

TESE
1076

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**Análise de Desempenho de Motores de Indução
Trifásicos acionados por Inversor P.W.M**

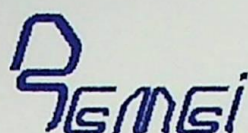
TALES CAETANO GOULART SILVA

ITAJUBÁ - Dezembro

2000



**ESCOLA FEDERAL DE
ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**



**Grupo de Estudos em Manutenção
Eletro-Eletrônica e Instalações**

***ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
ACIONADOS POR INVERSOR PWM***

Tales Caetano Goulart Silva

Itajubá, dezembro de 2000

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

- EFEI -

**Análise de Desempenho de Motores de Indução
Trifásicos acionados por Inversor PWM**

Dissertação apresentada a EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ângelo José Junqueira Rezek

Tales Caetano Goulart Silva

Itajubá, dezembro de 2000



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **"Análise de Desempenho de Motores de Indução Trifásicos
Accionados por Inversor PWM"**

Autor: **Tales Caetano Goulart Silva**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Resultado Médio: Conceito: A, ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 15 de dezembro de 2000.

Prof. Selênio Rocha Silva
1º Examinador - UFMG

Prof. Antonio Tadeu Lyrio de Almeida
2º Examinador - EFEI

José Antonio Cortez
3º Examinador - EFEI

Prof. Angelo José Junqueira Rezek
4º Examinador - (Orientador) - EFEI

Ficha Catalográfica

Silva, Tales Caetano Goulart

Análise de Desempenho de Motores de Indução Trifásicos acionados por Inversor PWM. Itajubá, 2000.

96 pg.

Dissertação (Mestrado) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Acionamento de Motores de Indução Trifásicos I. Escola Federal de Engenharia de Itajubá.(EFEI). Departamento de Engenharia Elétrica II. t

*Concedo-vos Senhor a liberdade, vos libero para andar os
caminhos que não podereis qualificar, vos quero para qualificar
aqueles que podereis e tolerareis para desprezar os que não
podereis.*

A minha esposa e filhos,

Claudia, Leon e Igor

Liberto da Salsedão

Agradecimentos

A meus pais, Genivaly Silva e Leoni Cavalcanti Mendes Silva, pela paciência e sempre
na possibilidade de escrever.

À minha Prós-Valter Michel, por la companhia e incentivo.

À meu orientador, Angelo Basso, pela atenção e despendimento.

A todos por não "permeabilidade".

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram na realização desta
monografia.

*Concedei-nos Senhor a serenidade necessária para aceitar as
coisas que não podemos modificar, coragem para modificar
aquelas que podemos e sabedoria para distinguir umas das
outras.*

Livro da Sabedoria

Agradecimentos

A meus pais, Guaracy Silva e Laura Caetano Goulart Silva, pela inabalável crença na necessidade de educar.

Ao amigo Fritz Walter Mohn, pela companhia e incentivo.

Ao meu orientador Ângelo Rezek, pela atenção e desprendimento.

A Deus por essa oportunidade.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta colaboraram na realização destas experiências.

Sumário

RELAÇÃO DE FIGURAS, PLANILHAS E FOTOS	01
RESUMO	05
ABSTRACT	06
CAPÍTULO I - TRABALHO LABORATORIAL	07
1.1 Considerações Iniciais	07
1.2 Foco do Trabalho	07
1.3 Abordagem	07
1.3.1 Determinação da Estrutura Padrão de alimentação - Senoidal	08
1.3.2 Definição do sistema de acionamento PWM	08
1.3.3 Estabelecimento do critério de configuração do acionamento PWM	08
1.3.4 Curvas de desempenho	09
1.3.4.1 Definições	09
1.3.4.2 Identificação das curvas	09
CAPÍTULO II – SISTEMA DE ACIONAMENTO PWM (PULSE WIDTH MODULATION)	11
2.1 Introdução	11
2.2 Considerações Iniciais	11
2.2.1 Aspectos envolvidos no controle de velocidade de Motores de Indução Trifásicos	11
2.2.2 Diagrama de Blocos Básico do sistema de acionamento PWM	13

2.2.3 Inversor Básico	14
2.2.4 Diagrama Funcional Básico de um sistema de acionamento PWM	15
2.2.5 Distorção Harmônica do acionamento PWM	16
2.2.5.1 Distorção de Entrada	16
2.2.5.2 Processo de Comutação	17
2.2.5.3 Distorção de Saída	17
CAPÍTULO III - REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	19
3.1 Ensaio do Conversor Rotativo	19
3.2 Ensaio do Grupo Motor de Corrente Contínua/Máquina Síncrona (MCC/MS)	19
3.2.1 Descrição do Ensaio	19
3.2.2 Conclusão do Ensaio	20
3.3 Ensaio para refinamento da montagem do Grupo MCC/MS	21
3.3.1 Descrição do Ensaio	21
3.4 Ensaio de avaliação do esquema de variação de carga e medição de conjugado ...	22
3.4.1 Descrição do Ensaio	22
3.5 Ensaio do MIT com rotor bobinado e acionamento senoidal – medições eletrodinâmicas e eletrônica	23
3.5.1 Descrição do Ensaio	23
3.6 Ensaio do MIT de rotor em gaiola e acionamento Senoidal	24
3.7 Ensaio do MIT de rotor em gaiola e acionamento PWM com parametrização Standard e chaveamento de 8 kHz	24
3.8 Ensaio do MIT de rotor em gaiola e acionamento PWM com parametrização Vetorial e chaveamento de 8 KHz	25
CAPÍTULO IV - CURVAS DE DESEMPENHO	26
4.1 Introdução	26
4.2 Comportamento do Rendimento	26
4.2.1 Rendimento X Conjugado - por classe de frequência	26

4.2.2	Rendimento X Frequência - por patamar de conjugado	29
4.3	Comportamento do Fator de Potência	32
4.3.1	Rendimento X Conjugado - por classe de frequência	32
4.3.2	Rendimento X Frequência - por patamar de conjugado	34
4.4	Comportamento da Potência Ativa	37
4.4.1	Potência Ativa X Conjugado - por classe de frequência	37
4.4.2	Potência Ativa X Frequência - por patamar de conjugado	40
4.5	Comportamento da Potência Reativa	43
4.5.1	Potência Reativa X Conjugado - por classe de frequência	43
4.5.2	Potência Reativa X Frequência - por patamar de conjugado	45
4.6	Comportamento da Potência Aparente	48
4.6.1	Potência Aparente X Conjugado - por classe de frequência	48
4.6.2	Potência Aparente X Frequência - por patamar de conjugado	51
4.7	Comportamento da Rotação	54
4.7.1	Rotação X Conjugado - por classe de frequência	54
4.7.2	Rotação X Frequência - por patamar de conjugado	56
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES		60
5.1	Introdução	60
5.2	Análise Comparativa	60
5.2.1	Comportamento do Rendimento	60
5.2.2	Comportamento do Fator de Potência	62
5.2.3	Comportamento da Potência Ativa	62
5.2.4	Comportamento da Potência Reativa	62
5.2.5	Comportamento da Potência Aparente	63
5.2.6	Comportamento da Rotação	63
5.3	Tabelas de cálculo das Potências Ativas, Fatores de Potência e Rendimentos	63
	Planilha V.1 - Cálculo das Potências Ativas do acionamento Senoidal	64

Planilha V.2 - Cálculo dos Fatores de Potência do acionamento Senoidal	65
Planilha V.3 - Cálculo dos Rendimentos do acionamento Senoidal	66
Planilha V.4 - Cálculo das Potências Ativas do acionamento PWM Standard	67
Planilha V.5 - Cálculo dos Fatores de Potência do acionamento PWM Standard	68
Planilha V.6 - Cálculo dos Rendimentos do acionamento PWM Standard	69
Planilha V.7 - Cálculo das Potências Ativas do acionamento PWM Vetorial	70
Planilha V.8 - Cálculo dos Fatores de Potência do acionamento PWM Vetorial ..	71
Planilha V.9 - Cálculo dos Rendimentos do acionamento PWM Vetorial	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE I - OPERAÇÃO DO MOTOR COMO CONVERSOR ROTATIVO ..	74
I.1 Princípio de Funcionamento	74
I.2 Desenvolvimento do 1º Ensaio	74
I.3 Conclusão do Ensaio	76
APÊNDICE II – PLANILHAS	77
PL 1 - Senoidal - Bobinado - Medição Eletrodinâmica	77
PL 2 - Senoidal - Bobinado - Medição Eletrônica	78
PL 3 - Senoidal – Gaiola	79
PL 4 - Standard – Gaiola	80
PL 5 – Vetorial – Gaiola	81
APÊNDICE III - PROGRAMAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ACIONAMENTOS SENOIDAL E PWM	82
III.1 Rotina de avaliação de desempenho para operação em velocidade constante	82
III.2 Rotina de avaliação de desempenho para operação com carga constante	85
III.3 Rotina de cálculo de parâmetros dos acionamentos no ponto de operação	88

APÊNDICE IV - DADOS DE PLACA DOS EQUIPAMENTOS 91

APÊNDICE V – APRESENTAÇÃO FOTOGRÁFICA 92

Foto 1 MCC/MS 92

Foto 2 Interligação do GCC - Cargas resistivas 92

Foto 3 Visão da instrumentação do ensaio do MIT com rotor bobinado 93

Foto 4 Conversor controlado de 6 pulsos 93

Foto 5 Visão do VOLTECH 300 94

Foto 6 Ensaio do MIT com rotor em gaiola 94

Foto 7 Visão das máquinas e equipamentos envolvidos nos ensaios 95

Foto 8 Grupo - GCC/MIT com rotor em gaiola 95

Foto 9 Visão do MIT com rotor bobinado 96

Foto 10 Inversor PWM 96

Relação de Figuras, Planilhas e Fotos

Capítulo II

Figura 2.1	Curvas Velocidade x Torque - Quatro Quadrantes	12
Figura 2.2	Característica Volts/Hz do MIT	13
Figura 2.3	Sistema de acionamento PWM	13
Figura 2.4	Inversor Básico	14
Figura 2.5	Formas de onda da tensão e corrente de um Inversor Básico	14
Figura 2.6	Diagrama Funcional do sistema PWM	15
Figura 2.7	Conversor trifásico não controlado do sistema PWM	16
Figura 2.8	Definição da profundidade e área de corte	17
Figura 2.9	Oscilograma da tensão fase - fase e corrente de fase	18

Capítulo III

Figura 3.1	Ligação da MS	20
Figura 3.2	Ligação do MCC	20
Figura 3.3	Padrão de alimentação Senoidal	22
Figura 3.4	Esquema de alimentação e carregamento do MIT	23
Figura 3.5	Comparação de medições	24
Figura 3.6	Acionamento PWM	25

Capítulo IV

Figura 4.2.1 - 1	Curvas de Tendência do Rendimento X Conjugado – 60 Hz	26
Figura 4.2.1 - 2	Curvas de Tendência do Rendimento X Conjugado – 50 Hz	27
Figura 4.2.1 - 3	Curvas de Tendência do Rendimento X Conjugado – 40 Hz	27
Figura 4.2.1 - 4	Curvas de Tendência do Rendimento X Conjugado – 30 Hz	28
Figura 4.2.1 - 5	Curvas de Tendência do Rendimento X Conjugado – 20 Hz	28
Figura 4.2.2 – 1	Comportamento do Rendimento X Frequência – 100 %	29
Figura 4.2.2 – 2	Comportamento do Rendimento X Frequência – 80 %	29

Figura 4.2.2 – 3	Comportamento do Rendimento X Frequência - 60 %	30
Figura 4.2.2 – 4	Comportamento do Rendimento X Frequência - 40 %	30
Figura 4.2.2 – 5	Comportamento do Rendimento X Frequência - 20 %	31
Figura 4.3.1 - 1	Curvas de Tendência do Fator de Potência X Conjugado - 60 Hz	32
Figura 4.3.1 - 2	Curvas de Tendência do Fator de Potência X Conjugado - 50 Hz	32
Figura 4.3.1 - 3	Curvas de Tendência do Fator de Potência X Conjugado - 40 Hz	33
Figura 4.3.1 - 4	Curvas de Tendência do Fator de Potência X Conjugado - 30 Hz	33
Figura 4.3.1 - 5	Curvas de Tendência do Fator de Potência X Conjugado - 20 Hz	34
Figura 4.3.2 - 1	Comportamento do Fator de Potência X Frequência - 100 %	34
Figura 4.3.2 - 2	Comportamento do Fator de Potência X Frequência - 80 %	35
Figura 4.3.2 - 3	Comportamento do Fator de Potência X Frequência - 60 %	35
Figura 4.3.2 - 4	Comportamento do Fator de Potência X Frequência - 40 %	36
Figura 4.3.2 - 5	Comportamento do Fator de Potência X Frequência - 20 %	36
Figura 4.4.1 - 1	Curvas de Tendência da Potência Ativa X Conjugado – 60 Hz	37
Figura 4.4.1 - 2	Curvas de Tendência da Potência Ativa X Conjugado – 50 Hz	37
Figura 4.4.1 - 3	Curvas de Tendência da Potência Ativa X Conjugado – 40 Hz	38
Figura 4.4.1 - 4	Curvas de Tendência da Potência Ativa X Conjugado – 30 Hz	39
Figura 4.4.1 - 5	Curvas de Tendência da Potência Ativa X Conjugado – 20 Hz	39
Figura 4.4.2 - 1	Comportamento da Potência Ativa X Frequência - 100 %	40
Figura 4.4.2 - 2	Comportamento da Potência Ativa X Frequência - 80 %	40
Figura 4.4.2 - 3	Comportamento da Potência Ativa X Frequência - 60 %	41
Figura 4.4.2 - 4	Comportamento da Potência Ativa X Frequência - 40 %	41
Figura 4.4.2 - 5	Comportamento da Potência Ativa X Frequência - 20 %	42
Figura 4.5.1 - 1	Curvas de Tendência da Potência Reativa X Conjugado - 60 Hz	42
Figura 4.5.1 – 2	Curvas de Tendência da Potência Reativa X Conjugado - 50 Hz	43
Figura 4.5.1 - 3	Curvas de Tendência da Potência Reativa X Conjugado - 40 Hz	43
Figura 4.5.1 – 4	Curvas de Tendência da Potência Reativa X Conjugado - 30 Hz	44
Figura 4.5.1 - 5	Curvas de Tendência da Potência Reativa X Conjugado - 20 Hz	45
Figura 4.5.2 - 1	Comportamento da Potência Reativa X Frequência - 100 %	45
Figura 4.5.2 - 2	Comportamento da Potência Reativa X Frequência - 80 %	46
Figura 4.5.2 – 3	Comportamento da Potência Reativa X Frequência - 100 %	46
Figura 4.5.2 - 4	Comportamento da Potência Reativa X Frequência - 100 %	47
Figura 4.5.2 - 5	Comportamento da Potência Reativa X Frequência - 20 %	47
Figura 4.6.1 - 1	Curvas de Tendência da Potência Aparente X Conjugado - 60 Hz ..	48
Figura 4.6.1 - 2	Curvas de Tendência da Potência Aparente X Conjugado - 50 Hz ..	49
Figura 4.6.1 - 3	Curvas de Tendência da Potência Aparente X Conjugado - 40 Hz ..	49

Figura 4.6.1 - 4	Curvas de Tendência da Potência Aparente X Conjugado - 30 Hz ..	50
Figura 4.6.1 - 5	Curvas de Tendência da Potência Aparente X Conjugado - 20 Hz ..	50
Figura 4.6.2 - 1	Comportamento da Potência Aparente X Frequência - 100 %	51
Figura 4.6.2 - 2	Comportamento da Potência Aparente X Frequência - 80 %	51
Figura 4.6.2 - 3	Comportamento da Potência Aparente X Frequência - 60 %	52
Figura 4.6.2 - 4	Comportamento da Potência Aparente X Frequência - 40 %	52
Figura 4.6.2 - 5	Comportamento da Potência Aparente X Frequência - 20 %	53
Figura 4.7.1 - 1	Curvas de Tendência da Rotação X Conjugado - 60 Hz	53
Figura 4.7.1 - 2	Curvas de Tendência da Rotação X Conjugado - 50 Hz	54
Figura 4.7.1 - 3	Curvas de Tendência da Rotação X Conjugado - 40 Hz	55
Figura 4.7.1 - 4	Curvas de Tendência da Rotação X Conjugado - 30 Hz	55
Figura 4.7.1 - 5	Curvas de Tendência da Rotação X Conjugado - 20 Hz	56
Figura 4.7.2 - 1	Comportamento da Rotação X Frequência - 100 %	56
Figura 4.7.2 - 2	Comportamento da Rotação X Frequência - 80 %	57
Figura 4.7.2 - 3	Comportamento da Rotação X Frequência - 60 %	57
Figura 4.7.2 - 4	Comportamento da Rotação X Frequência - 40 %	58
Figura 4.7.2 - 5	Comportamento da Rotação X Frequência - 20 %	58

Capítulo V

Figura V.1	Faixas limites do Rendimento X variação de frequência	61
Figura V.2	Faixas limites do Rendimento X variação do conjugado	61
Planilha V - 1	Cálculo das Potências Ativas do acionamento Senoidal	64
Planilha V - 2	Cálculo dos Fatores de Potência do acionamento Senoidal	65
Planilha V - 3	Cálculo dos Rendimentos do acionamento Senoidal	66
Planilha V - 4	Cálculo das Potências Ativas do acionamento PWM Standard	67
Planilha V - 5	Cálculo dos Fatores de Potência do acionamento PWM Standard ...	68
Planilha V - 6	Cálculo dos Rendimentos do acionamento PWM Standard	69
Planilha V - 7	Cálculo das Potências Ativas do acionamento PWM Vetorial	70
Planilha V - 8	Cálculo dos Fatores de Potência do acionamento PWM Vetorial	71
Planilha V - 9	Cálculo dos Rendimentos do acionamento PWM Vetorial	72

Apêndice I

Figura I - 1	Conversor Rotativo	75
Figura I - 2	Esquema de ligação do MCC	76

Apêndice II

Planilha II - 1	Senoidal - Bobinado - Medição Eletrodinâmica	77
Planilha II - 2	Senoidal - Bobinado - Medição Eletrônica	78
Planilha II - 3	Senoidal – Gaiola	79
Planilha II - 5	Standard – Gaiola	80
Planilha II - 6	Vetorial – Gaiola	81

Apêndice V

Foto 1	MCC/MS	92
Foto 2	Interligação do GCC - Cargas resistivas	92
Foto 3	Visão da instrumentação do ensaio do MIT com rotor bobinado	93
Foto 4	Conversor controlado de 6 pulsos	93
Foto 5	Visão do VOLTECH 300	94
Foto 6	Ensaio do MIT com rotor em gaiola	94
Foto 7	Visão das máquinas e equipamentos envolvidos nos ensaios	95
Foto 8	GCC/MIT com rotor em gaiola	95
Foto 9	Visão do MIT com rotor bobinado	96
Foto 10	Inversor PWM	96

Resumo

Os sistemas eletrônicos de controle de velocidade e carga de motores de indução trifásicos (MIT's), baseados em tecnologia *PWM* (*Pulse Width Modulation – modulação por largura de pulso*), estão sendo atualmente bastante utilizados em diversas aplicações tanto a nível industrial quanto comercial. Em geral, a utilização desses sistemas não é precedida de avaliações detalhadas quanto às variáveis em questão, tais como: rendimento, fator de potência, regulação de velocidade, conteúdo harmônico, consumo de potências ativa, reativa e aparente. Persistem muitas incertezas relativas ao real desempenho de um acionamento com velocidade e carga variáveis realizado por um sistema *PWM*, comparativamente a um sistema eletromecânico convencional. Existem, também, dúvidas quanto ao impacto das formas de onda destes equipamentos sobre os motores controlados, uma vez que esses sinais podem conter harmônicos de ordem e amplitudes elevadas e que, invariavelmente, influenciam nas características de resposta, bem como, na expectativa de vida dos respectivos motores. É objetivo do trabalho através de ensaios em laboratório, adotando-se diversos regimes de operação para o motor, estabelecer comparações de desempenho entre acionamentos implementados a partir de um sistema que proporciona alimentação puramente senoidal e um outro baseado em tecnologia *PWM*.

