40μm foi menor, indicando que o rendimento do sistema foi maior para profundidades de corte acima desse patamar. Isto é explicado pelo fato de que tanto o motor de indução quanto o inversor de frequência apresentarem rendimentos melhores quanto mais próximos estiverem de suas cargas nominais.

De acordo com a Figura 44, o comportamento do rendimento do sistema em função da profundidade de corte para a simulação apresentou comportamento semelhante ao do sistema real. O rendimento encontrado foi maior que no sistema de retificação utilizado nos



ensaios, devido principalmente às perdas no inversor de frequência, já que nas simulações não representaram todas as perdas nesse dispositivo. O atrito também não foi considerado nas simulações.

O sinal da potência mecânica apresentou um comportamento muito semelhante ao sinal de torque calculado, uma vez que a potência mecânica é calculada pelo produto do torque pela velocidade, sendo esta praticamente constante durante os ensaios.

O rendimento do motor de indução está relacionado à sua carga, sendo que quando mais próxima da carga nominal maior o rendimento. A curva de rendimento do motor fornecida pelo fabricante pode ser observada no Anexo I.

A situação em que o motor apresentou maior rendimento foi nos ensaios realizados a 60 Hz e com profundidade de corte de 60 μm , conforme esperado, pois neste ponto de operação o motor fornecia 5,7CV. De todos os ensaios, esse foi o valor mais próximo do nominal.

Ressalta-se que a potência elétrica foi obtida por meios diferentes nos ensaios e nas simulações, sendo que nas simulações o resultado foi mais preciso, enquanto que nos ensaios uma diferença pequena entre o valor medido e o real era esperada.

Os gráficos da potência elétrica do motor tiveram comportamento próximo dos gráficos das forças de usinagem. Dessa forma, é possível elaborar uma expressão que converta o sinal da potência elétrica em um valor de força de usinagem em situações que não se exija um controle rigoroso. Para um melhor controle, pode ser útil recorrer a técnicas mais aprimoradas, como redes neurais artificiais e lógica *Fuzzy*, uma vez que as perdas no motor de indução e os harmônicos presentes na rede elétrica provocam pequenas alterações no sinal da potência elétrica do motor.



5. Conclusões

Com base nos ensaios realizados e nos resultados obtidos experimentalmente expressos nos gráficos anteriores conclui-se que:

- Quanto maior a carga, ou seja, quanto maior a profundidade de corte, maior é o rendimento do motor de indução que aciona o rebolo.
- As tensões elétricas lidas antes e depois do inversor variaram muito pouco durante os ensaios.
- As simulações desenvolvidas no Simulink apresentaram os resultados esperados, aproximando-se dos resultados obtidos nos ensaios. Dessa forma, é possível prever a resposta de um sistema de usinagem com o uso de um programa de simulação. Com uma simulação pode-se economizar muitos recursos que seriam gastos na calibração de máquinas ferramentas e em peças que deveriam ser usadas em testes.
- Para diferentes frequências de funcionamento do motor têm-se comportamentos de perdas distintos, sendo que quanto maior a frequência, maiores serão as perdas. Assim, deve-se ter uma calibração do sistema de medição para cada frequência de operação do motor.
- É perfeitamente possível substituir o dinamômetro por um sistema de medição da potência elétrica do motor. Embora a relação entre as medidas não seja linear, a correspondência pode ser realizada com equações de 4ª ordem. A substituição apenas pela medida da corrente elétrica do motor é aceitável, embora menos precisa que a potência elétrica.



5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir do trabalho realizado, fazem-se as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Realizar estudos com outros modelos de simulação.
- Realizar uma comparação entre força de corte, corrente elétrica do motor e emissão acústica.
- Realizar um trabalho que envolva a predição da força de corte a partir da potência elétrica do motor, com o uso de ferramentas como redes neurais artificiais e lógica *Fuzzy*.
- A partir de resultados envolvendo Redes Neurais Artificiais e lógica Fuzzy, desenvolver um sistema com a implementação de um algoritmo em um circuito integrado do tipo DSP, para informar a força de corte a partir da potência elétrica do motor em um visor.
- Implementar o controle de uma retificadora CNC a partir do sinal da corrente elétrica do motor e comparar com os métodos tradicionalmente adotados.



6. Referências Bibliográficas

AGUIAR, P. R. “Modelos, Ensaios e Simulações em Máquinas Assíncronas”, Tese de Mestrado, EESC-USP, São Carlos-SP, 1990.

AGUIAR, P. R. “Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1999.

AGUIAR, P. R. “Controle Automático de Danos Térmicos na Usinagem por Abrasão através do Processamento de Sinais de Emissão Acústica e Potência Elétrica”, 2003. Tese de Livre Docência – Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP.

ARONSON, R. B., “Grinding’s Going High-Tech”, Manufacturing Engineering, February 1997, pp. 46-55.

BARBI, IVO “Teoria Fundamental do Motor de Indução”, Ed. da UFSC, 1985, 237p

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A., Fundamentals of Machining and Machine Tools. 2ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1989.

BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA Jr, C. E. e AGUIAR, P. R. “Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Dúcteis”, Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 387-392, 1996.

BIANCHI, E. C. “Ação das Condições de Dressagem na Retificação de Precisão”, Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990.

CAD, M. M. “Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico”, Dissertação de Mestrado apresentada à EESC – USP, São Carlos, 106p, 2000