Abstract

The electronic devices for velocity and charge control of induction triphasic motors (MIT's) based on *PWM* (*Pulse Width Modulation*) technology, are being largely used nowadays in several industrial and commercial applications. Frequently their use is not preceded by the necessary evaluations regarding the important variables such as: efficiency, power factor, speed regulation, harmonic content and active, reactive and apparent power consume. Various uncertainties are still present concerning the real performance of an electronic drive realized by a *PWM* system comparatively to a conventional electromechanical device. There is also questions relative to the impact of the wave shapes of these equipment upon the controlled engines, since these signals can contain harmonics of high order and widths. These harmonics will certainly influence the response characteristics, as well as, the life expectation of the respectively motors. The goal of this work was to establish comparisons between the performances of drives produced by a system which feeding is purely sigmoidal in relation to another one based on *PWN* technology. For this purpose several laboratory tests were performed changing the motor operation procedures.

CAPÍTULO I

1. TRABALHO LABORATORIAL

1.1 Considerações Iniciais

Atualmente é grande a utilização de inversores de frequência PWM (Pulse Width Modulation – modulação por largura de pulso) para acionamentos de motores de indução trifásicos. Como se sabe, estes motores são os mais utilizados a nível industrial, salientando-se, também, que os motores elétricos respondem por mais de metade do total de consumo de energia elétrica mundial. No Brasil, esta afirmação também é válida e a utilização dos inversores de frequência operando segundo os regimes de controle escalar e vetorial é cada vez mais difundida na indústria.

Um sistema rotativo de variação de tensão e frequência, constituído por um motor de corrente contínua acionando um gerador síncrono trifásico, foi, também, empregado para efeito de comparação com o sistema PWM. Assim, o motor de indução trifásico foi alimentado por um sistema de tensões senoidais (conversor rotativo) e por um sistema de tensões PWM (inversor de frequência).

O presente trabalho se propõe, portanto, a contribuir para o esclarecimento de indagações comumente feitas por futuros usuários de inversores PWM, ou mesmo aqueles que possuem equipamentos já instalados e desconhecem seu comportamento relativo ao rendimento, fator de potência e rotação, bem como os consumos de potências ativa, reativa e aparente solicitadas da rede de alimentação.

1.2 Foco do Trabalho

A meta estabelecida foi a análise quantitativa dos rendimentos, rotações, potências elétricas e mecânica e fatores de potência de acionamentos de motores de indução trifásicos (MIT's), implementados a partir de um sistema Senoidal de alimentação e de um sistema de acionamento baseado em tecnologia PWM.

1.3 Abordagem

1.3.1 Determinação da estrutura padrão de alimentação - Senoidal

Inicialmente, definiu-se uma estrutura de alimentação que proporcionasse formas de onda puramente senoidais para diferentes regimes de operação do motor. Esta estrutura foi adotada como “padrão” de alimentação e os desempenhos do motor, assim acionados, foram quantitativamente comparados aos desempenhos obtidos com a utilização do sistema de acionamento PWM. O estudo iniciou pelos ensaios do motor de indução trifásico com rotor bobinado, embora sejam apresentados apenas os resultados obtidos para o motor com rotor em gaiola. As características das máquinas ensaiadas e as utilizadas para compor o sistema de acionamento padrão encontram-se no **Apêndice IV**.

1.3.2 Identificação do sistema de acionamento PWM

O sistema PWM utilizado compõem-se do equipamento **SIMOVERT MASTER CONTROL - AC/AC – SIEMENS – TIPO A**. O conjunto de medição foi criteriosamente avaliado, tendo em conta os níveis e frequências dos harmônicos envolvidos. Utilizou-se o analisador **THREE PHASE ANALYSER - PM 300 (VOLTECH)**, associado à instrumentação convencional, de modo que as medições realizadas pelos dois métodos fossem posteriormente comparadas.

1.3.3 Definição do critério de parametrização do acionamento PWM

O inversor **SIEMENS - SIMOVERT** pode ser operado no modo Standard ou no modo com controle vetorial – modo Expert. Existem, portanto, duas rotinas apropriadas que devem ser seleccionadas, via teclado do inversor ou via PC, conforme o modo de operação que se deseja implementar. Após a seleção de uma das duas opções (com ou sem controle vetorial), a parametrização consiste em seguir os passos constantes da rotina seleccionada, inserindo os dados do motor e da rede de alimentação. No modo Expert se processa a auto identificação do motor feita pelo inversor através da realização dos seguintes ensaios:

- ensaio de rotor bloqueado (feito com corrente nominal);
- ensaio de rotor livre;
- ensaio para otimização de regulador de velocidade.

A parametrização adotada para o acionamento PWM foi, inicialmente, a opção Standard, que opera segundo uma relação **Volts/Hertz** constante e com compensação do produto **RI** para baixas frequências. Em sequência, o motor com rotor em gaiola foi ensaiado com a parametrização Standard e, também, com a opção Expert, utilizando o método indireto, ou seja, com estimação de velocidade e fluxo. A frequência de chaveamento adotada para os ensaios foi de 8 kHz, sendo essa uma frequência intermediária da faixa admissível de 3,4 – 16 kHz.

1.3.4 Curvas de Desempenho

1.3.4.1 Definições

A análise quantitativa do desempenho dos motores para os sistemas de acionamento e os regimes de operação adotados foi feita através do levantamento de curvas características que espelham os comportamentos das grandezas tomadas para estudo. As características levantadas em função da variação do conjugado utilizam curvas de tendência, construídas a partir de funções polinomiais de terceiro grau. As características plotadas em função da variação de frequência foram levantadas por interpolação utilizando o MATLAB.

1.3.4.2 Identificação das curvas

São elas:

Comportamento do Rendimento

- Rendimento X Conjugado - por classe de frequência
- Rendimento X Frequência - por patamar de conjugado

Comportamento do Fator de Potência

- Fator de Potência X Conjugado - por classe de frequência
- Fator de Potência X Frequência - por patamar de conjugado

Comportamento da Potência Ativa

- Potência Ativa X Conjugado - por classe de frequência
- Potência Ativa X Frequência - por patamar de conjugado

Comportamento da Potência Reativa

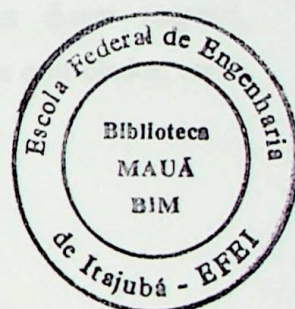
- Potência Reativa X Conjugado - por classe de frequência
- Potência Reativa X Frequência - por patamar de conjugado

Comportamento da Potência Aparente

- Potência Aparente X Conjugado - por classe de frequência
- Potência Aparente X Frequência - por patamar de conjugado

Comportamento da Rotação

- Rotação X Conjugado - por classe de frequência
- Rotação X Frequência - por patamar de conjugado



CAPÍTULO II

2. SISTEMA DE ACIONAMENTO PWM (PULSE WIDTH MODULATION)

2.1 Introdução

O acionamento eletrônico viabilizou-se a partir da utilização de modernas tecnologias baseadas em dispositivos não lineares e a motivação para o seu uso foi o custo inferior e a possibilidade de controle de velocidade comparável aos antigos conversores rotativos. A disseminação destes sistemas cresceu exponencialmente nos últimos 20 anos, partindo-se de retificadores controlados de silício (SCR), chaveados a 300 Hz, para tiristores gatilhados por corrente (GTO) e, mais recentemente, o transistor bipolar de porta isolada (IGBT), que opera com frequências da ordem de 20 kHz. Portanto, ocorreram mudanças substanciais nos projetos e implementações de acionamentos de motores de indução trifásicos com controle de carga e frequência. Notadamente, estas alterações dizem respeito, principalmente, ao nível de desgaste imposto aos enrolamentos dos motores controlados, tendo em conta as elevadas frequências de chaveamento a que ficaram submetidos.

2.2 Considerações Iniciais

2.2.1 Aspectos envolvidos no controle de velocidade de Motores de Indução Trifásicos

A rotação de um MIT é dada por:

$$R = \frac{120 f (1 - s)}{P} \quad [\text{II.1}]$$

onde: f = frequência da tensão de alimentação do motor [Hz]

P = n° de pólos do motor

s = deslize ou escorregamento do motor

$120f/P$ = velocidade síncrona do motor [rpm]

A **Figura 2.1** ilustra as curvas características típicas de um motor.

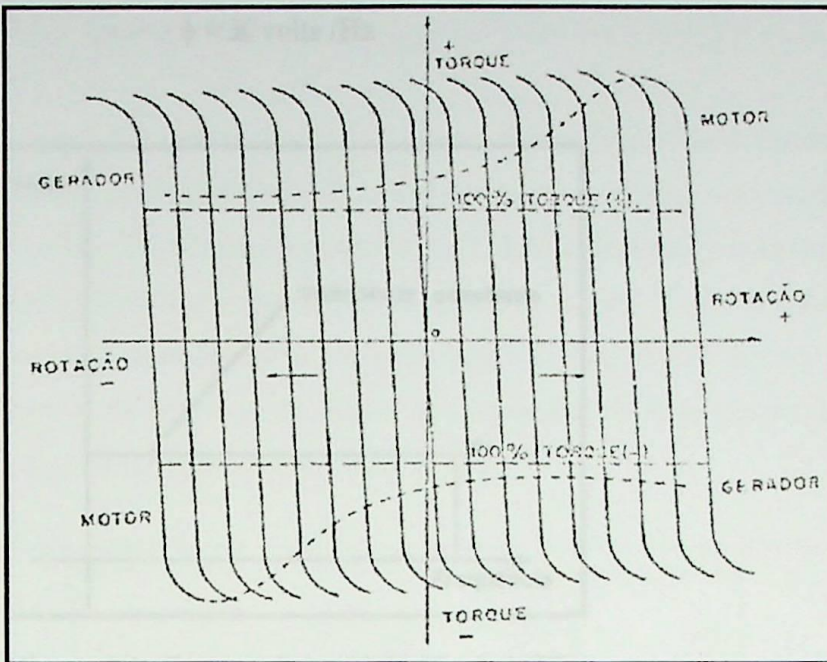


Figura 2.1: Velocidade x Torque - Quatro Quadrantes

As curvas estendem-se nos quadrantes de ação motora e regenerativa. Pode-se notar que a direção do escorregamento determina o sentido em que flui a potência. Quando a rotação é menor que a rotação síncrona, a máquina opera absorvendo potência elétrica da rede e, portanto, como motor. A rotação pode ser maior que a velocidade síncrona e nesse caso a máquina fornece potência elétrica para a rede, operando como gerador.

A expressão [II.1] indica que se pode variar a rotação do motor através de:

- Variação do número de pólos do motor
Permite a variação de velocidade de forma discreta.
- Variação do escorregamento s do motor - mantendo a frequência constante
Pode-se variar o escorregamento através da variação da tensão aplicada ao estator e pela variação das características do rotor, ou seja, alterando-se a resistência do rotor com a inserção de resistências externas em série (para motores com rotor bobinado).
- Variação da frequência f - mantendo o torque constante
Para que o motor mantenha a capacidade de torque em toda a faixa de variação de frequência, o enlace de fluxo do estator deve permanecer constante. A expressão [II.2] exprime a relação básica do fluxo em um MIT:

$$\phi = K \text{ volts /Hz}$$

[II.2]

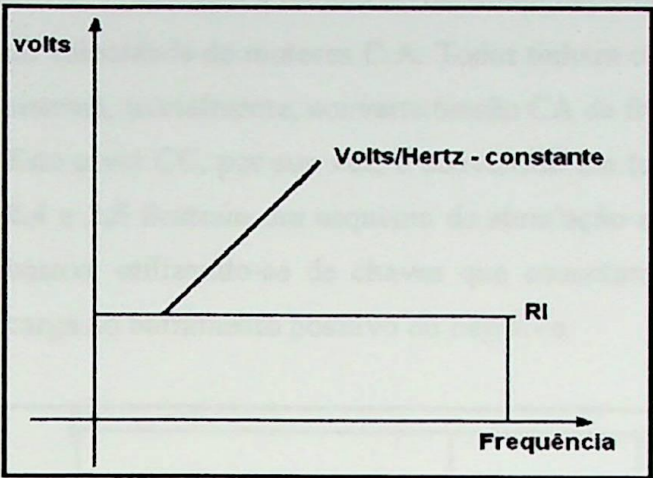


Figura 2.2: Característica Volts/Hz do MIT

A Figura 2.2 ilustra que a relação Volts/Hz não é constante em baixas velocidades. Nota-se que para baixas frequências o produto **R.I** é significativo em relação a tensão aplicada, o que impõe a necessidade de compensação de tensão para manter o fluxo constante.

2.2.2 Diagrama de Blocos Básico do sistema de acionamento PWM

Os sistemas de acionamento PWM para controle de carga e velocidade de processos industriais são os substitutos modernos para os sistemas GMG (Sistemas Ward-Leonard). Estes novos equipamentos disponibilizam um controle mais econômico e robusto que os antigos conversores rotativos. A Figura 2.3 ilustra os blocos básicos do acionamento PWM. A unidade conversora transforma tensão alternada em tensão contínua e faz o interfaceamento do equipamento PWM com a fonte de alimentação. A unidade inversora converte tensão contínua em alternada de amplitude e frequência variáveis.

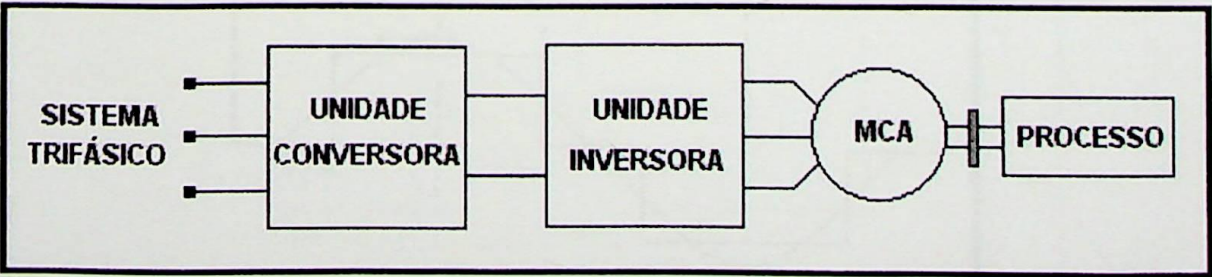


Figura 2.3: Sistema de acionamento PWM

2.2.3 Inversor Básico

Durante a década de 60 foram desenvolvidas várias técnicas adequadas ao controle de velocidade de motores C.A. Todas tinham como base o sistema Retificador/Inversor. Este sistema, inicialmente, converte tensão CA de frequência fixa em tensão CC fixa ou ajustável. Este nível CC, por sua vez, é convertido em tensão CA de frequência variável. As Figuras 2.4 e 2.5 ilustram um esquema de simulação e as formas de onda de saída de um Inversor básico, utilizando-se de chaves que conectam, de forma preestabelecida, os terminais da carga ao barramento positivo ou negativo.