- CHUNG, CHRIS. “Simulation modeling handbook : a practical approach” CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-1241-8
- CZAKOWSKI, D. “Power Measurements in Adjustable Speed Drives”, IEEE, 1997
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, 3ª edição, Artliber Editora, 2001, ISBN 85-87296-01-9, 244p.
- EL BARADIE, M. A. “Cutting fluids: Part I”, Characterisation. Journal of Materials Processing Technology, Irlanda, vol. 56, p. 786-797, 1996.
- FALCONE, A. G. “Eletrônica: Transformadores e Transdutores, Conversão eletrônica de Energia, Máquinas Elétricas” Ed. Edgard Blücher, 1979, 478pg
- FERNANDES, U. B. “Análise da Influência do Tempo de Centelhamento para Diferentes Métodos de Refrigeração na Retificação”, Dissertação de Mestrado, UNESP, Bauru-SP, 2005.
- FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., C, KUSKO, A. “Máquinas Elétricas – Conversão Eletrônica de Energia Porcessos, Dispositivos e Sistemas”, McGraw-Hill, 1975, 675 pg
- HELLMEISTER, C. F. L. P. “Monitoramento da Dressagem na Retificação Através do Sinal Puro de Emissão Acústica”, Dissertação de Mestrado, UNESP, Bauru-SP, 2004
- HILDEBRAND, E. N., ROEHRDANZ, H. “Losses in Three-Phase Induction Machines Fed by PWM Converter”, Institute for Production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Hannover, 2001
- HOWES, T. D., JOHN WEBSTER, J., MARINESCU, I. “Grinding” em “Unit Manufacturing and Assembly Process”, Modern Manufacturing, Mechanical Engineering Handbook, CRC Press LLC, Ed. Frank Kreith, 1999.
- JENKINS, W.K. “Fourier Series, Fourier Transforms, and the DFT” Digital Signal Processing Handbook, Ed. Vijay K. Madisetti and Douglas B. Williams Boca Raton: CRC Press LLC, 1999



- JEONG, Y. H, CHO, D. W. “Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, pp 1559–1566, Julho, 2002.
- JORDÃO, R. G. “Máquinas Síncronas” Ed. Da Universidade de São Paulo, 1980, 215pg, ISBN 85-216-0013-5
- KING, R. I.; HAHN, R. S. “Handbook of Modern Technology”. 3 New York, Chapman and Hall, 1986.
- KARAM, L.J.; MCCLELLAN, J.H.; SELESNICK, E.W. & BURRUS, C.S. “Digital Filtering”, Digital Signal Processing Handbook Ed. Vijay K. Madisetti and Douglas B. Williams Boca Raton: CRC Press LLC, 1999
- KRAR, S. F. “Grinding Technology”, 2 ed, Delmar Publisher Inc., Albany, NY, 1995, 334p., ISBN 0-8273-6390-7.
- KURFESS, T. R., JENKINS, H. E., DORF, R. C., “Production of High Quality Parts by the Process of Grinding in Manufacturing Systems”, em “Manufacturing Systems Processes”, Vol VI, CRC Press, 2001
- KWAK, J. S.; SIM, S. B.; JEONG, Y. D. “An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method”; International Journal of Machine Tools & Manufacture 46; pp 304–312, Julho de 2005
- LEE, D.-C., LIM, D.-S. “CA Voltage and Current Sensorless Control of Three-Phase PWM Rectifiers”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, nº 6, , pp 833-890, Novembro de 2001
- LEE, E. S., KIM, N. H. “A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, pp 937–951, Dezembro de 2000



- LE-HUY, H., “Modeling and Simulation of Electrical Drives using MATLAB/Simulink and Power System Blockset”, The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Canada, 2001
- LEONHARD, W., “Control of Electrical Drives”, Spring-Verlag, 1985
- LI, X. “Development of Current Sensor for Cutting Force Measurement in Turning”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol 54, nº 1, pp 289-296, Fevereiro, 2005
- LOGUE, D., KREIN, P. T. “Simulation of Electric Machinery and Power Electronics Interfacing Using MATLAB/SIMULINK”, IEEE, 2000.
- MALKIN, S. “Grinding technology: theory and applications of machining abrasives”. England: Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.
- MCCLELLAN, J. H., BURRUS, C. S., OPPENHEIM, A. V., PARKS, T. W., SCHAFER, R. W., SCHUESSLER, H. W. “Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB 5”, Prentice-Hall, New Jersey, 1998, ISBN 0-13-7890009-5, 404p
- MUKHERJEE, S., HOFT, R. G. “Digital Measurement of the Efficiency of Inverter-Induction Machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, nº5, pp 872-879, setembro de 1990
- ONG, C-M., “Dynamic Simulation of Electric Machinery”, Prentice-Hall, New Jersey, 1998, ISBN 0-13-723785-5, 626p
- OOI, B. T., SALMON, J. C., DIXON, J. W., KULKAMI, A. B. “A three-phase controlled-current PWM converter with leading power factor”, Transactions on Industry Applications, vol. 23, pp 78-84, Janeiro de 1987
- PATHARE, S. , GAO, R. , VARGHESE, B., GUO, C., MALKIN, S. “A DSP-Based Telemetric Data Acquisition System for In-Process Monitoring of Grinding Operation” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, St. Paul, Minnesota, USA, pp 191-196, Maio, 1998.



- RAHMAN, M. F., BABURAJ, K. V. , ZHONG, L., GRANTHAM, C. “A New Power Electronics and Electrical Drives Teaching Program Using DSPs and a Non Linear Systems Simulation Language”, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Hong Kong, Julho de 1999
- SALMON, S. C. “Modern Grinding Process Technology”. McGraw-Hill, 1994, ISBN 0-07-054500-6, 225p.
- SHIRAISHI, M., “Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes – Part 3: In-process techniques for cutting process and machine tools”, Precision Engineering, Janeiro de 1989, Vol. 11, no. 1, pp. 39-46.
- SPIEGEL, M. R. “Estatística”, 3 ed., Coleção Schaum, Makron Books, São Paulo, SP, 1983, ISBN 85-3460120-8, 660p.
- SYBILLE, G, BRUNELLE, P. LE-HUY, H., DESSAINT, L. A., AL-HADDAD, K. “Theory and Applications of Power System Blockset, a MATLAB/Simulink-Based Simulation Tool for Power Systems” IEEE, Canada, 2000
- TÖNSHOFF, H. K., KARPUSCHEWSKI, B., REGENT, C., “Process Monitoring in Grinding Using Micromagnetic Techniques”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, pp 694-698
- WONG, L. K., LEUNG, F. H. F., TAM, P. K. S. “Fast Simulation of PWM Inverters using MATLAB”, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, IEEE, July 1999, Hong Kong.
- XIE, X., SONG, O., YAN, G., LIU, W., “MATLAB-based Simulation of Three-level PWM Inverter-fed Motor Speed Control System”, IEEE, 2003.