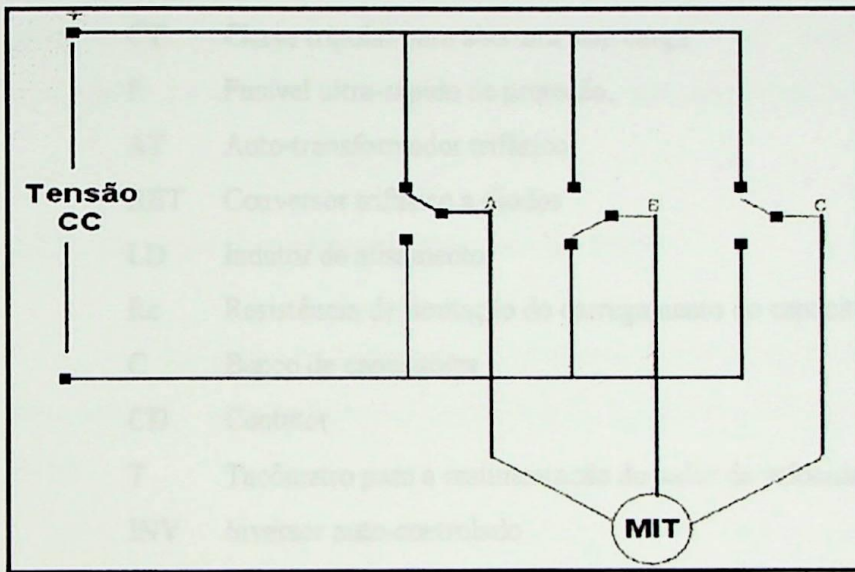


Figura 2.4: Inversor Básico

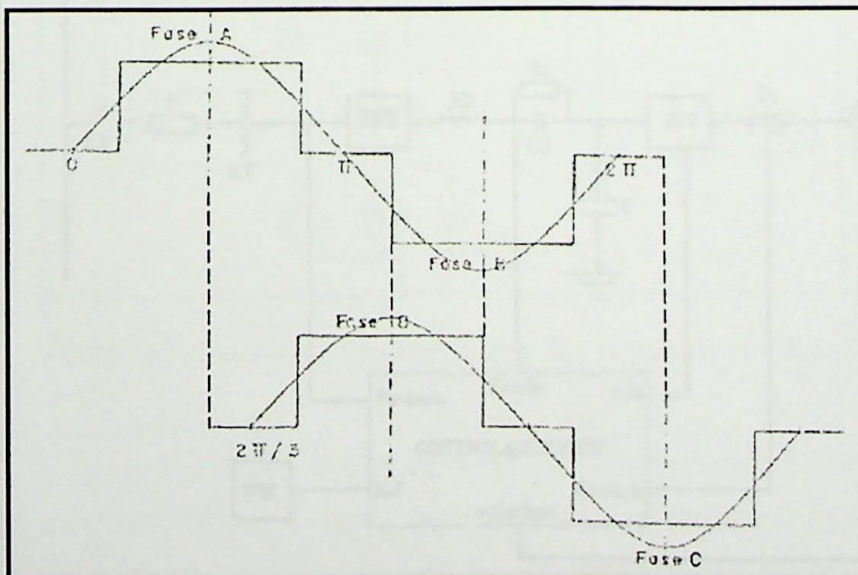


Figura 2.5: Formas de onda da tensão e corrente de um Inversor Básico

2.2.4 Diagrama Funcional Básico de um sistema de acionamento PWM

A **Figura 2.6** ilustra os blocos funcionais de um sistema de acionamento PWM típico, onde a tensão de saída da unidade inversora é alternada do tipo pulsada retangular, com amplitude de pulso fixa e largura modulada. Apesar dos pulsos retangulares terem as mesmas amplitudes, em função da variação na largura destes pulsos é obtida uma variação da componente fundamental da tensão pulsada de saída.

onde:

- CT Chave tripolar para abertura sem carga
- F Fusível ultra-rápido de proteção,
- AT Auto-transformador trifásico
- RET Conversor trifásico a diodos
- LD Indutor de alisamento
- Rc Resistência de limitação do carregamento do capacitor
- C Banco de capacitores
- CD Contator
- T Tacômetro para a realimentação do valor da velocidade instantânea
- INV Inversor auto-controlado
- Tc Transformador de corrente

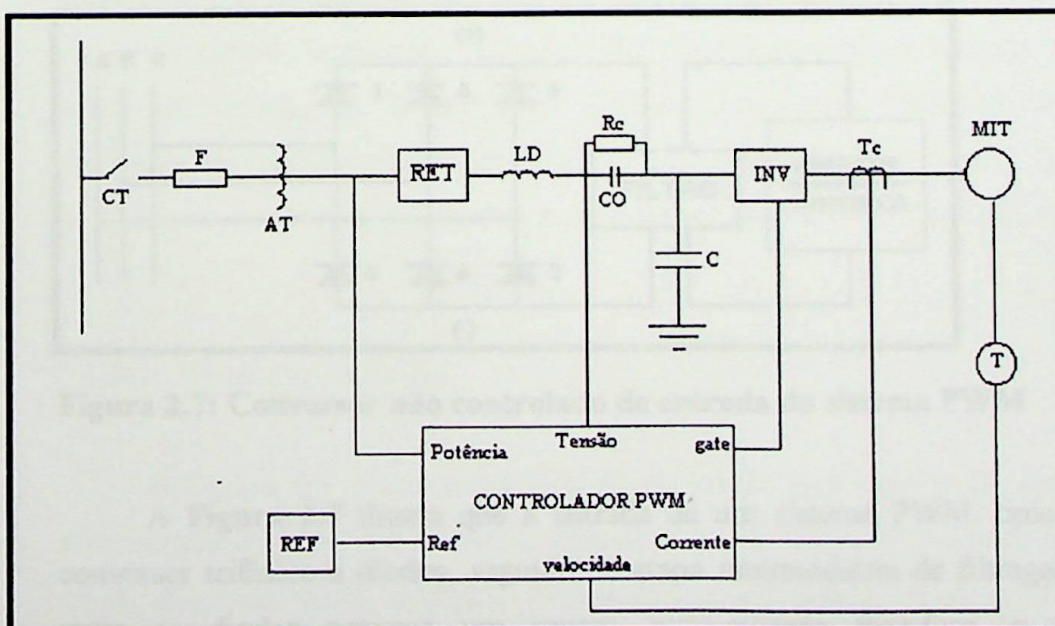


Figura 2.6: Diagrama Funcional do acionamento PWM

O controlador PWM é o circuito que tem por finalidade gerar os sinais de gatilho do Inversor através do processamento dos diversos sinais realimentados. Os sinais gerados pelo controlador são: uma onda triangular (portadora da modulação PWM), um sistema trifásico de tensões alternadas (tensões de referencia) e os sinais de habilitação das chaves eletrônicas do Inversor. Para gerar os sinais de habilitação dos semicondutores de uma determinada fase, compara-se a onda triangular de referência com a tensão alternada da fase, adotando-se o seguinte critério: quando os valores de tensão da onda triangular forem menores, é liberado um pulso para o semicondutor conectado ao barramento positivo do retificador. Em contrapartida, quando os valores da onda triangular forem maiores que os valores da referência senoidal, é liberado um pulso para o semicondutor conectado ao barramento negativo do retificador. Analogamente, as demais chaves eletrônicas são habilitadas adotando-se o mesmo procedimento comparativo, relativamente às respectivas fases.

2.2.5 Distorção Harmônica do acionamento PWM

A utilização de sistema de acionamento PWM provoca distorção das formas de onda de tensão e corrente tanto do lado da linha ou alimentação, quanto do lado da carga ou motor.

2.2.5.1 Distorção de Entrada

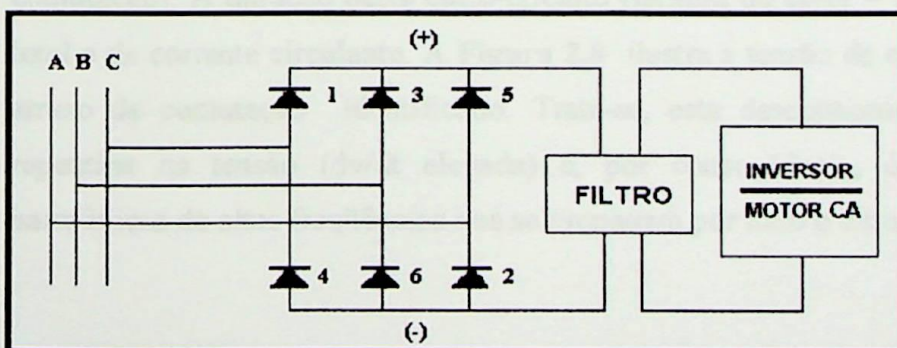


Figura 2.7: Conversor não controlado de entrada do sistema PWM

A Figura 2.7 ilustra que a entrada de um sistema PWM, típico compõe-se do conversor trifásico a diodos, seguido da etapa intermediária de filtragem. A comutação entre os diodos provoca um severo curto-circuito fase-fase, o que resulta em descontinuidades da forma de onda da tensão entre as fases de entrada.

2.2.5.2 Processo de Comutação

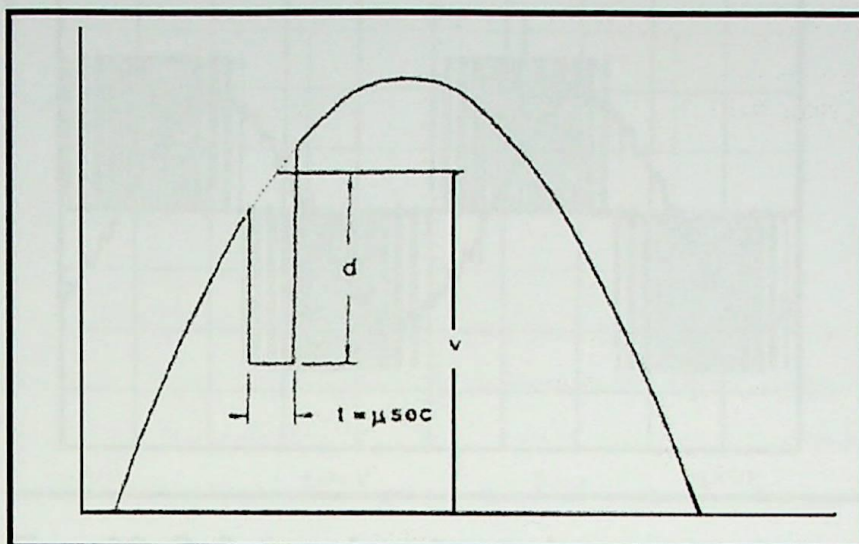


Figura 2.8: Definição da profundidade e área de corte

Comutação é o processo no qual uma ou mais chaves estáticas são bloqueadas simultaneamente a outras que entram em condução. Em um conversor de 6 pulsos as chaves operam em pares para retificarem a tensão alternada trifásica de entrada. Durante a comutação, quando a corrente começa a transferir-se de uma fase para outra, cria-se um curto-circuito temporário entre as fases. A reatância do transformador de alimentação inviabiliza a transferência instantânea da corrente de uma chave para a outra (tempo de corte ou comutação), resultando em um atraso (tempo necessário para completar a comutação). A duração deste curto-circuito (largura do corte = μ) é função da reatância total e da corrente circulante. A **Figura 2.8** ilustra a tensão de entrada fase-fase com o atraso de comutação identificado. Trata-se, esta descontinuidade, de uma mudança repentina na tensão (dv/dt elevada) e, por consequência, é rica em componentes harmônicos de altas frequências que se propagam por todo o sistema de potência.

2.2.5.3 Distorção de Saída

A **Figura 2.9** ilustra o oscilograma da tensão fase - fase e da corrente de linha de alimentação do MIT. Vê-se que as formas de onda de tensão possuem sucessivos pulsos retangulares de curta duração, característicos do processo de modulação utilizado, indicando a presença de considerável conteúdo harmônico que atua como fonte de stress para os enrolamentos do motor controlado.

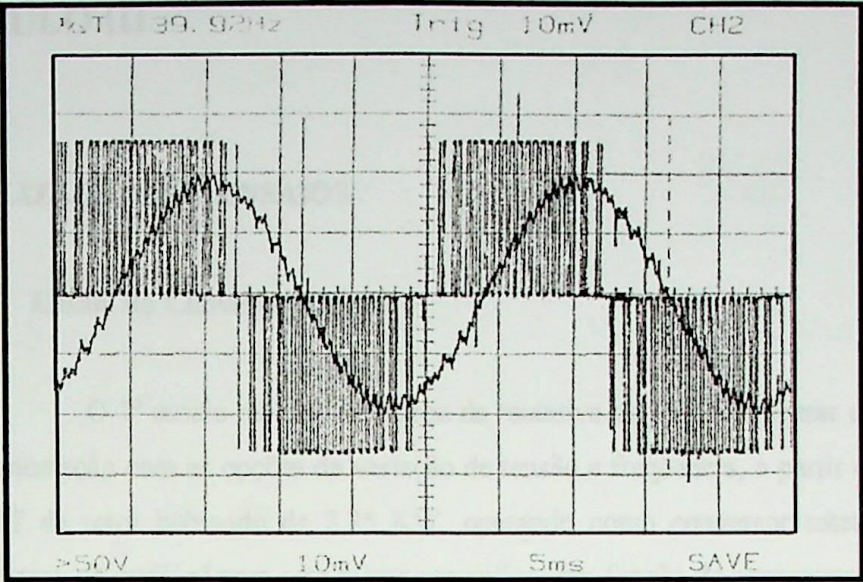


Figura 2.9: Oscilograma da tensão entre fases e corrente de linha de alimentação do MIT

Para obter a corrente de partida de alimentação foi montado um circuito simples por um motor de corrente contínua conectado a uma máquina síncrona (MIT-M3) cujo funcionamento encontra-se no Apêndice IV. A montagem foi realizada de modo a obter os dados sobre a tensão e frequência variáveis em função, respectivamente, das variações na velocidade de rotação e na velocidade de motor de corrente contínua. O sinal de onda foi monitorado por osciloscópio, freqüencímetro e voltímetro, permitindo a visualização da forma da onda e das variações de amplitude e período. As medições em nível são à base de campo forte utilizando-se de uma escala de um volt por divisão nos eixos de corrente de excitação de MIT. A Figura 2.9 a seguir ilustra o formato de ligação da máquina síncrona.

CAPÍTULO III

3. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

3.1 Ensaio do Conversor Rotativo

O 1º ensaio realizado constou da tentativa de se implementar o sistema padrão de alimentação com as opções de variação de tensão e frequência, a partir da utilização de um MIT de rotor bobinado de 2,25 KW, operando como conversor rotativo. A experiência mostrou-se inviável para este motor específico, em função do aparecimento de considerável poluição harmônica em baixas frequências. O relatório do ensaio encontra-se no **Apêndice I**.

3.2 Ensaio do Grupo Motor de Corrente Contínua/Máquina Síncrona (MCC/MS)

3.2.1 Descrição do Ensaio

Para definir a estrutura do padrão de alimentação foi ensaiado um conjunto composto por um motor de corrente contínua associado a uma máquina síncrona (MCC/MS), cujas características encontram-se no **Apêndice IV**. A montagem foi realizada de modo a se obter na saída níveis de tensões e frequências variáveis em função, respectivamente, das variações na excitação do alternador e na velocidade do motor de corrente contínua. O sinal de saída foi monitorado por osciloscópio, frequencímetro e voltímetro, garantindo a visualização do aspecto da onda e das variações de amplitude e período. As resistências em série com a bobina de campo foram utilizadas devido a inexistência de um reostato adequado aos níveis da corrente de excitação da MS. A **Figura 3.1** a seguir ilustra o esquema de ligação da máquina síncrona.

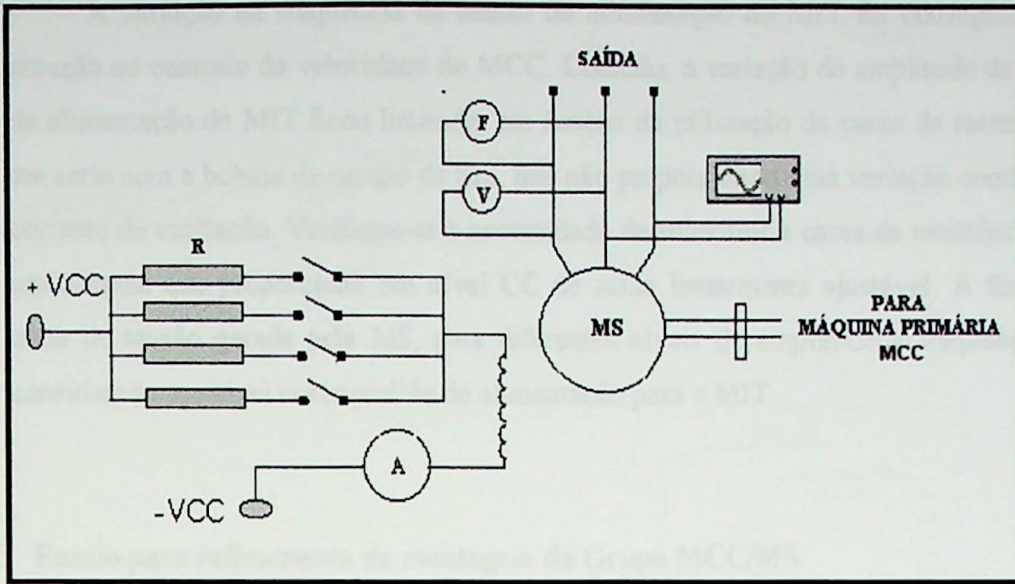


Figura 3.1: Ligação da MS

O MCC foi excitado através de uma fonte fixa, mantendo-se a corrente de excitação em um valor constante e igual a 3,05 (A). A ponte conversora não controlada foi adicionada para possibilitar a variação da tensão de armadura do MCC, através da variação do nível CA (varivolt), de maneira a permitir o controle de velocidade necessário à obtenção de uma tensão com frequência ajustável na armadura da máquina síncrona. A Figura 3.2 ilustra o esquema de ligação do MCC.

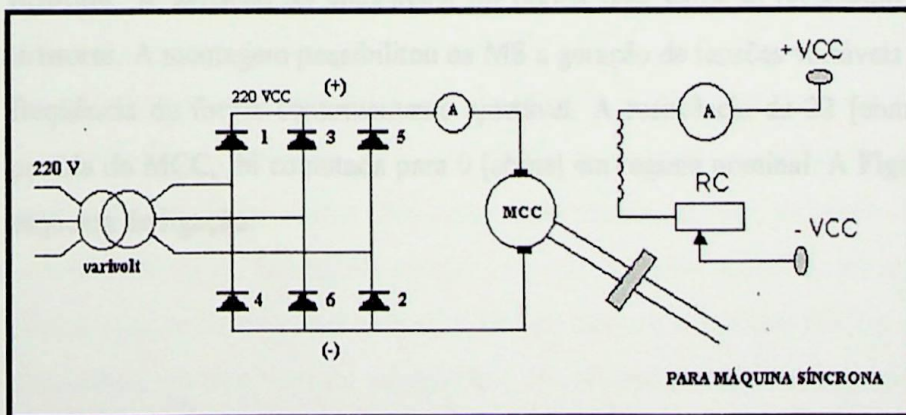


Figura 3.2: Ligação do MCC

3.2.2 Conclusão do Ensaio

A variação na frequência da tensão de alimentação do MIT foi conseguida pela atuação no controle de velocidade do MCC. Contudo, a variação de amplitude da tensão de alimentação do MIT ficou limitada, em função da utilização da caixa de resistências, em série com a bobina de campo da MS, que não proporcionou uma variação contínua da corrente de excitação. Verificou-se a necessidade de substituir a caixa de resistências por um sistema que proporcione um nível CC de saída linearmente ajustável. A forma de onda de tensão gerada pela MS, para diferentes níveis de amplitude e frequência, foi considerado aceitável como padrão de alimentação para o MIT.

3.3 Ensaio para refinamento da montagem do Grupo MCC/MS

3.3.1 Descrição do Ensaio

A fim de se obter uma tensão de alimentação para o MIT linearmente variável, utilizou-se a ponte conversora a diodos adicionada ao circuito de campo da MS, fazendo com que a variação da corrente de excitação fosse obtida pela atuação no varivolt de controle (lado CA). O conversor não controlado foi deslocado para o circuito de campo da MS e a caixa de resistências RC foi utilizada em série com o enrolamento de campo do MCC. Uma resistência de partida 22 [ohms], foi utilizada em série com a armadura da máquina, que passou a ser alimentada por intermédio de um conversor controlado a tiristores. A variação de velocidade foi obtida pela variação do ângulo de disparo dos tiristores. A montagem possibilitou na MS a geração de tensões variáveis em amplitude e frequência de forma continuamente ajustável. A resistência de 22 [ohms], utilizada na partida do MCC, foi comutada para 0 [ohms] em regime nominal. A **Figura 3.3** ilustra o esquema de ligação.

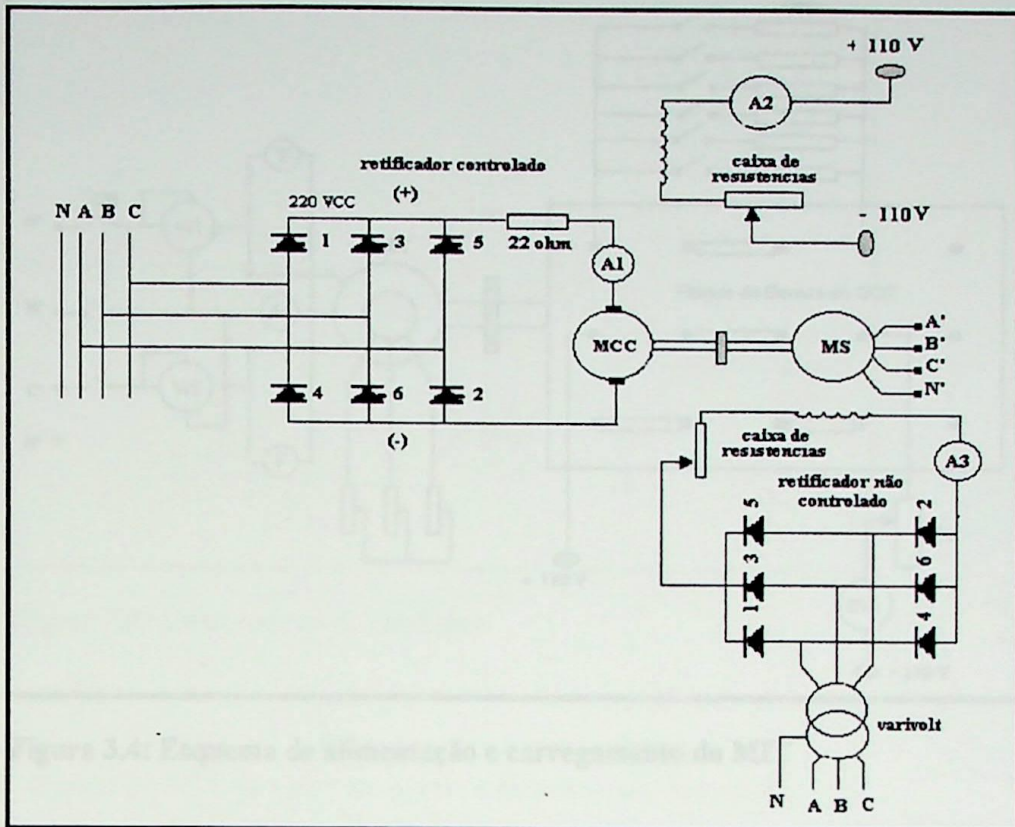


Figura 3.3: Padrão de alimentação senoidal

3.4 Ensaio de avaliação do esquema de variação de carga e medição de conjugado

3.4.1 Descrição do Ensaio

Definido o sistema padrão de alimentação, o problema consistiu em estabelecer a montagem englobando o MIT, de modo a permitir a realização do ensaio com carregamentos diversos para cada patamar de rotação imposto ao motor. O arranjo para a variação da carga foi implementado por um esquema indireto, no qual o motor foi interligado mecanicamente a um Gerador de Corrente Contínua (GCC), que por sua vez alimentava um conjunto de resistências. Ao adicionar resistência à armadura do GCC, aumentava diretamente a necessidade de fornecimento de potência elétrica, que refletia por via de consequência em um incremento na potência mecânica oriunda do MIT. O mecanismo de medição de conjugado foi implementado utilizando-se o Método do Dinamômetro. A potência fornecida pela MS, bem como a tensão e frequência geradas foram monitoradas pelos instrumentos instalados na entrada de alimentação do motor. A Figura 3.4 a seguir ilustra o esquema adotado.

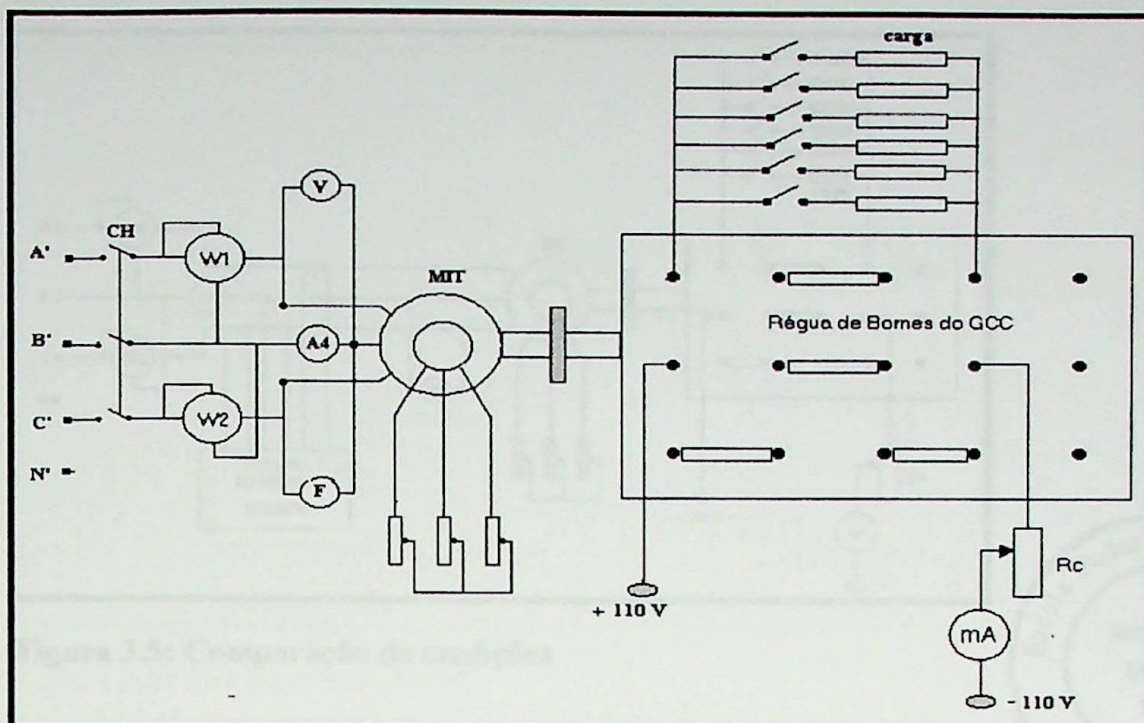


Figura 3.4: Esquema de alimentação e carregamento do MIT

3.5 Ensaio do MIT com rotor bobinado e acionamento senoidal – medições eletrônica e eletrodinâmica

3.5.1 Descrição do Ensaio

A ponte conversora controlada foi ajustada para que o MCC operasse com rotação nominal (1500 rpm) excitado por uma corrente de 3,05 (A). A MS por sua vez, com rotação de 1500 rpm gera uma tensão em 50 (Hz), cujo nível foi ajustado em 220 (V) pela variação na corrente de excitação. Portanto, o grupo motor-gerador, operando em condições nominais, alimenta o MIT em 220 (V)/50 (Hz). O primeiro conjunto de medidas foi realizado para as condições nominais de alimentação e com o MIT operando à vazio, ou seja, o GCC sem carga. O conjugado limite foi determinado pelo número máximo de resistências adicionadas ao GCC, que produzia a corrente nominal de placa do MIT (7,5 A). À medida que a carga era incrementada, exigiam-se ajustes na velocidade do MCC e na excitação da MS, de modo a manter constantes a amplitude e frequenciada tensão de alimentação. O conjunto de todos os parâmetros impostos (conjugados de carga, frequências e tensões de alimentação), bem como os resultados das medições realizadas encontram-se no **Apêndice II**, planilhas: **Senoidal - Bobinado – Medição Eletrodinâmica** e **Senoidal - Bobinado – Medição Eletrônica**. A Figura 3.5 a seguir ilustra o esquema adotado.

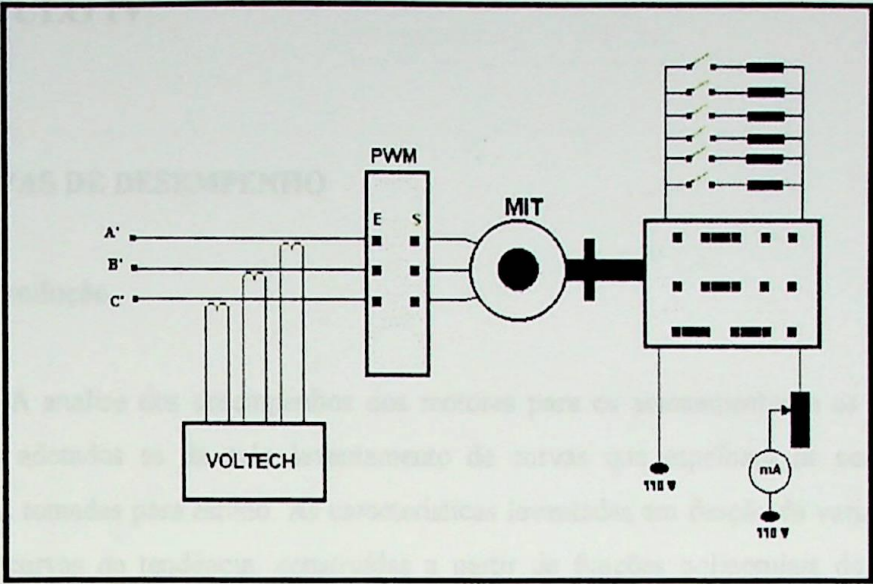


Figura 3.6: Acionamento PWM

3.8 Ensaio do MIT de rotor em gaiola e acionamento PWM com parametrização Vetorial e chaveamento de 8 kHz

Diferentemente do ensaio anterior, neste o equipamento PWM foi parametrizado utilizando-se da opção Expert (Controle Vetorial) e chaveamento de 8 kHz. A planilha **Vetorial - Gaiola** que contém as medições realizadas encontra-se no **Apêndice II**.

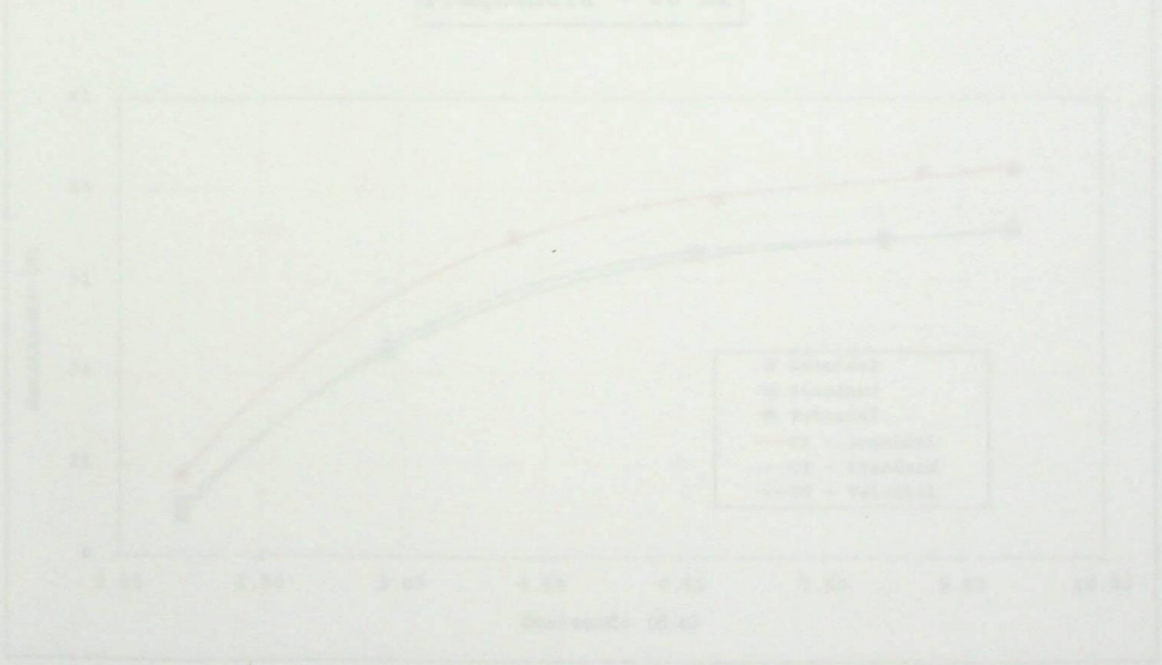


Figura 4.2.1 - 1: Curvas de Torque e Velocidade versus Torque para os dois métodos de controle: Vetorial e PWM (parametrização Vetorial e Vetorial) para operação em regime normal.

CAPITULO IV

4. CURVAS DE DESEMPENHO

4.1 Introdução

A análise dos desempenhos dos motores para os acionamentos e os vários regimes de operação adotados se dá pelo levantamento de curvas que espelham os comportamentos das grandezas tomadas para estudo. As características levantadas em função da variação do conjugado utilizam curvas de tendência, construídas a partir de funções polinomiais de terceiro grau. As características plotadas em função da variação de frequência utilizam funções de interpolação do MATLAB. Cada gráfico compõe-se das curvas de desempenho dos acionamentos Senoidal e PWM e este, por sua vez, caracterizado pelas opções de parametrização standard e vetorial.