Anexo I - Especificação do Motor de Indução Trifásico

Responsável Pelo Acionamento do Rebolo da Retificadora

Plana Utilizada

- Fabricante – Eberle
- Potência: 7,5 CV
- Cat. H
- Isol. B
- IP - 55
- Ip/In - 7,8
- Frequência - 60 Hz
- Rotação - 1735 rpm
- F.S. – 1,0

Características de Desempenho															
Linha Standard										Motor: 112M4 7,5 cv 380 V 60 Hz					
Potência		Carcaça (ABNT)	Rotação (rpm)	Corrente		Conjugado			Rendimento			Fator de Potência			Fator de Serviço
(cv)	(kW)			In (A)	Ip (A)	Cn (Kgm)	Cp/Cn %	Cm/Cn %	50%	75%	100%	50%	75%	100%	
7,5	5,50	112M	1735	12,0	90,0	3,100	265	335	84,5	86,5	86,5	0,65	0,76	0,82	1,15

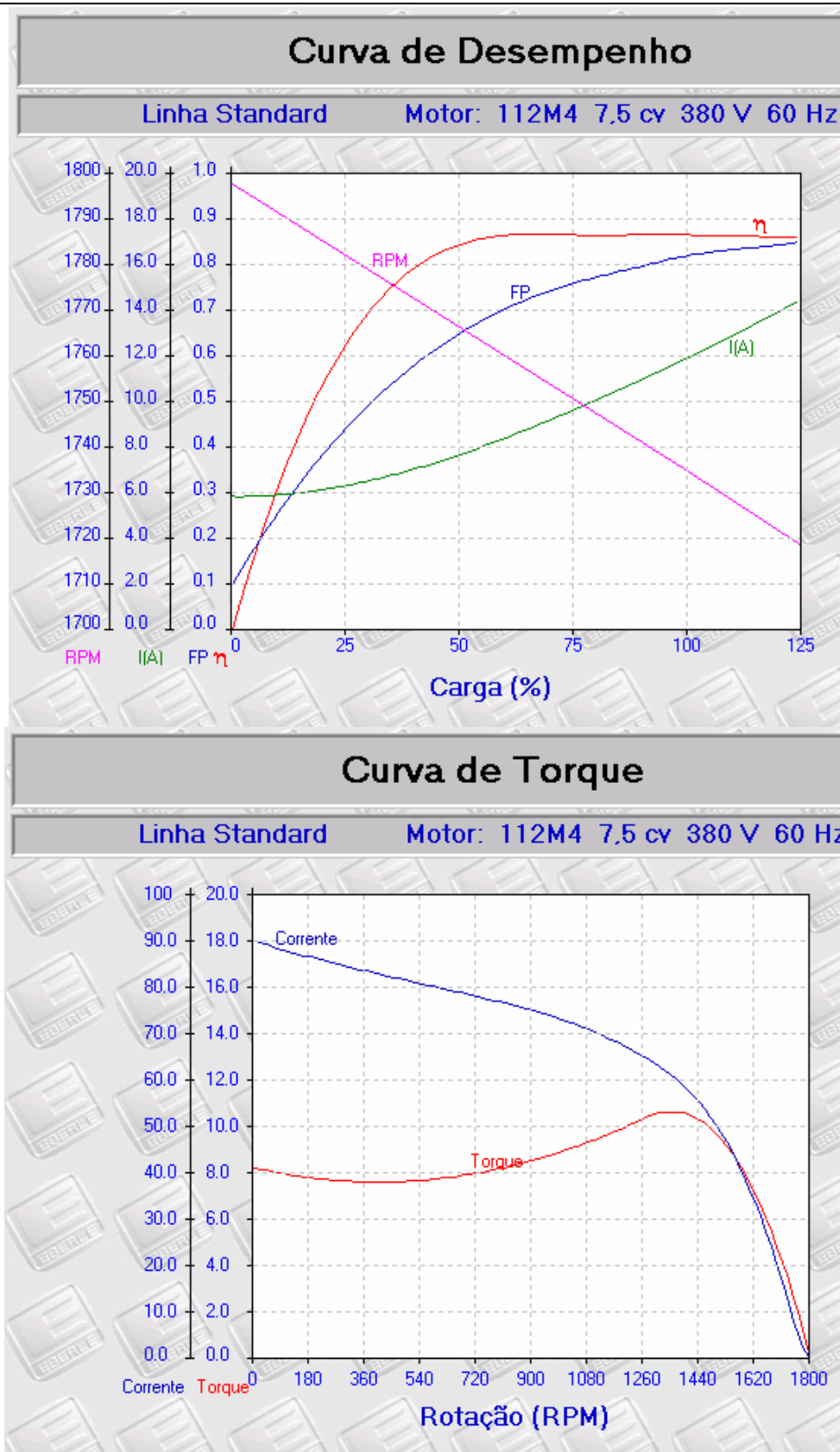
Frequência desejada: ☐ 50 Hz ☒ 60 Hz

Dados Gerais

Potência (cv):	7,5	Rend. nominal:	86,5
Pólos:	4	F.P. nominal:	0,82
Tensão (V):	380	RPM:	1735
Frequência (Hz):	60	Isolação:	B
Carcaça	112M	GD2:	0,0650
I nominal (A):	12,0	Massa (Kg)	42,0
I partida (A):	90,0	TMRT (s):	6
Conjugado (Kgm):	3,100	Ruído (dB):	64



[Folha de dados](#) [Curvas](#) [Características mecânicas](#) [Correção Fator Potência](#) [Tempo de Retorno](#) [Voltar](#)





Anexo II Rotinas Criadas no Matlab

Nesta seção são descritos todos os programas desenvolvidos para facilitar as análises das simulações e dos ensaios. O simulink não permite que os gráficos possam ter os padrões modificados e os apresenta com um fundo preto, que é bem visível na tela do computador, mas que nem sempre é aceitável quando impresso. Apesar disso o simulink permite que as variáveis dos gráficos sejam enviadas à área de trabalho do Matlab, e a partir daí podem ser salvas separadamente e traçadas em gráficos com outros padrões, com a vantagem de não ser necessário realizar a simulação todas as vezes que se deseja visualizar os gráficos, uma vez que as variáveis se encontram salvas em arquivos de dados.