4.2 Comportamento do Rendimento

4.2.1 Rendimento X Conjugado - por classe de frequência

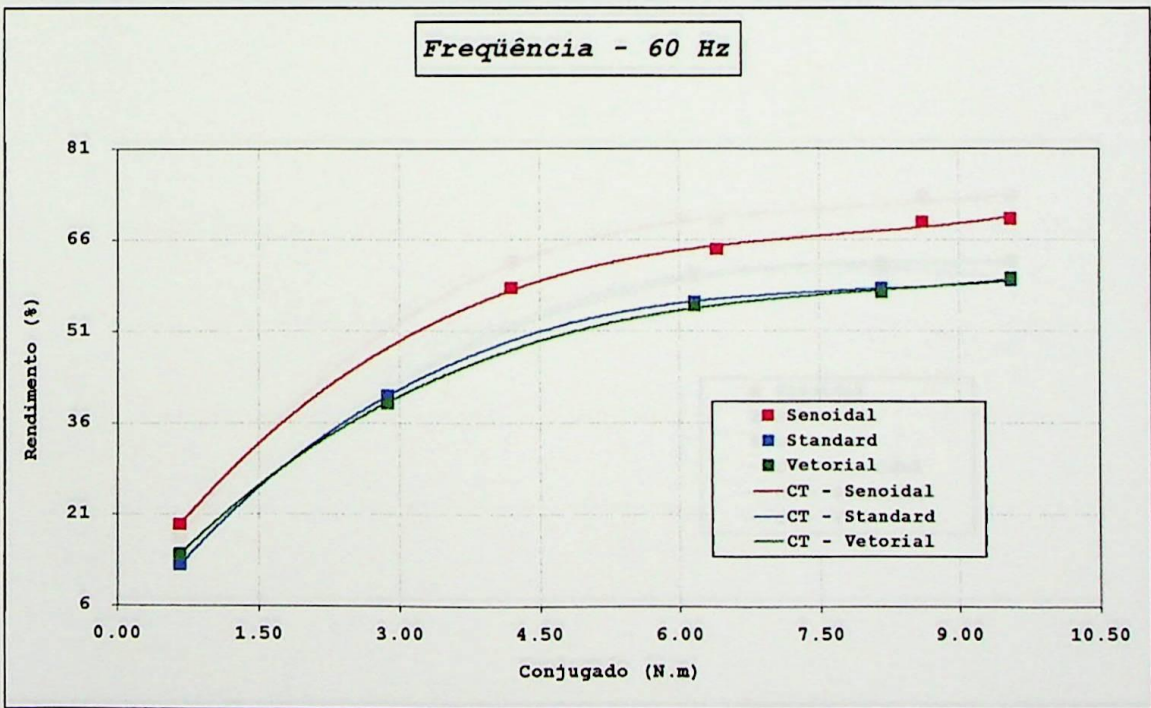


Figura 4.2.1 - 1: Curvas de Tendência do Rendimento versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em frequência nominal.

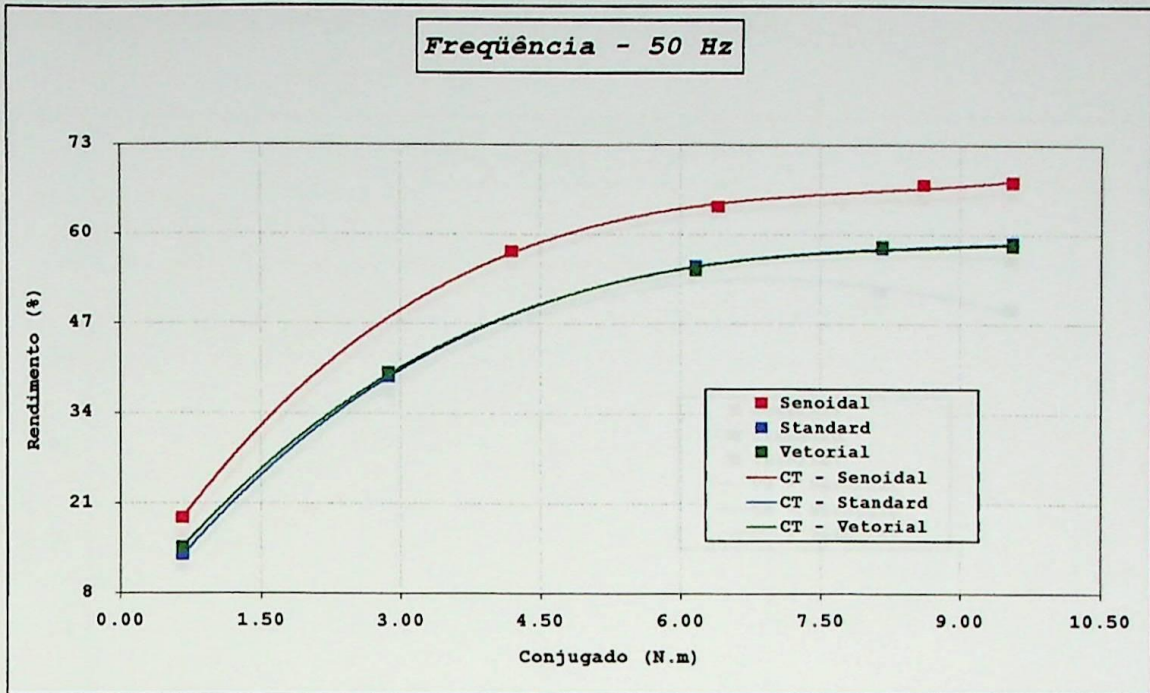


Figura 4.2.1 - 2: Curvas de Tendência do Rendimento versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 50 Hz.

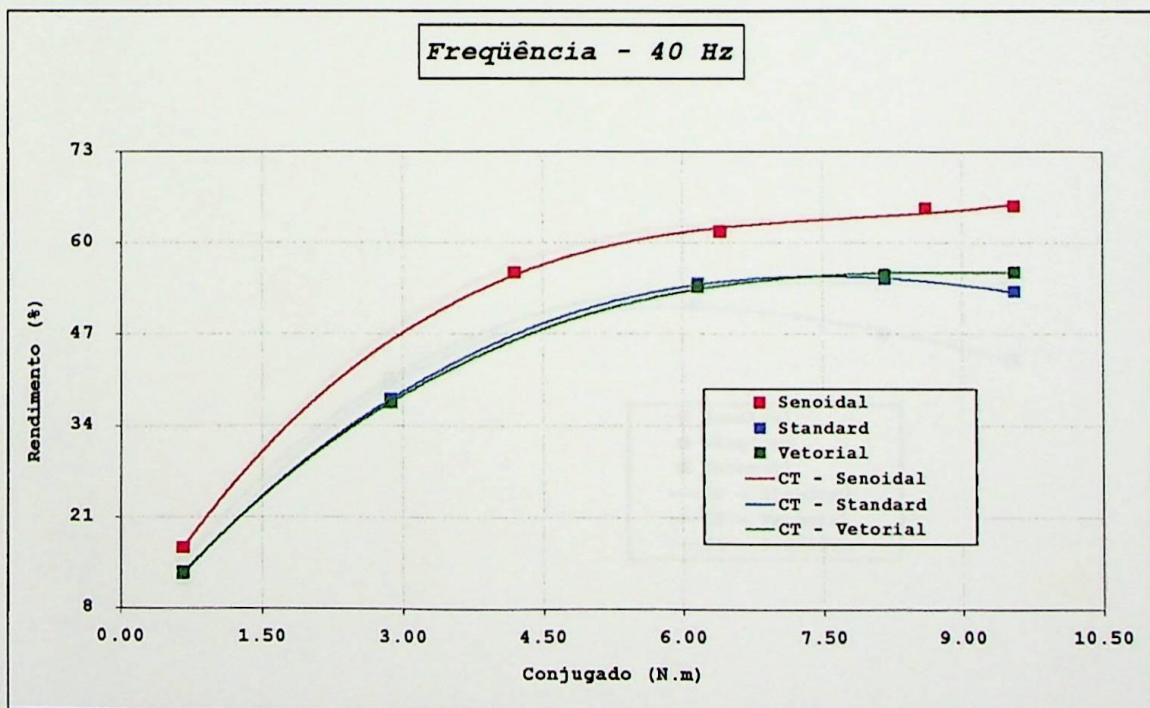


Figura 4.2.1 - 3: Curvas de Tendência do Rendimento versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 40 Hz.

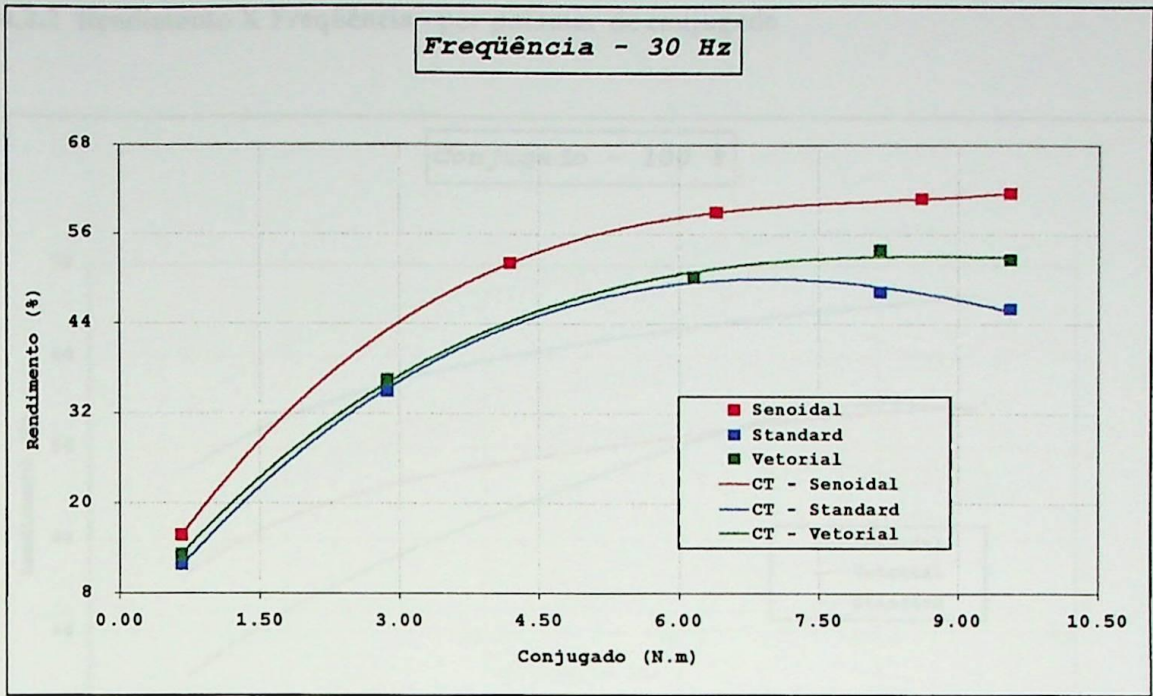


Figura 4.2.1 - 4: Curvas de Tendência do Rendimento versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 30 Hz.

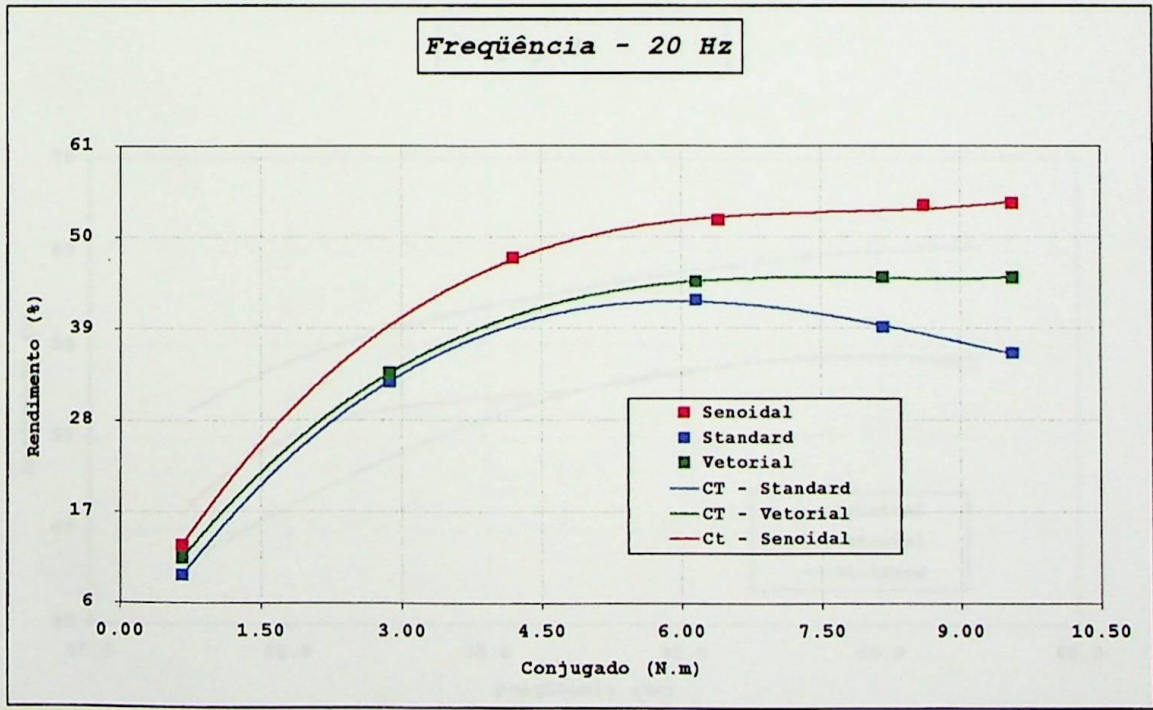


Figura 4.2.1 - 5: Curvas de Tendência do Rendimento versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 20 Hz.

4.2.2 Rendimento X Frequência - por patamar de conjugado

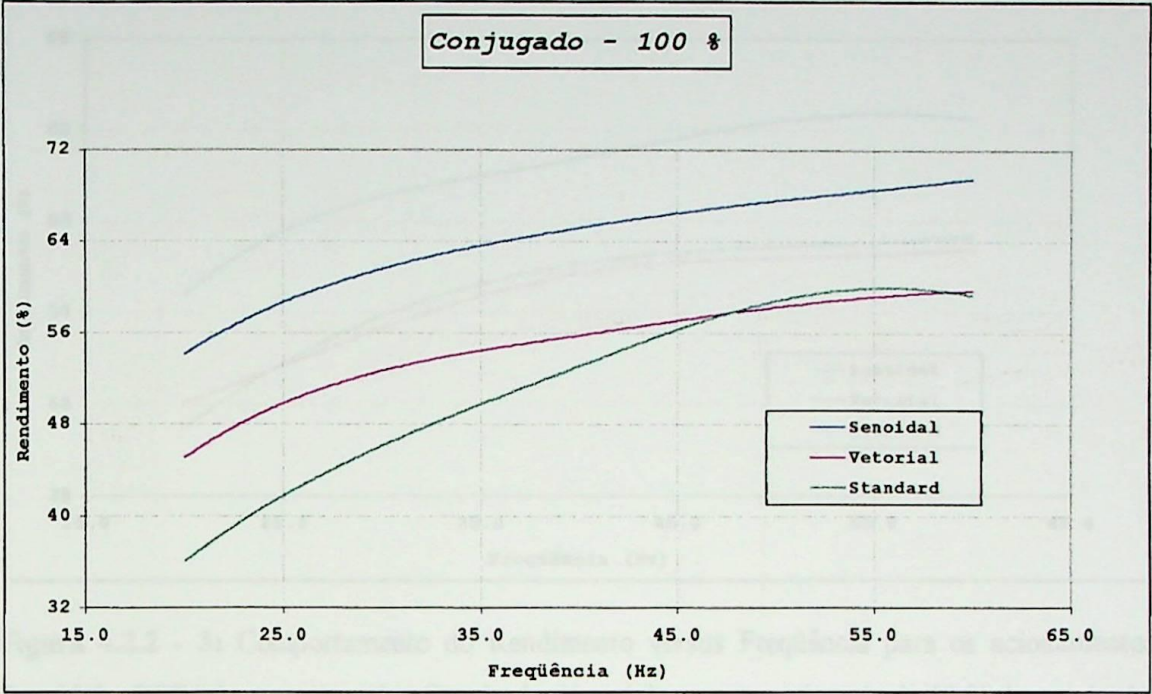


Figura 4.2.2 - 1: Comportamento do Rendimento versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado nominal.

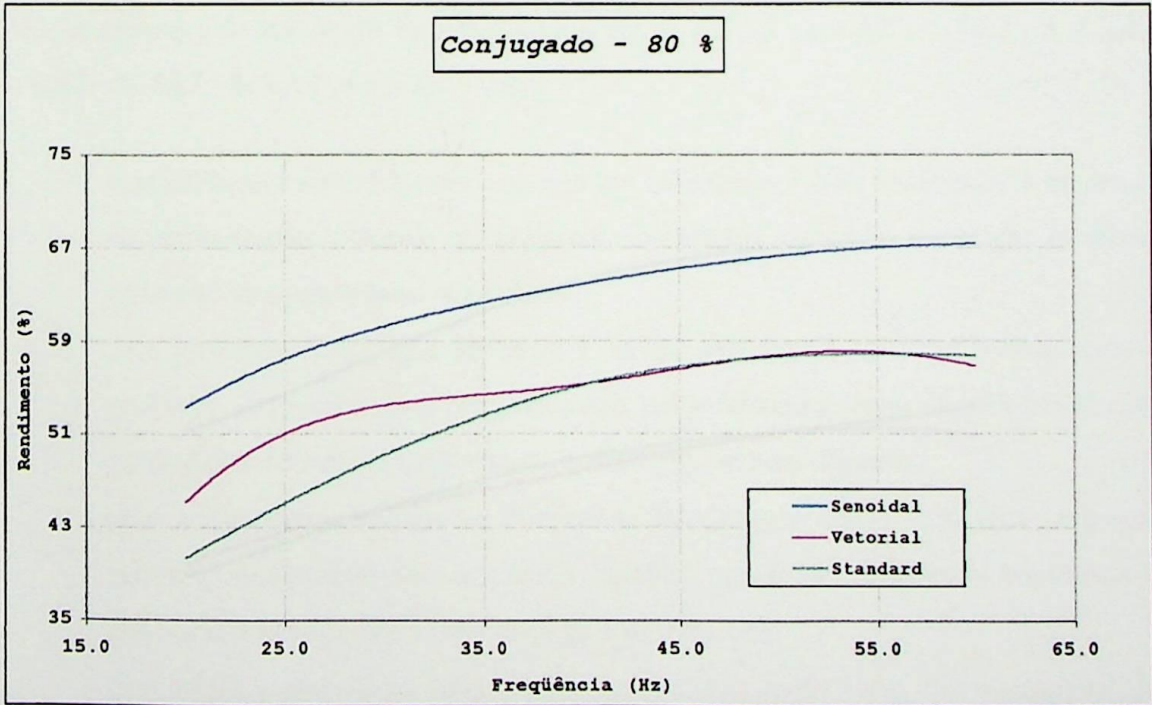


Figura 4.2.2 - 2: Comportamento do Rendimento versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 80 % do nominal.