Simulacaoinicia

Este programa verifica se o variável Torque já se encontra carregado e caso não estiver, chama o programa 'simulacaocarrega'

```
%simulacaoinicia

% Este programa verifica se o vetor Torque ja' se
% encontra carregado. Caso nao estiver, chama o
% programa 'simulacaocarrega'.

% verifica se existe a variavel

if exist('Torque')==0
%   chama o programa que carrega os dados
    x= simulacaocarrega(1);
else
    disp('Variavel Torque ja existe')
end
assignin('base','Ts',[1/50000])

converteboso
```



simulacaocarrega

este programa abre uma janela em que se escolhe o arquivo de dados dos ensaios e atribui a tabela do arquivo a uma variável chamada 'x'. O diretório atual no qual o Matlab aponta deve conter os arquivos.

```
function [x]=simulacaocarrega(chave);
% Carrega arquivo de dados dos ensaios de retificacao
% do boso.
% Patrick 17/03/2006

%modificado de abre2.m

if exist('chave')==0
    error ('sintaxe invalida,;', 'erro')
end
clear chave

arq=0;
d=dir;
str={d.name};
promptstring=cd;
[s,v]=listdlg('promptstring', 'select a file:',...
    'selectionmode','single',...
    'liststring',str);
r=char(str(s))
acao=cat(2,'load ',r, ';')
eval(acao),disp('arquivo carregado')
nomevar=r(1:length(r)-4); %nome da variavel e' igual ao
%nome do arquivo
acao=cat(2,'x = ',nomevar, ';');eval(acao)
acao=cat(2,'clear ',nomevar);eval(acao)
disp ('executando conversao do arquivo de dado')
% converte
```

Simulacaoinversor4

É a simulação no ambiente Simulink. Entrando com o nome, a simulação é carregada, sem que se precise abrir o Simulink. O diagrama da simulação está representado na

Simulacacapt

Após realizada a simulação em uma condição definida, os dados como as correntes, tensões, potências, torque e velocidade do motor são salvas na área de trabalho do Matlab, porém em um formato de estrutura que reúne as informações dos sinias e do tempo em



uma única variável, que não podem ser lido diretamente. Este programa captura esses dados e salva as variáveis com outros nomes, além de plotar os devidos gráficos e chamar o programa `simulacao_ez copia`, que copia-los para a área de transferência do Windows, para serem copiados para outros programas como imagem. Após os gráficos serem plotados, o programa requisita que o usuário selecione um ponto do gráfico do Torque pouco antes do início da passada, e seleciona a passada como sendo o intervalo do ponto inicial até 3 segundos depois, o que evita que os sinais durante a partida do motor sejam salvos.

Os dados salvos são: rotação do motor, torque do motor, correntes no rotor e no estator.

```
% le valores dos pontos da simulacao do motor
% e plota os graficos correspondentes
% os graficos sao salvos na area de transferencia um a um
%
% os dados estao em forma de estruturas

% variaveis salvas no workspace
% N    Te  IrIs    Vab
%
% Te =
%
%         time: [114848x1 double]
%         signals: [1x1 struct]
%         blockName: 'psbpwm/Te (N.m)'
%
% IrIs =
%
%         time: [114848x1 double]
%         signals: [1x2 struct]
%         blockName: 'psbpwm/ir,is (A)'
%
% N =
%
%         time: [114848x1 double]
%         signals: [1x1 struct]
%         blockName: 'psbpwm/N (rpm)'

% NTime TeTime IrIsTime  TeSignals IrIsSignals NSignals

% captura do tempo

NTime=N.time;
TeTime=Te.time;
IrIsTime=IrIs.time;
VabTime=Vab.time;

%le os valores ->1.0 passo
TeSignals=Te.signals;
```



```
IrIsSignals=IrIs.signals;
NSignals=N.signals;
VabSignals=Vab.signals;

% NSignals =
%
%      values: [114848x1 double]
%      dimensions: 1
%      label: ''
%      title: ''
%
%      plotStyle: 0

%le os valores ->2.0 passo
% TeValue  IrValue  IsValue  NValue VabValue

TeValue=TeSignals.values;
IrValue=IrIsSignals(1).values;
IsValue=IrIsSignals(2).values;
NValue=NSignals.values;
VabValue=VabSignals.values;

Ts
freqamos=length(TeValue)/TeTime(length(TeTime))

%plota os graficos
figure(50),plot( NTime, NValue),title('Rotação x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Rotação (rpm)'), grid,
figure(51),plot( TeTime, TeValue),title('Torque x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Torque (N.m)'), grid,
figure(52),plot( IrIsTime, IsValue),title('Corrente x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente (A)'), grid,
figure(53),plot( IrIsTime, IrValue),title('Corrente no Rotor x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente no Rotor (A)'), grid,
figure(54),plot( VabTime, VabValue),title('Tensão do Inversor x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Tensão (V)'), grid,

disp('selecionando os limites do ensaio')
disp('selecione o limite inferior.')
pause,figure(51)
eixomin=ginput(1);
xmin=eixomin(1)
tempoensaio=3;
disp(cat(2,'tempo de ensaio definido como ',num2str(tempoensaio),' s'))
%disp('selecione o limite superior')
%eixomax=ginput(1)
xmax=(xmin+tempoensaio)

xmin= fix(xmin*freqamos)
xmax= fix(xmax*freqamos)

####
%redefine o tamanho e o tempo das variaveis

npontos=500
Time=linspace(0,tempoensaio,npontos);

TeValue= simulacaomedia(TeValue(xmin:xmax),freqamos,npontos);
NValue= simulacaomedia(NValue(xmin:xmax),freqamos,npontos);
IrValue= simulacaorms(IrValue(xmin:xmax),freqamos,npontos);
IsValue= simulacaorms(IsValue(xmin:xmax),freqamos,npontos);
VabValue=simulacaorms(VabValue(xmin:xmax),freqamos,npontos);
```



```
figure(50),plot( Time, NValue),title('Rotação x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Rotação (rpm)'), grid,
figure(51),plot( Time, TeValue),title('Torque x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Torque (N.m)'), grid,
figure(52),plot( Time, IsValue),title('Corrente x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente (A)'), grid,
figure(53),plot( Time, IrValue),title('Corrente no Rotor x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente no Rotor (A)'), grid,
figure(54),plot( Time, VabValue),title('Tensão do Inversor x Tempo'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Tensão (V)'), grid,
```

```
R = input('Deseja salvar as variaveis? <S/N>','s')
if R=='Y'| R=='y'| R=='S'| R=='s'
    arq=input('entre com o nome do arquivo de dados -> ','s')
    % m=msgbox('salva'),set(m,'name','salvando variaveis')
    eval (cat(2,'save ',arq,' Time TeValue IrValue IsValue NValue'))
    % set(m,'name','variaveis salvas'),beep
end

simulacaocapttip
% R = input('Deseja fechar os graficos e limpar as variaveis? <S/N>','s')
% if R=='Y'| R=='y'| R=='S'| R=='s'
%     clear TeValue IrValue IsValue NValue VabValue
%     clear Ntime TeTime IrIsTime VabTime TeSignals IrIsSignals NSignals
%     VabSignals
%     close 50 51 52 53 54
% end
% clear R
pause
simulacaooez copia
simulacaooez copiat
```

simulacaocapttip

Possui a mesma função do programa simulacaocapt, porém realiza a captura dos sinais de tensão, corrente e potência consumida, antes e após o inversor de frequência. Além disso, chama o programa 'simulacaorms' que converte os sinais em valores RMS.

```
% simulacaocapttip
% captura os sinais de tensão, corrente e potência
% originados da simulacao
%
% TIP -> Tensão, Corrente, Potência
% copiado de simulacaocapt
%
%
% sinais
% TIPantes TIPdepois
%
```



```
% captura do tempo
ATime=TIPantes.time;%tempo antes
DTime=TIPdepois.time;%tempo depois

% #estrutura nao usada
% %le os valores ->1.o passo
% TeSignals=Te.signals;
% IrIsSignals=IrIs.signals;
% NSignals=N.signals;
% VabSignals=Vab.signals;
%
% % NSignals =
% %
% %         values: [114848x1 double]
% %         dimensions: 1
% %         label: ''
% %         title: ''
% %         plotStyle: 0
%
% #fim estrutura nao usada

%le os valores ->2.o passo
% TensãoA CorrenteA PotenciaA
% TensãoD CorrenteD PotenciaD
% ATime DTime

TensaoA=TIPantes.signals(1).values;
CorrenteA=TIPantes.signals(2).values;
PotenciaA=TIPantes.signals(3).values;

TensaoD=TIPdepois.signals(1).values;
CorrenteD=TIPdepois.signals(2).values;
PotenciaD=TIPdepois.signals(3).values;

%converte todos os sinais simulados em valores RMS

% TensaoARms
% CorrenteARms
% PotenciaARms
%
% TensãoDRms
% CorrenteDRms
% PotenciaDRms

npontos=500;
TensãoA=TensãoA(xmin:xmax);
CorrenteA=CorrenteA(xmin:xmax);
PotenciaA=PotenciaA(xmin:xmax);

TensaoD=TensaoD(xmin:xmax);
CorrenteD=CorrenteD(xmin:xmax);
PotenciaD=PotenciaD(xmin:xmax);

TensaoARms=simulacaorms(TensaoA,freqamos,npontos);
CorrenteARms=simulacaorms(CorrenteA,freqamos,npontos);
% PotenciaARms=simulacaorms(PotenciaA,freqamos,npontos);
PotenciaARms=TensaoARms.*CorrenteARms;

TensaoDRms=simulacaorms(TensaoD,freqamos,npontos);
CorrenteDRms=simulacaorms(CorrenteD,freqamos,npontos);
% PotenciaDRms=simulacaorms(PotenciaD,freqamos,npontos);
PotenciaDRms=TensaoDRms.*CorrenteDRms;
```



```
TimeRms=linspace(0,ATime(length(ATime)),length(TensaoARms));
% TensaoARms CorrenteARms PotenciaARms
% TensaoDRms CorrenteDRms PotenciaDRms

%plota os graficos faixa de 60 a
pause
% figure(60),subplot (2,1,1),plot( Time, TensaoA),title('Antes do Inversor'),
% xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Tensao (V)'), grid,
% figure(60),subplot (2,1,2),plot( Time, TensaoD),title('Depois do Inversor'),
% xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Tensao (V)'), grid,
%
% figure(61),subplot (2,1,1),plot( Time, CorrenteA),title('Antes do Inversor'),
% xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente (A)'), grid,
% figure(61),subplot (2,1,2),plot( Time, CorrenteD),title('Depois do Inversor'),
% xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente (A)'), grid,
%
% figure(62),subplot (2,1,1),plot( Time, PotenciaA),title('Antes do Inversor'),
% xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Potencia (W)'), grid,
% figure(62),subplot (2,1,2),plot( Time, PotenciaD),title('Depois do Inversor'),
% xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Potencia (W)'), grid,

%plotagem dos graficos RMS
figure(63),subplot (2,1,1),plot( TimeRms, TensaoARms),title('Antes do Inversor'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Tensao RMS (V)'), grid,
figure(63),subplot (2,1,2),plot( TimeRms, TensaoDRms),title('Depois do Inversor'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Tensao RMS (V)'), grid,

figure(64),subplot (2,1,1),plot( TimeRms, CorrenteARms),title('Antes do Inversor'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente RMS (A)'), grid,
figure(64),subplot (2,1,2),plot( TimeRms, CorrenteDRms),title('Depois do Inversor'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Corrente RMS (A)'), grid,

figure(65),subplot (2,1,1),plot( TimeRms, PotenciaARms),title('Antes do Inversor'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Potencia RMS (W)'), grid,
figure(65),subplot (2,1,2),plot( TimeRms, PotenciaDRms),title('Depois do Inversor'),
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Potencia RMS (W)'), grid,

R = input('Deseja salvar as variaveis? <S/N>','s')
if R=='Y'| R=='y'| R=='S'| R=='s'
    arq=input('entre com o nome do arquivo de dados -> ','s')
    % m=msgbox('salva'),set(m,'name','salvando variaveis')
    eval(cat(2,'save ',arq,' TensaoA CorrenteA PotenciaA TensaoD CorrenteD
PotenciaD ATime DTime TensaoARms CorrenteARms PotenciaARms TensaoDRms
CorrenteDRms PotenciaDRms '))
    % set(m,'name','variaveis salvas'),beep
end

% R = input('Deseja fechar os graficos e limpar as variaveis? <S/N>','s')
% if R=='Y'| R=='y'| R=='S'| R=='s'
%     clear TeValue IrValue IsValue NValue VabValue
%     clear Ntime TeTime IrIsTime VabTime TeSignals IrIsSignals NSignals
VabSignals
%     close 50 51 52 53 54
% end
% clear R
```

simulacaorms

Este programa é uma função que retorna o sinal de entrada em RMS. Possui a seguinte sintaxe:



```
function [Yrms]=simulacaorms(x,fs,npontos);
```