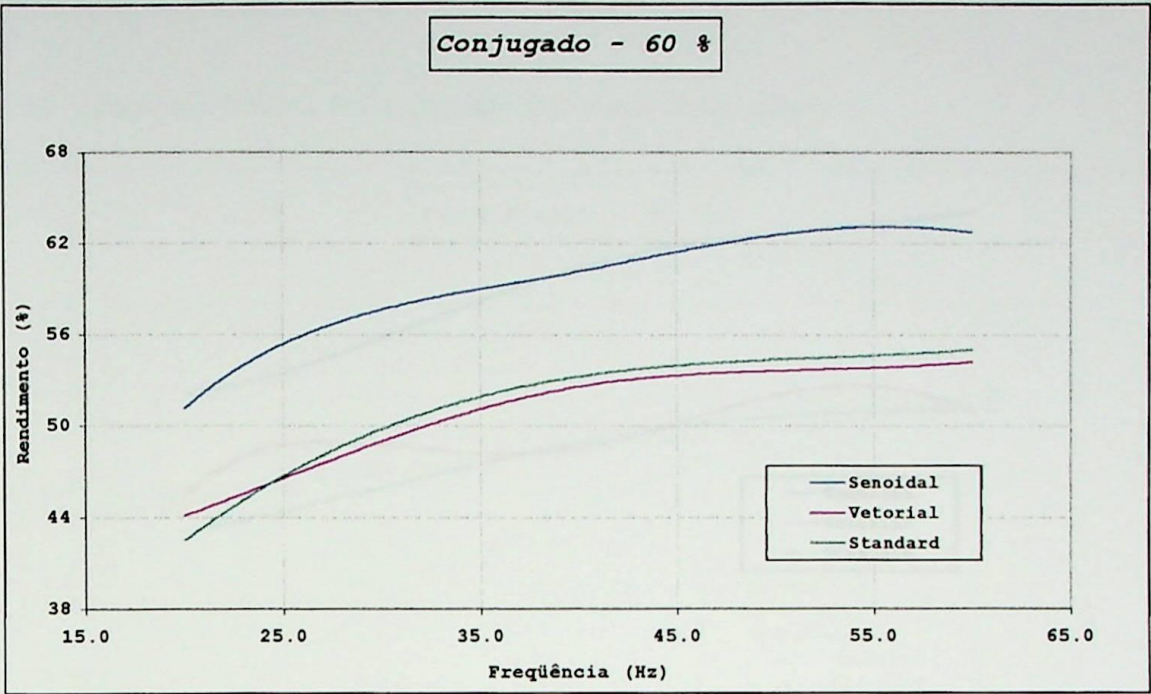


Figura 4.2.2 - 3: Comportamento do Rendimento versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 60 % do nominal.

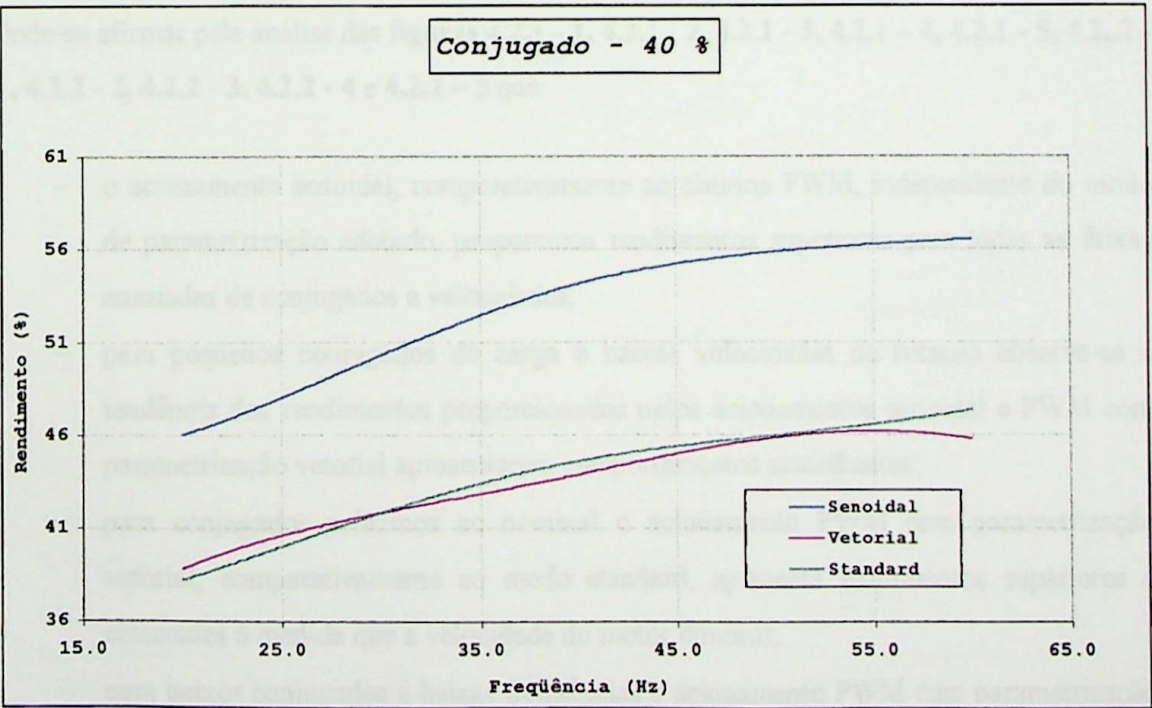


Figura 4.2.2 - 4: Comportamento do Rendimento versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 40 % do nominal.

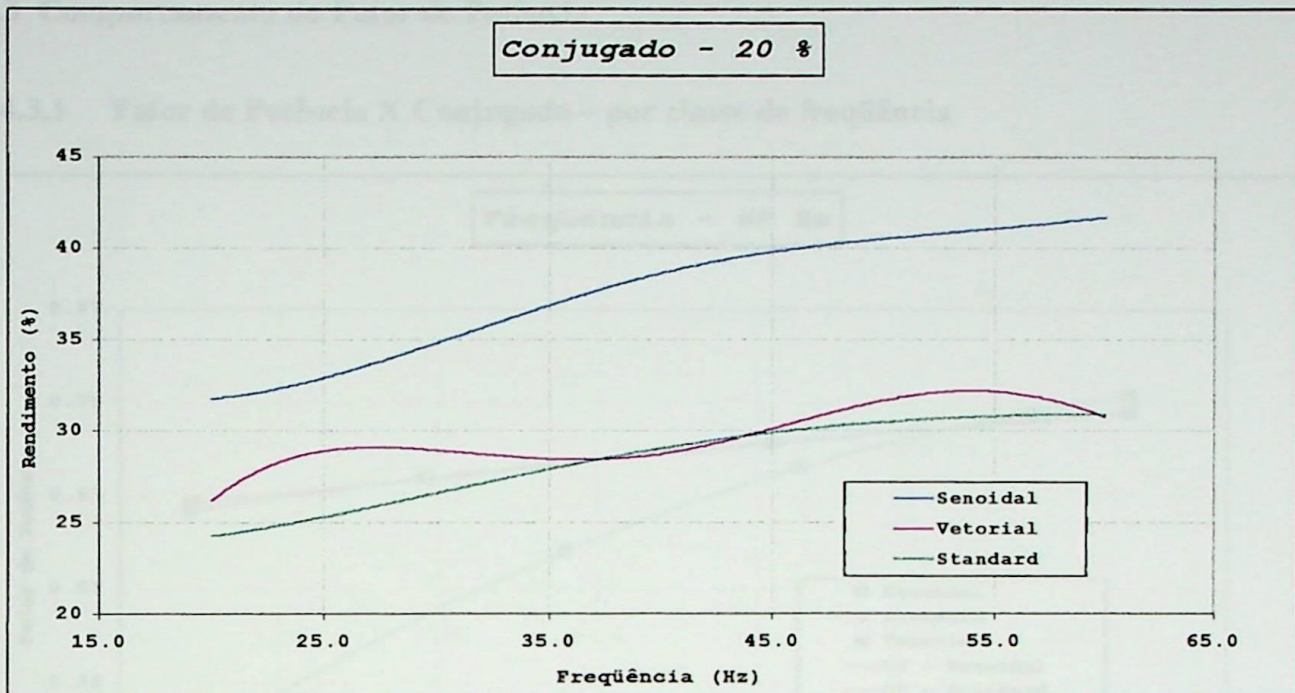


Figura 4.2.2 - 5: Comportamento do Rendimento versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 20 % do nominal.

COMENTÁRIO

Pode-se afirmar pela análise das figuras 4.2.1 - 1, 4.2.1 - 2, 4.2.1 - 3, 4.2.1 - 4, 4.2.1 - 5, 4.2.2 - 1, 4.2.2 - 2, 4.2.2 - 3, 4.2.2 - 4 e 4.2.2 - 5 que:

- o acionamento senoidal, comparativamente ao sistema PWM, independente do modo de parametrização adotado, proporciona rendimentos superiores para todas as faixas ensaiadas de conjugados e velocidades;
- para pequenos conjugados de carga e baixas velocidades de rotação observa-se a tendência dos rendimentos proporcionados pelos acionamentos senoidal e PWM com parametrização vetorial apresentarem comportamentos semelhantes;
- para conjugados próximos ao nominal o acionamento PWM com parametrização vetorial, comparativamente ao modo standard, apresenta rendimentos superiores e crescentes à medida que a velocidade do motor diminui;
- para baixos conjugados e baixas frequências o acionamento PWM com parametrização vetorial apresenta rendimentos ligeiramente superiores ao modo standard;
- para valores intermediários de conjugados, independente da frequência, as diferenças entre os rendimentos das parametrizações do acionamento PWM são desprezíveis.

4.3 Comportamento do Fator de Potência

4.3.1 Fator de Potência X Conjugado – por classe de frequência

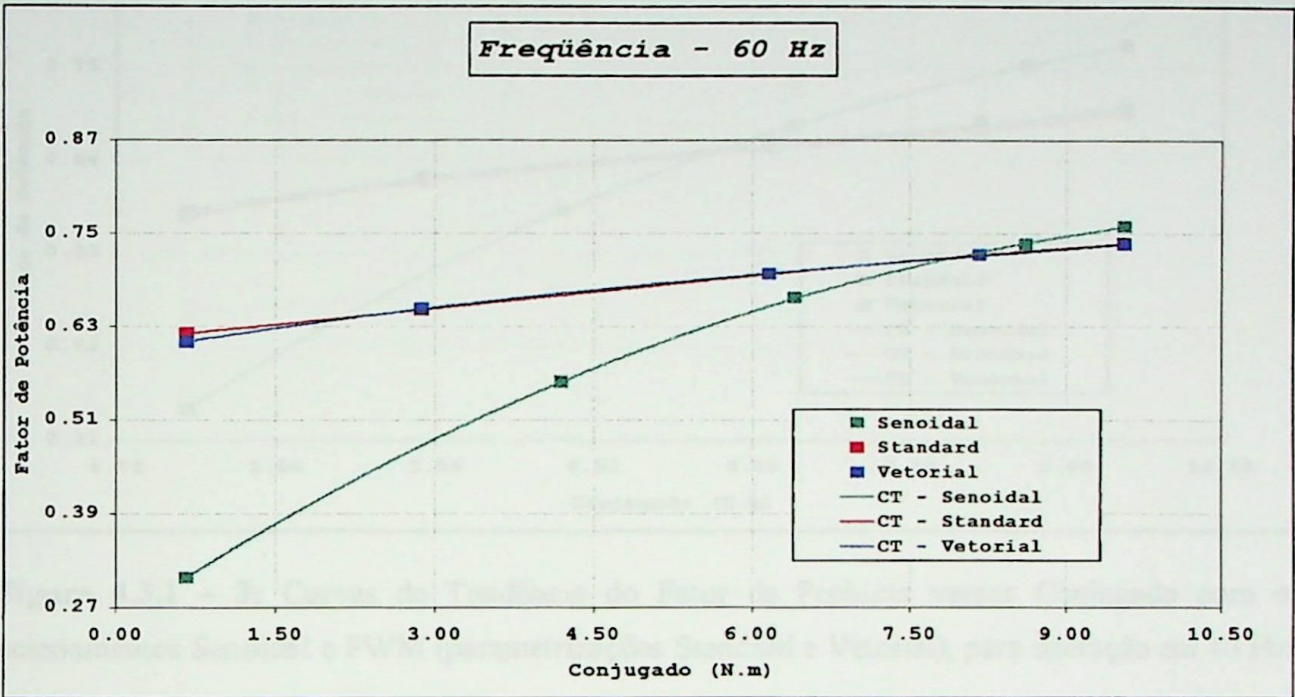


Figura 4.3.1 – 1: Curvas de Tendência do Fator de Potência versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 60 Hz.

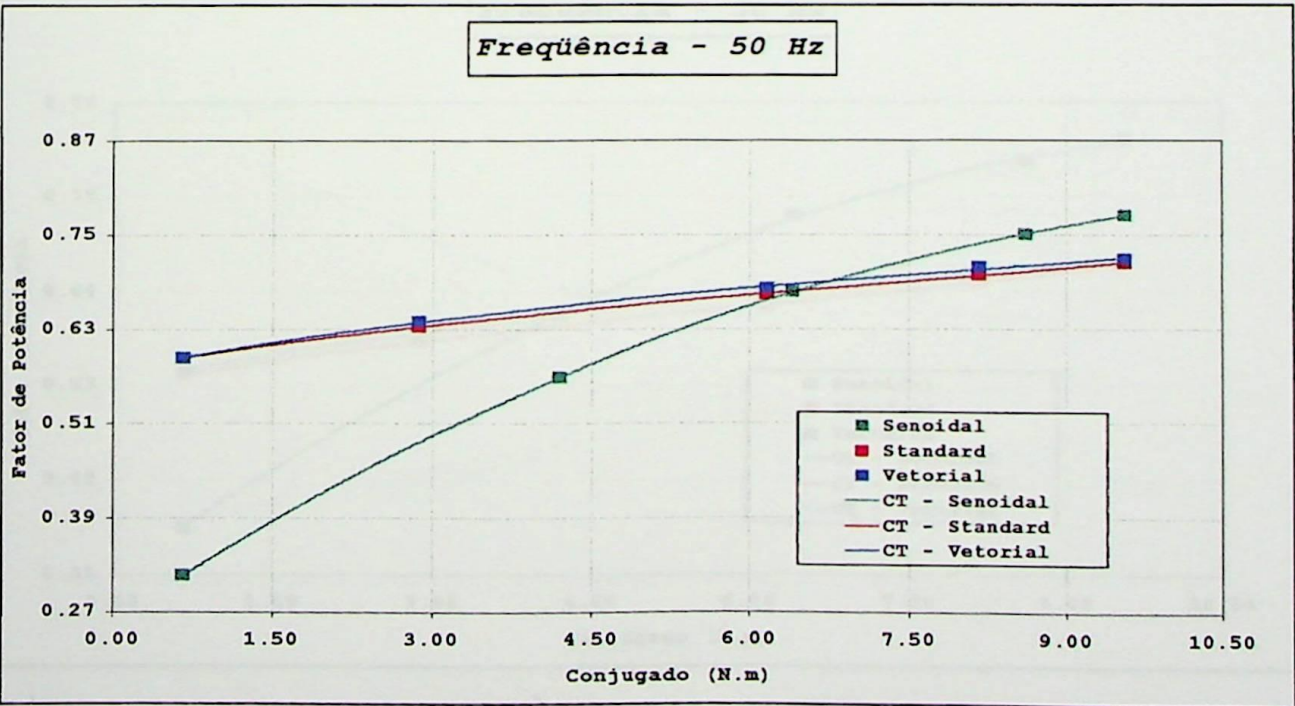


Figura 4.3.1 – 2: Curvas de Tendência do Fator de Potência versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 50 Hz.

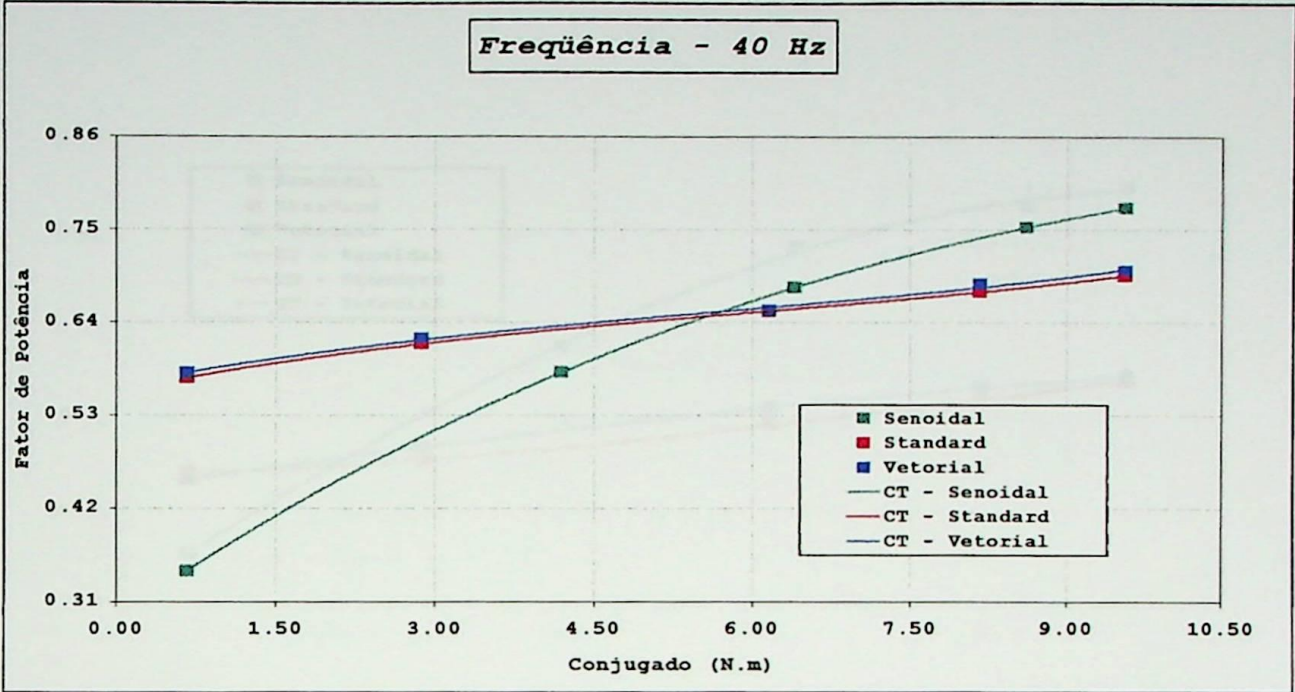


Figura 4.3.1 – 3: Curvas de Tendência do Fator de Potência versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 40 Hz.