Onde:

- x é o vetor do sinal de entrada
- Yrms é o vetor de saída
- fs é a frequência de
- npontos é a quantidade de pontos que a função deve retornar

Nas simulações, esta rotina foi chamada por simulacaocaptip.

```
function [Yrms]=simulacaorms(x,fs,npontos);

%uso: Yrms=simulacaorms(x,fs,npontos);
% simulacao rms
%
% executa o rms nos valores de tensao, corrente e potencia
%
% modificado de Matlab/rms.m
%calcula o rms

% x e' a variavel de entrada

if exist('x')==0
    % verifica se existe a variavel
    error('erro de sintaxe, x nao existe', 'e01');
end

if exist('fs')==0
    % verifica se existe a variavel
    % atribui 10kHz caso fs nao exista;
    fs=10000
end

if exist('npontos')==0
    %npontos determina o numero de pontos que o vetor de saida tera'
    % verifica se existe a variavel
    % atribui 1000 caso npontos nao exista;
    npontos=1000
end

fim=length(x);
intervalo=fix(fim/npontos) %fix-> arredonda para baixo
%intervalo
fim2=fim;
fim=intervalo*npontos %a variavel fim foi redefinida para evitar erro

k=1;
Yrms=0;
s=0;
k=1;
rms=0;
% intervalo=100;
% h=waitbar(0,'calculando RMS aguarde....');
for i=1:intervalo:fim

    % [a,cont]=fread(f,intervalo,'int16'); %estas instrucoes se referem a
    % primeira versao do rms versao do rms. poderao ser apagadas
```



```
%if cont>0

a=x(i:i+intervalo-1); %seleciona uma parte do x correspondente
s=0;
%for j=1:1:int
%s=s+((a(j)/100)^2);
s=a.^2;
%end
Yrms(k)=sqrt(mean(s)); % ((s/int)^0.5);
k=k+1;
%end
% waitbar(i/fim);
end

%a=x(fim+1:fim2); %pega o ultimo valor do rms, nao considerado antes
% s=a.^2;
% Yrms(k)=sqrt(mean(s));

% tempo= (0:length (Yrms)-1);
% tempo = tempo*(1/2.54e6)*intervalo;
```

Simulacaocacmedias

O programa simulacaocalmedias carrega todos os arquivos de dados que terminar com *t.mat* e seleciona a apenas a área da passada, usando como padrão o gráfico do torque, ou seja, despreza a parte onde o rebolo não estava em contato com a peça. Após tomar os valores das Potências durante o contato do rebolo com a peça, calcula-se a potência média durante a passada.

```
% simulacaocalmedias
% Teste
% A intencao deste programa e achar a media da potencia
% e do torque nos arquivos de dados das simulacoes
% Apos isso, sera plotado um grafico de barras com o
% objetivo de comparar a potencia simulada e da aquisitada
% nos ensaios, em 50 e 60Hz.
%
% Patrik© 28/03/2006
%
%
a=dir ('*t.mat') %captura os nomes dos arquivos .mat do diretorio
% for i=1:length(a)
% b=a(i).name;
%
% end

% ###loop principal
for narq=1:length(a)

    arq=a(narq).name
    acao=cat(2, 'load ',arq)
    eval(acao)

    b=length(arq);
    arq=strcat(arq(1:b-5),arq(b-3:b))
```



```
acao=cat(2, 'load ',arq)
eval(acao)

figure(71),plot(TeValue)
disp('Selecao da passada. Selecione o nivel desejado')
b=ginput(1)
ymed=b(2)
xmed=round(b(1))
disp('Patamar selecionado, separando passada...')

maior=false;
j=1;
%estrutura for -> varre o vetor em busca da passada
%menor indica que o numero atual e' menor que o patamar
%TePass -> torque na passada
%
% for i=xmed:length (TeValue)
%     if TeValue(i)>ymed
%         maior=true;      %muda no primeiro valor maior que o patamar
%         TePass(j)=TeValue(i);
%         PotenciaAPass(j)=PotenciaARms(i);
%         PotenciaDPass(j)=PotenciaDRms(i);
%
%         j=j+1;
%     else
%         if maior          %se o numumero for menor que o patamar, e o campo m
%             break
%         end
%     end
% end
% ##inicio testes
% TePass=TeValue;
%     PotenciaAPass=PotenciaARms ;
%     PotenciaDPass=PotenciaDRms ;
% %
%         TePass=TeValue(xmed:xmed+275);
%         PotenciaAPass=PotenciaARms(xmed:xmed+275);
%         PotenciaDPass=PotenciaDRms(xmed:xmed+275);
PotenciaDPass=3*TensaoD.*CorrenteD;
PotenciaDPass=simulacaorms(PotenciaDPass,freqamos,275);

PotenciaAPass=3*TensaoA.*CorrenteA;
PotenciaAPass=simulacaorms(PotenciaAPass,freqamos,275);

figure (72),plot(TePass), title('TePass')
figure(73),plot (PotenciaAPass), title('PotenciaAPass')
figure(74),plot (PotenciaDPass), title('PotenciaDPass')
TeMed(narq)=mean(TePass); %media
TeStd(narq)=std(TePass); %desvio padrao
PotenciaAMed(narq)=mean(PotenciaAPass);
PotenciaAStd(narq)=std(PotenciaAPass);
PotenciaDMed(narq)=mean(PotenciaDPass);
PotenciaDStd(narq)=std(PotenciaDPass);
clear TePass PotenciaAPass PotenciaDPass TeValue

end
% ##fim od loop principal

figure
bar(TeMed),title('Torque Medio'),xlabel('Prof de corte (um)'),ylabel('Torque(Nm)')
figure
```



```
bar(PotenciaAMed),title('Potencia Antes Media'),xlabel('Prof de corte  
(um)'),ylabel('Pot (W)')  
figure  
bar(PotenciaDMed),title('Potencia Depois Media'),xlabel('Prof de corte  
(um)'),ylabel('Pot (W)')
```

abrearqpnl

Esta rotina permite a escolha do arquivo de dado a ser aberto para análise.

```
%patrik 04/09/2006  
%abre um arquivo de dados do tipo .txt  
%x é a saída do arquivo  
  
%tipo define uma restricao aos nomes dos arquivos  
%util quando se tem muitos arquivos  
%ex:  
% tipo='*rms*' ==> apenas arquivos que contenham rms  
% tipo='*' ==> nenhuma restricao  
if exist('tipo')==0  
    tipo='*.*.txt'  
end  
%***  
% funcao dir mostra o diretorio  
% funcao cat concatena strings  
% variavel acao armazena o que sera realizado  
% funcao eval executa uma operacao contida em uma variavel  
acao=cat(2,'d=dir('', tipo, '')')  
eval(acao)  
% variavel d é uma estrutura que contem informacoes sobre os arquivos  
str={d.name};  
% str retorna apenas o nome de cada arquivo  
% retorna os nomes dos arquivos em uma janela para selecao com o mouse  
promptstring=cd;  
[s,v]=listdlg('promptstring', 'select a file:',...  
    'selectionmode','single',...  
    'liststring',str);  
%r retorna o nome do arquivo selecionado  
r=char(str(s))  
%abre o arquivo  
acao=cat(2,'load ',r)  
eval (acao)  
%usa x como nome da variavel no lugar do nome do arquivo  
%r contera agora o nome do arquivo sem a extensao  
r=char(r(1:length(r)-4));  
acao=cat(2,'x=',r, ';')  
eval(acao)  
% *** fim da abertura do arquivo, usa-se x como varivel
```

Plotar3

Esta rotina foi desenvolvida para facilitar e agilizar a construção dos gráficos.

```
figure (10)  
subplot(3,2,1),y=rms(x(:,1));tempo=linspace(0, length(y)*(66/4000), length(y));  
plot(tempo,y),grid  
ylabel('Tensao Antes (V)');AXIS([0 10 350 400])  
tensaoam=mean(y);%captura os valores medios  
% xlabel('Numero de Pontos')  
subplot(3,2,3),y=rms(x(:,2));tempo=linspace(0, length(y)*(66/4000), length(y));  
plot(tempo,y),grid
```



```
ylabel('Corrente Antes (A)');AXIS([0 10 0 23])
correnteam=mean(y);%captura os valores medios
% xlabel('Numero de Pontos')
subplot(3,2,5),y=potenciaa; tempo=linspace(0,length(y)*(66/4000),length(y));
plot(tempo,y),grid
potenciaam=mean(y);%captura os valores medios
ylabel('Pot. El. Antes (W)');AXIS([0 10 0 6000])
xlabel('Tempo (s)')

subplot(3,2,2), y=rms(x(:,4));tempo=linspace(0,length(y)*(66/4000),length(y));
plot(tempo,y),grid
ylabel('Tensao Depois (V)');AXIS([0 10 350 500])
tensaoam=mean(y);%captura os valores medios
% xlabel('Numero de Pontos')
subplot(3,2,4), y=rms(x(:,5));tempo=linspace(0,length(y)*(66/4000),length(y));
plot(tempo,y),grid
ylabel('Corrente Depois (A)');AXIS([0 10 0 23])
correntedm=mean(y);%captura os valores medios
% xlabel('Numero de Pontos')
subplot(3,2,6),y=rms(x(:,6));tempo=linspace(0,length(y)*(66/4000),length(y));
plot(tempo,y),grid
potenciadm=mean(y);%captura os valores medios
ylabel('Pot. El. Depois (W)');AXIS([0 10 0 6000])
xlabel('Tempo (s)')

%grava o grafico em um arquivo jpeg
acao=cat(2,'print -djpeg 'D:\Documents and Settings\Patrik\My
Documents\diSSERTacao\graficos\'',r,'_a'')
eval (acao)

figure (11)

subplot(3,2,1),xx=x(:,7);filtering3;forcap=yfiltered;tempo=linspace(0,length(xx)/4000
,length(xx)); plot(tempo,yfiltered),grid
ylabel('Força Perpendicular (N)');AXIS([0 10 0 40])
% xlabel('Tempo (s)')
forcapm=mean(yfiltered);%captura os valores medios
subplot(3,2,3),xx=x(:,8);filtering3;forcat=yfiltered; plot(tempo,yfiltered),grid
ylabel('Força Tangencial (N)');AXIS([0 10 0 200])
% xlabel('Tempo (s)')
forcatm=mean(yfiltered);%captura os valores medios
subplot(3,2,5),xx=x(:,9);filtering3;forcan=yfiltered; plot(tempo,yfiltered),grid
ylabel('Força Normal (N)');AXIS([0 10 0 600])
xlabel('Tempo (s)')
forcanm=mean(yfiltered);%captura os valores medios

subplot(3,2,2),xx=x(:,10);filtering3;tempo=linspace(0,length(xx)/4000,length(xx));
plot(tempo,yfiltered),grid
ylabel('Velocidade do Rebolo (Rad/s)');AXIS([0 10 165 206])
% xlabel('Tempo (s)')
velm=mean(yfiltered);%captura os valores medios
subplot(3,2,4),xx=x(:,11);filtering3; plot(tempo,yfiltered),grid
ylabel('Pot. El. Total (W)');AXIS([0 10 6000 12000])
% xlabel('Tempo (s)')
poteletm=mean(yfiltered);%captura os valores medios
subplot(3,2,6),xx=x(:,12);filtering3; plot(tempo,yfiltered),grid
ylabel('Pot. Mec. Total (W)');AXIS([0 10 0 10000])
xlabel('Tempo (s)')
potmect=mean(yfiltered);%captura os valores medios

%grava o grafico em um arquivo jpeg
acao=cat(2,'print -djpeg 'D:\Documents and Settings\Patrik\My
Documents\diSSERTacao\graficos\'',r,'_b'')
eval (acao)

fprintf (fid,r,' '),
fprintf (fid,' %6.2f \n', tensaoam ,correnteam ,potenciaam , tensaoam ,correntedm
,potenciadm, forcapm, forcatm, forcanm, velm, poteletm, potmect)
```



```
fprintf(fid, '\n')
```