4.3.2 Fator de Potência X Frequência - por potência de conjugado

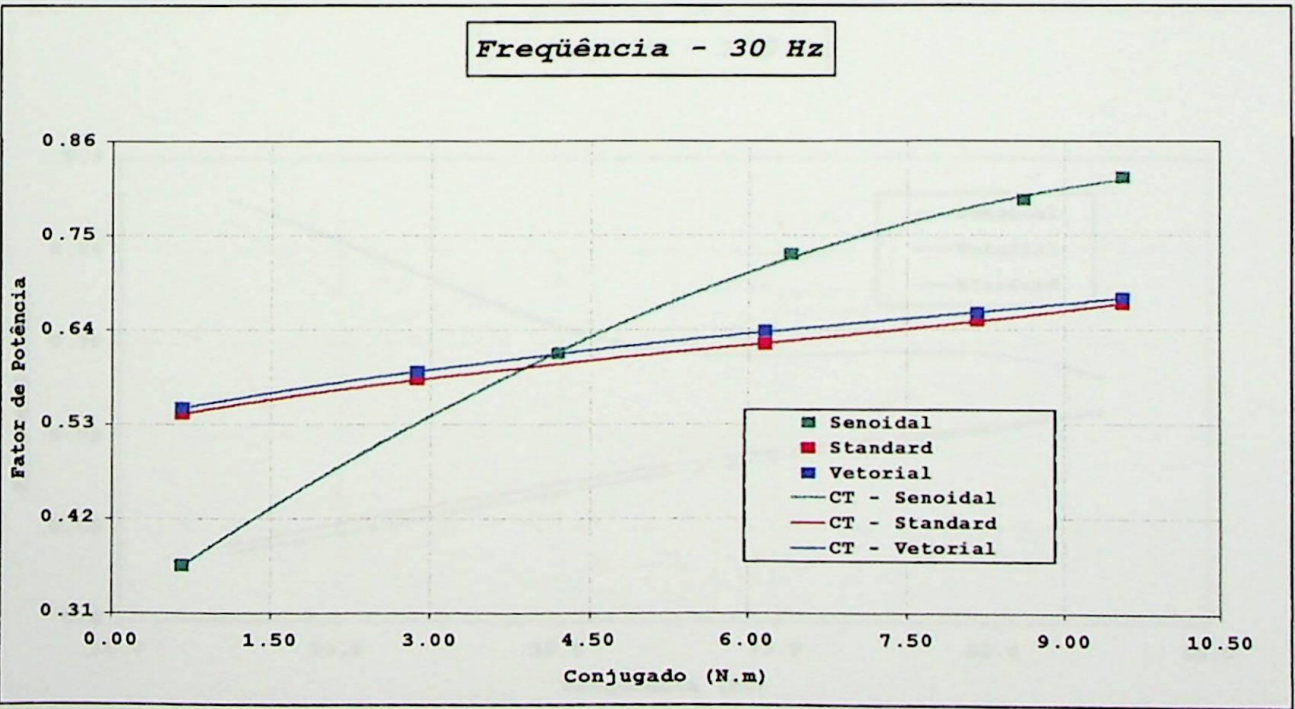


Figura 4.3.1 – 4: Curvas de Tendência do Fator de Potência versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 30 Hz.

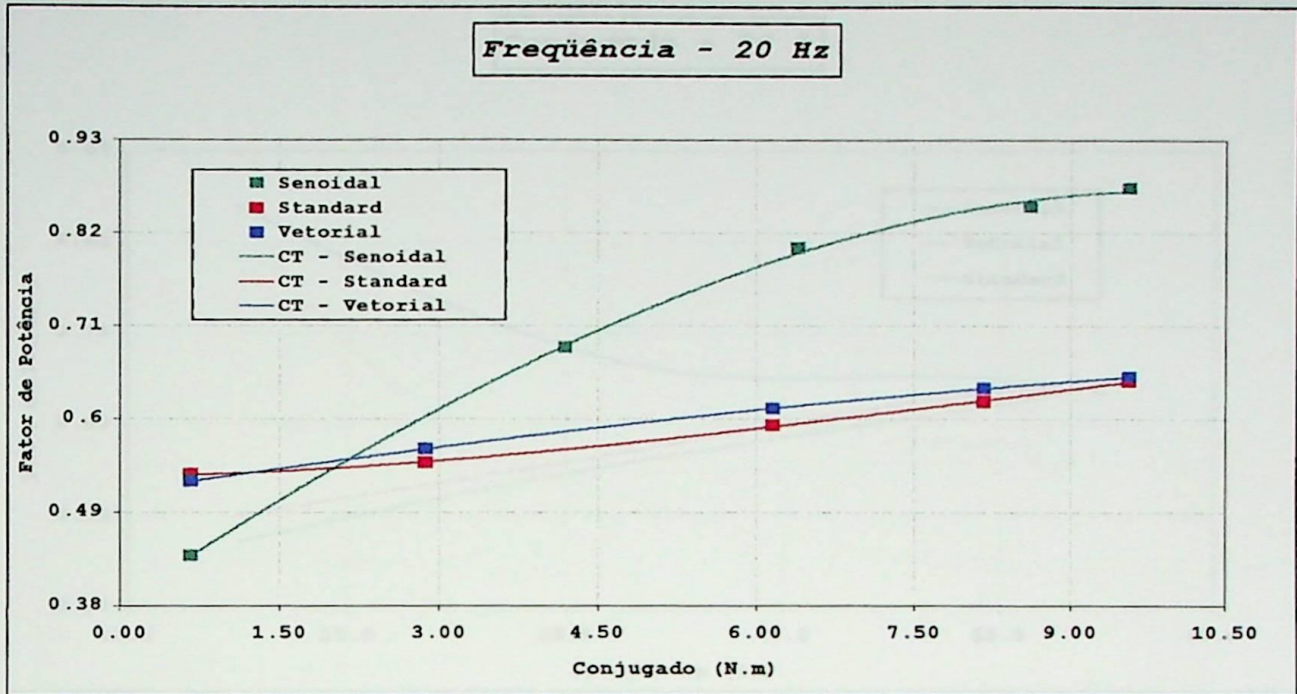


Figura 4.3.1 – 5: Curvas de Tendência do Fator de Potência versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 20 Hz.

4.3.2 Fator de Potência X Frequência - por patamar de conjugado

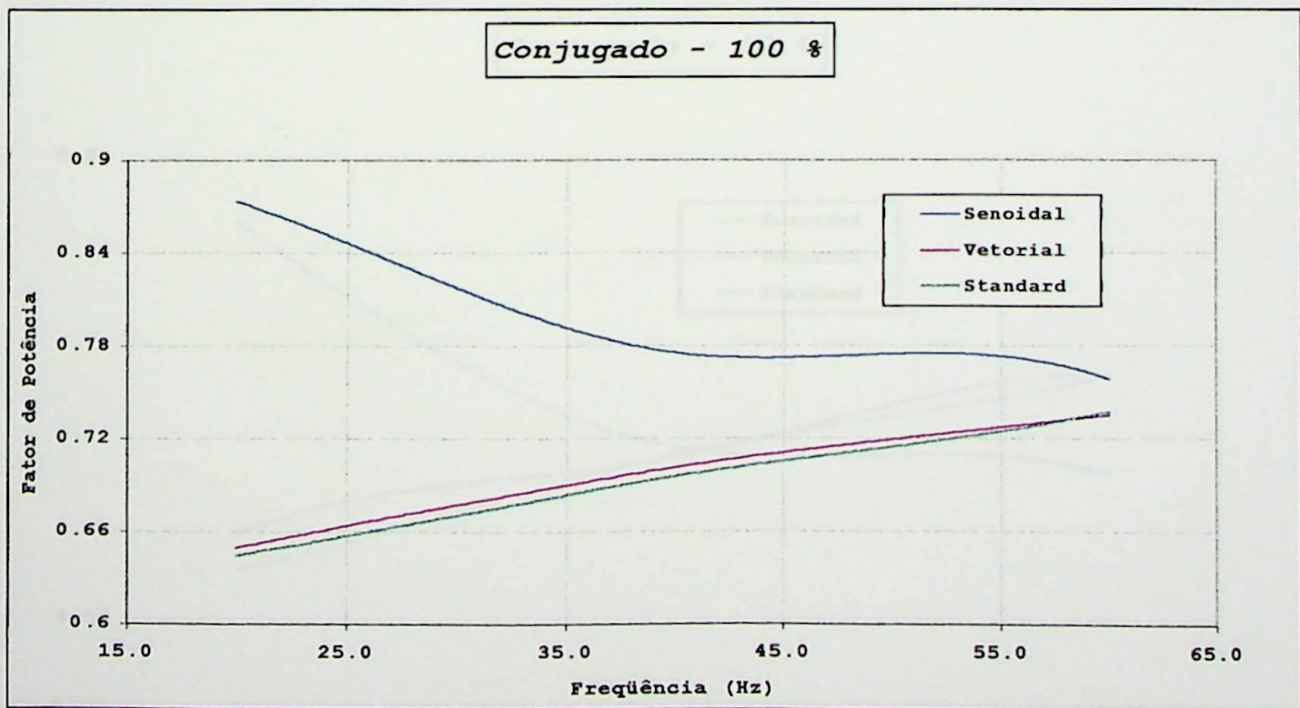


Figura 4.3.2 - 1: Comportamento do Fator de Potência versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado nominal.

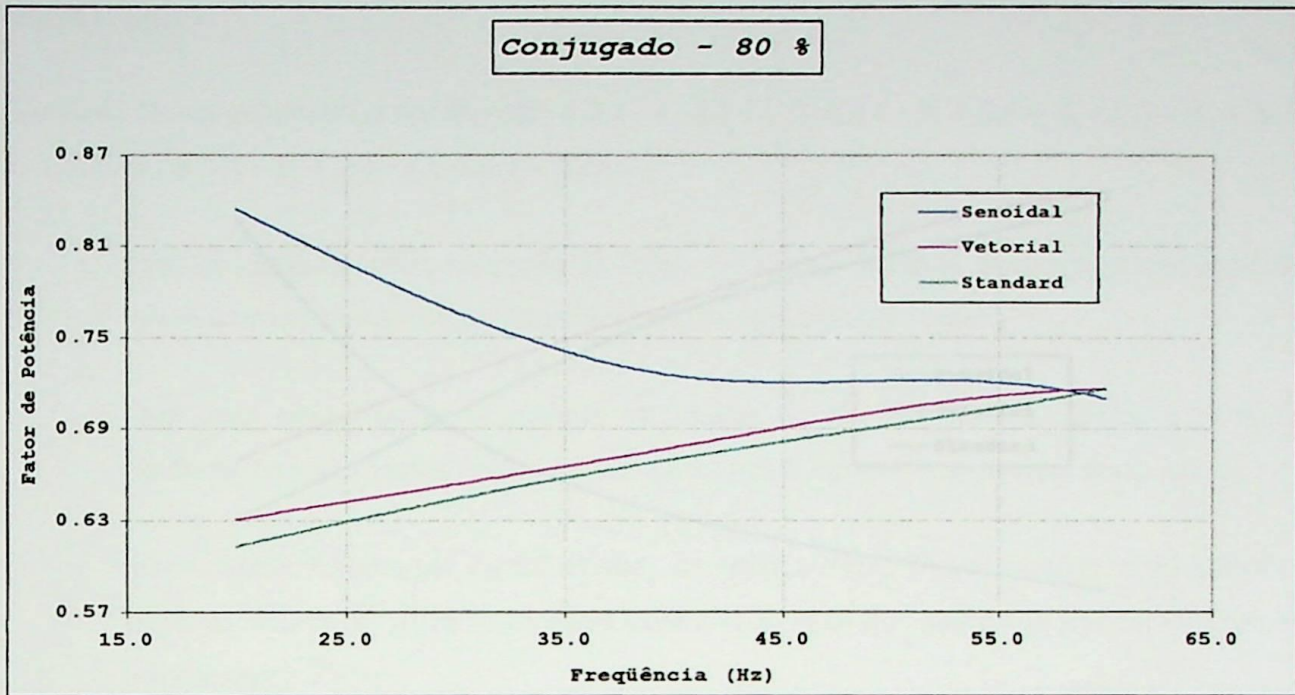


Figura 4.3.2 - 2: Comportamento do Fator de Potência versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 80 % do nominal.

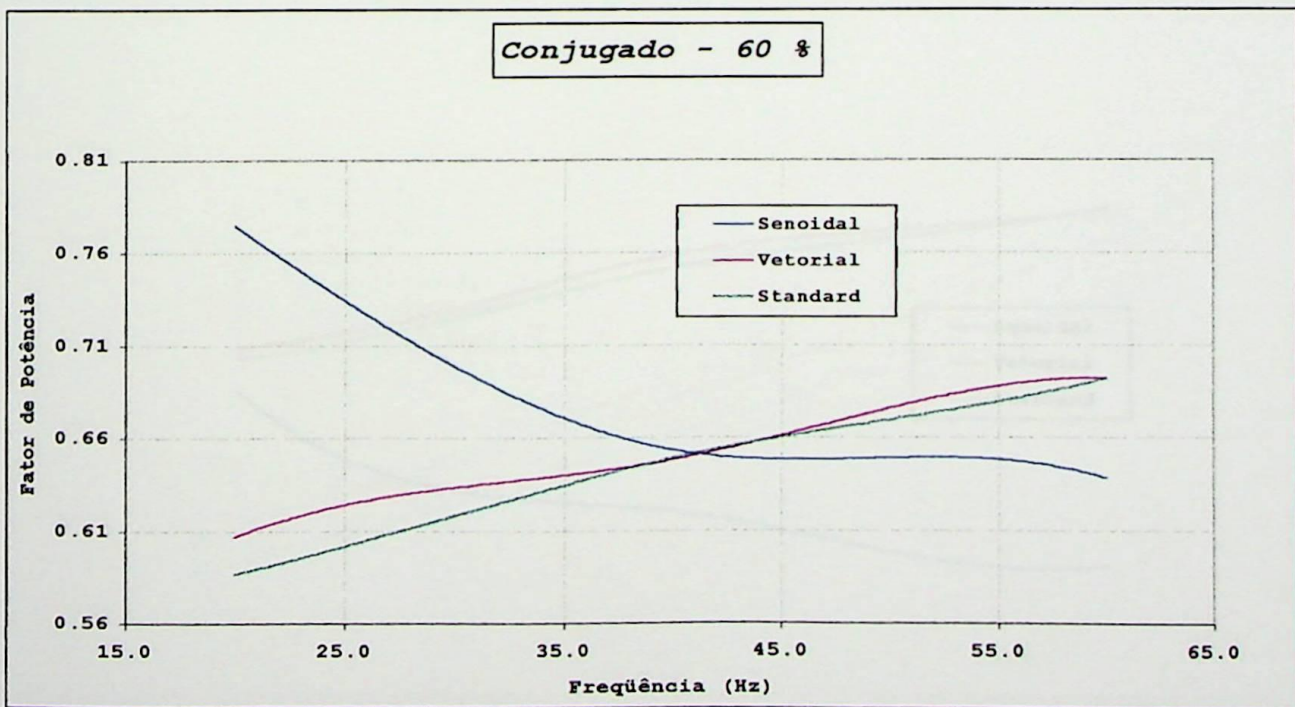


Figura 4.3.2 - 3: Comportamento do Fator de Potência versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 60 % do nominal.