Converte2

A rotina Converte tem a função de converter os sinais em tensão dos arquivos de dados gravados na aquisição para valores na escala correspondente, além de realizar os cálculos de potencia elétrica e mecânica.

```
%Conversao do arquivo original para suas unidades reais%
%mudado por patrik em 05052006
%ultima alteracao em 04112006
%mudancas:
%velocidade em rmp
% corrente depois
%041106
%converte a tensao de saida do inversor em tensao de fase

x(:,1)=200.4282*(x(:,1))+0.1682; %Tensao - Curvopower 3 (V)%
x(:,2)=9.9481*(x(:,2))-0.0142; %Corrente - Curvopower 3 (A)%

%calcula da potencia
corrente=x(:,2);
tensao=x(:,1);
%correcao da tensao e corrente
%a corrente estava fora de fase
corrente=corrente(33:length(corrente));
tensao=tensao(1:length(corrente));

b=66
a=fix(length(corrente)/b);

prod=corrente.*tensao;

prod=reshape(prod(1:b*a),b,a);
% potencia=sum(prod)/b;
potencia=mean(prod);
potencia;
correntea=corrente;
tensaoa=tensao;

x(:,3)=1228.6*(x(:,3))+219.8; %Potencia - Curvopower 3 (W)%

x(:,4)=188.99*(x(:,4))-8.70; %Tensao - Curvopower 2 (V)%
x(:,5)=13.39*(x(:,5))-1.1; %Corrente - Curvopower 2 (A)%
%x(:,5)= (x(:,5)-0.2264)*7.3150; %Corrente corrigida

x(:,6)=1737.97*(x(:,6))-17.97; %Potencia - Curvopower 2 (W)%

%calcula da potencia
corrente=x(:,5);
tensao=x(:,4);

%correcao da tensao
tensao=tensao(28:length(tensao));tensao=tensao.*(1/sqrt(3));
corrente=corrente(1:length(tensao));
% x(:,4)=tensao;
% x(:,5)=corrente;

b=66
a=fix(length(corrente)/b);
```



```
prod=corrente.*tensao;

prod=reshape(prod(1:b*a),b,a);
potenciad=sum(prod)/b;
corrented=corrente;
tensaod=tensao;
clear corrente tensao prod

x(:,7)=(x(:,7))/0.0025; %Força Perpendicular (N)%
x(:,8)=(x(:,8))/0.0025; %Força Tangencial (N)%
x(:,9)=(x(:,9))/0.0025; %Força Normal (N)%
% vel=x(:,10); %%%
% x(:,10)=374.3736*(x(:,10))-72.7852; %Velocidade (rpm)%
% Vel = 371.6.v - 66.457
x(:,10)=371.6*(x(:,10))-66.457; %Velocidade (rpm)%
vel=x(:,10);

x(:,6)=x(:,6)*(-1); %Sinal de Potencia invertido%

xx=x(:,10);

xx=vel;
filtering2
x(:,10)=yfiltered; %Filtra a velocidade%
vel=yfiltered;

x(:,10)=x(:,10)*(pi/30); %Velocidade em rad/s%

x(:,1)=x(:,1)-mean(x(:,1));
x(:,2)=x(:,2)-mean(x(:,2)); %Zera o offset de Tensão e Corrente%
x(:,4)=x(:,4)-mean(x(:,4));
x(:,5)=x(:,5)-mean(x(:,5));

x(:,11)=3*x(:,6); %Potencia Eletrica Total%
x(:,12)=x(:,8).*x(:,10)*0.288; %Potencia Mecanica Total%

% xx=x(:,12);
% filtering2 %Filtra a Potencia Mecanica%
% x(:,12)=yfiltered;

Plotar2
```

Filtering3

A rotina `filtering3` contém os parâmetros utilizados pela função “`filter`” .do Matlab, que exige a entrada dos vetores A e B, que determinam a ordem do filtro e sua resposta em frequência. Esses valores foram calculados anteriormente com o uso da função “`butter`”, que cria um filtro do tipo Butterworth, com a ordem e a frequência de corte desejadas.

Poderia ser criado o filtro dentro da própria rotina “`filtering`”, porém isso iria fazer com que o processamento demorasse mais para ser realizado, uma vez que a função “`butter`” leva um certo tempo para ser processada e para cada ensaio seria utilizada seis vezes.



```
%Filtragem do sinal%
%Filtro passabaixa de 20Hz, ordem 4
%Este filtro deve ser utilizado apenas para frequencia de aquisicao de
%4kHz
%
A=[1.0000000000000000 -3.917907865391989 5.757076379118072 -3.760349507694532
0.921181929191238];
B=[5.85000e-008 2.33800e-007 3.50700e-007 2.33800e-007 5.85000e-008];

yfiltered=filtfilt(B,A,xx);
```

Spectrum

Como objetivo de se visualizar o espectro de frequência dos sinais criou-se rotina “spectrum”, A função “fft” do Matlab converte o sinal para o espectro de frequência, porém fora de escala e com o eixo da frequência duplicado. A rotina “spectrum” mostra o sinal em seu espectro de frequência com escala em Hertz e amplitude em dB.

```
% % spectrum.m
%
% determina o espectro de frequencia de um sinal
%
% Patrik 08/07/2004
% =====

if exist ('xx','var')==0
    error ('vector xx not exist')
end
if exist ('M')==0
    M=length(xx)-1
end

if exist ('fs')==0
    fs=input('entre com a frequencia de aquisicao _')
else
    fs
end

T=1/fs;
X = fftpnl(xx,M); %obtencao do fft do sinal
figure
w=(0:M-2)*pi/M;
eixo_x=w/2/pi/T;
eixo_y=abs(X)/M;
plot(eixo_x(20:length(eixo_x)),eixo_y(20:length(eixo_y)));grid;title('frequency spectrum');XLABEL('frequency (Hz)');YLABEL('magnitude');
plot(eixo_x,eixo_y);grid;title('frequency spectrum');XLABEL('frequency (Hz)');YLABEL('magnitude');
figure,plot(abs(X)/M)
```