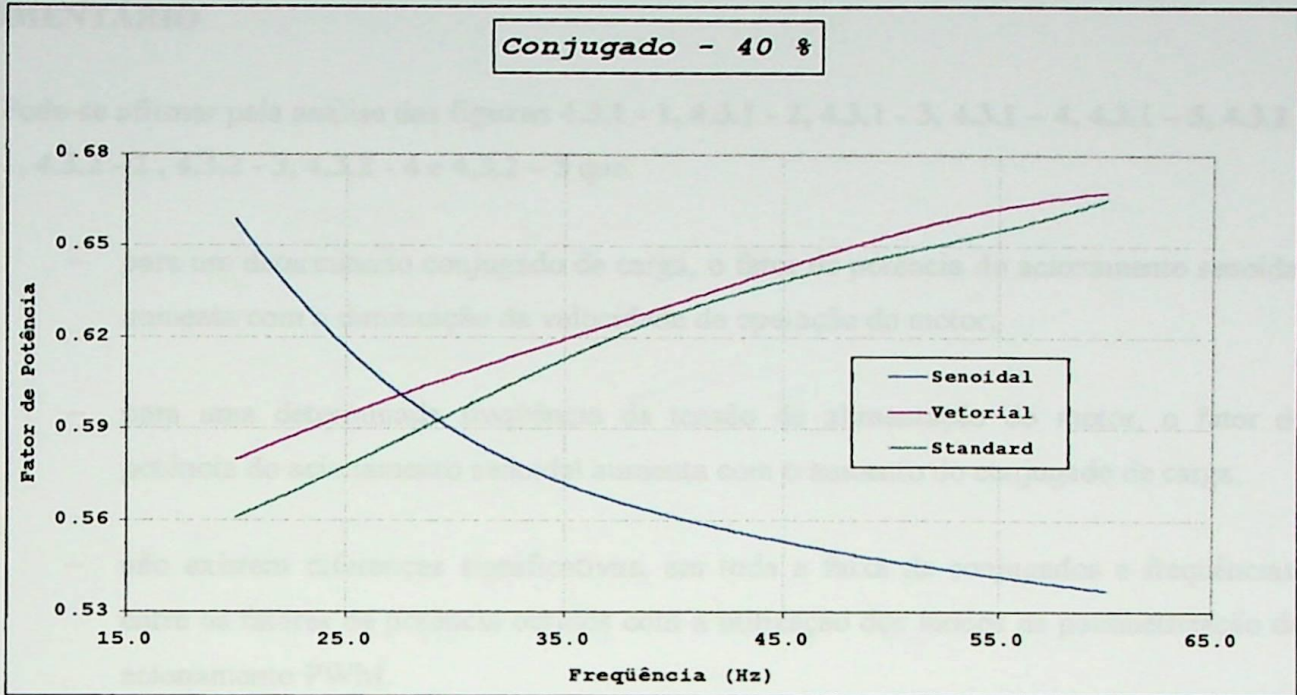


Figura 4.3.2 - 4: Comportamento do Fator de Potência versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 40 % do nominal.

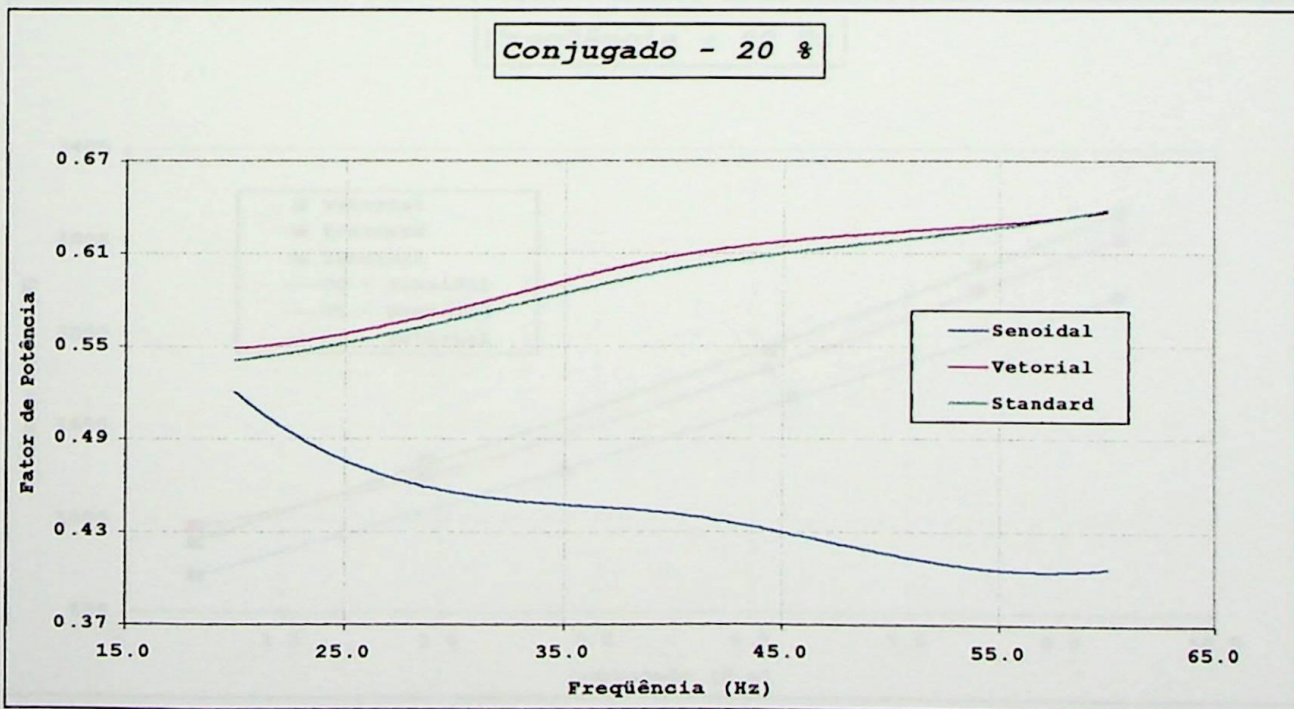


Figura 4.3.2 - 5: Comportamento do Fator de Potência versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 20 % do nominal.

COMENTÁRIO

Pode-se afirmar pela análise das figuras 4.3.1 - 1, 4.3.1 - 2, 4.3.1 - 3, 4.3.1 - 4, 4.3.1 - 5, 4.3.2 - 1, 4.3.2 - 2, 4.3.2 - 3, 4.3.2 - 4 e 4.3.2 - 5 que:

- para um determinado conjugado de carga, o fator de potência do acionamento senoidal aumenta com a diminuição da velocidade de operação do motor;
- para uma determinada frequência da tensão de alimentação do motor, o fator de potência do acionamento senoidal aumenta com o aumento do conjugado de carga;
- não existem diferenças significativas, em toda a faixa de conjugados e frequências, entre os fatores de potência obtidos com a utilização dos modos de parametrização do acionamento PWM.

4.4 Comportamento da Potência Ativa

4.4.1 Potência Ativa X Conjugado - por classe de frequência

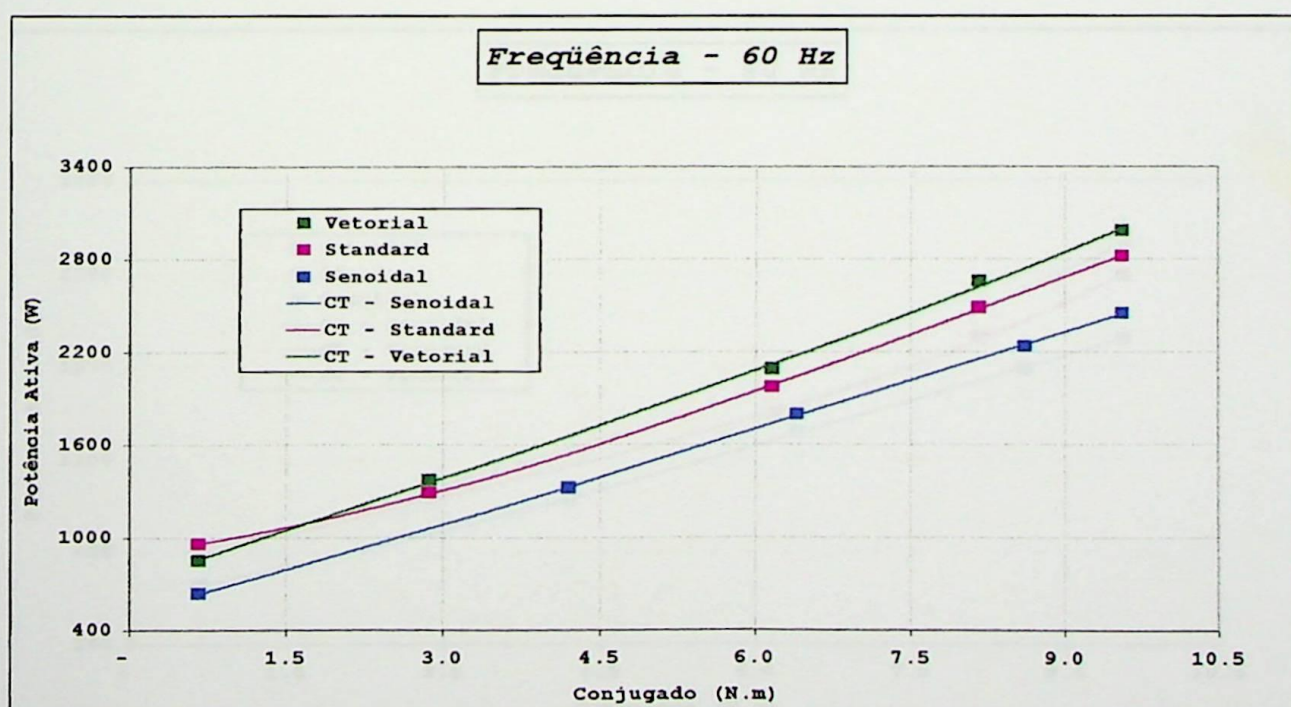


Figura 4.4.1 - 1: Curvas de Tendência da Potência Ativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 60 Hz.

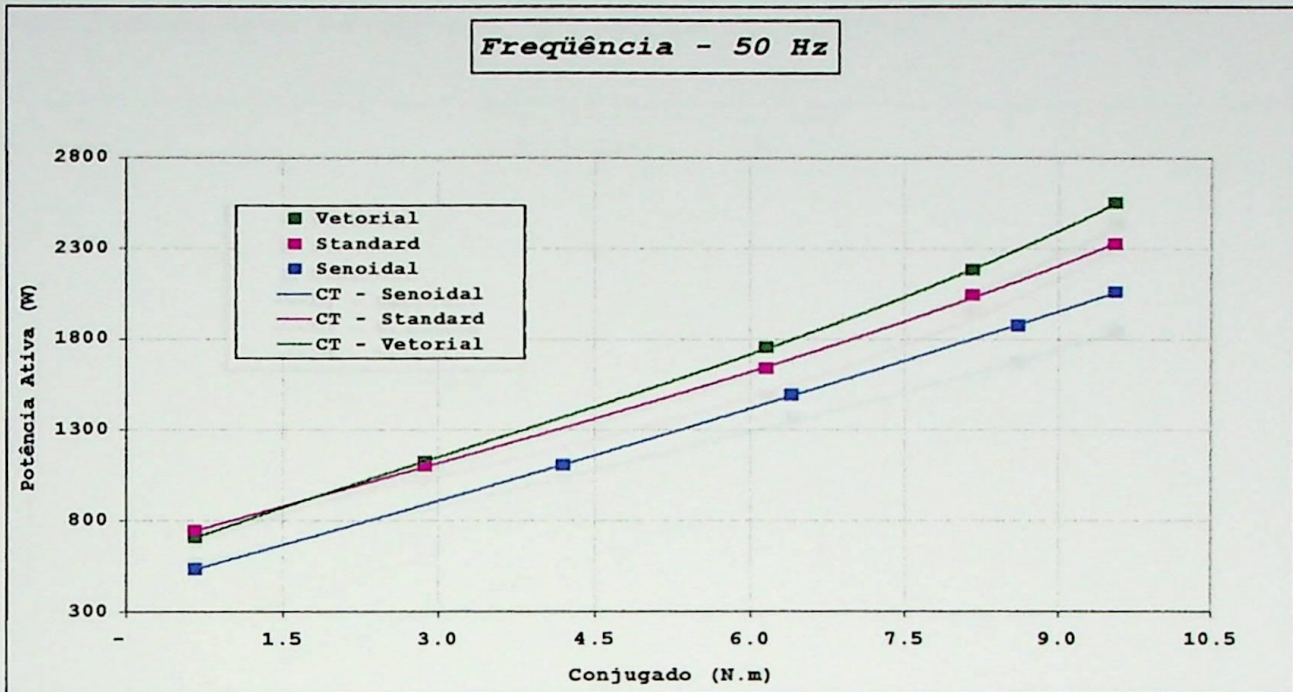


Figura 4.4.1 - 2: Curvas de Tendência da Potência Ativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 50 Hz.

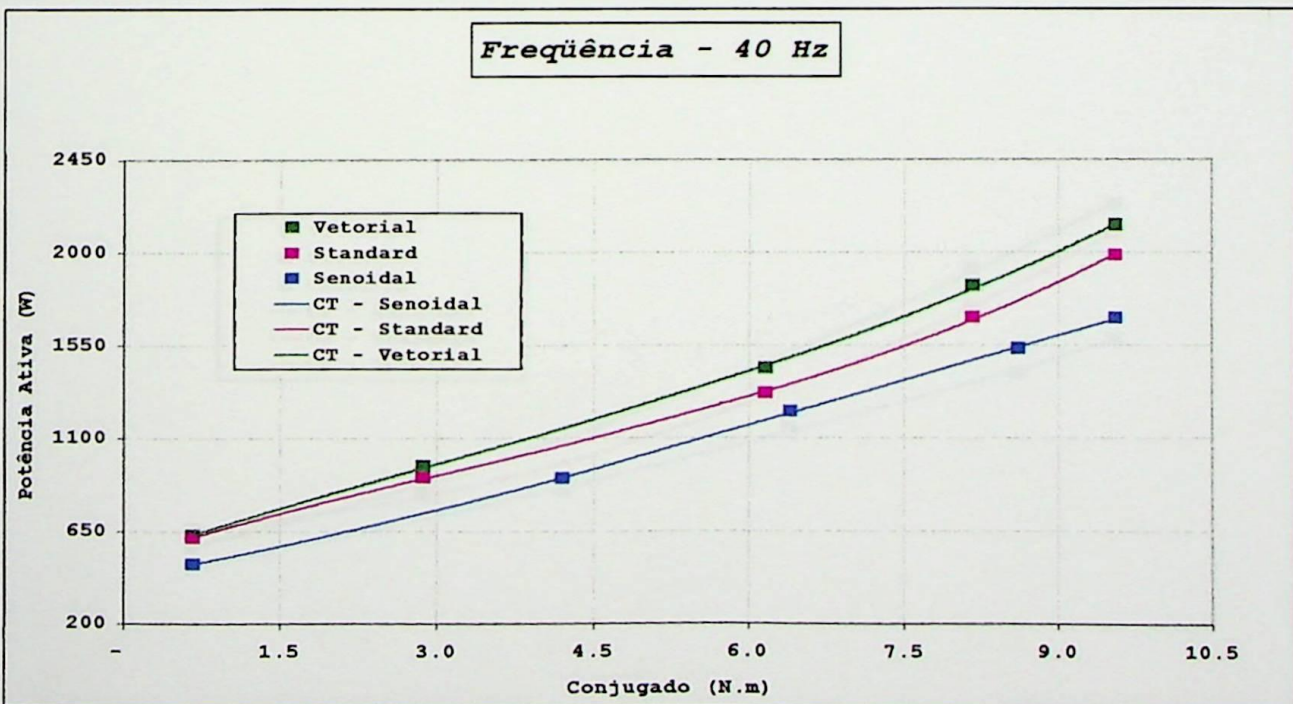


Figura 4.4.1 - 3: Curvas de Tendência da Potência Ativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 40 Hz.

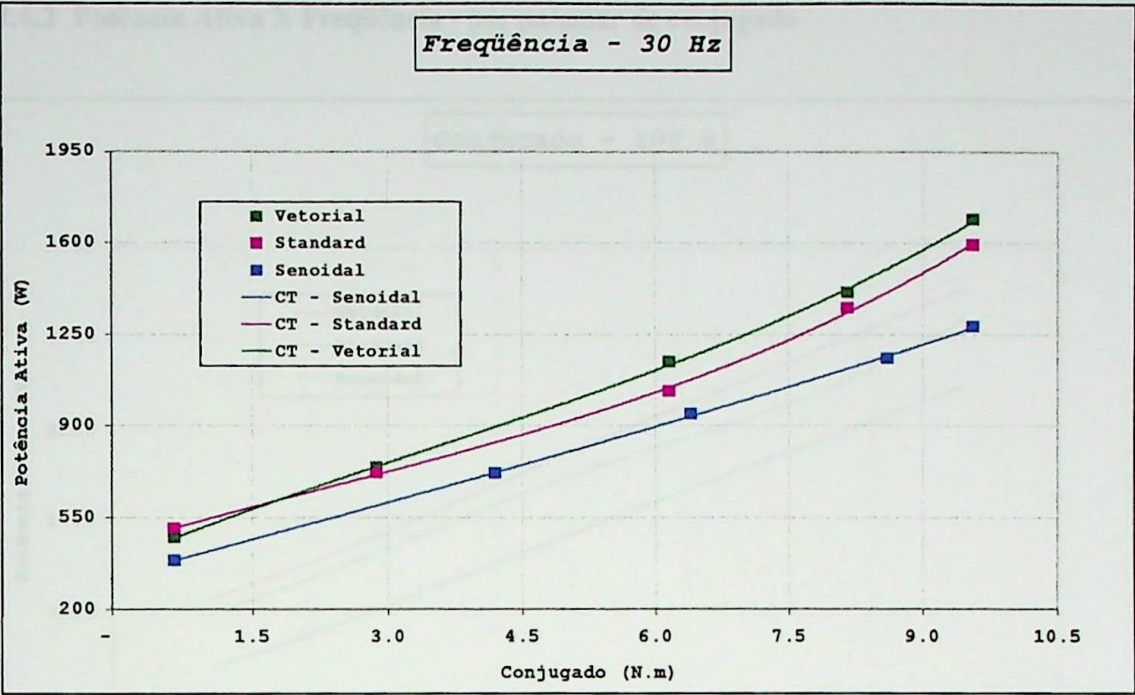


Figura 4.4.1 - 4: Curvas de Tendência da Potência Ativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vectorial), para operação em 30 Hz.

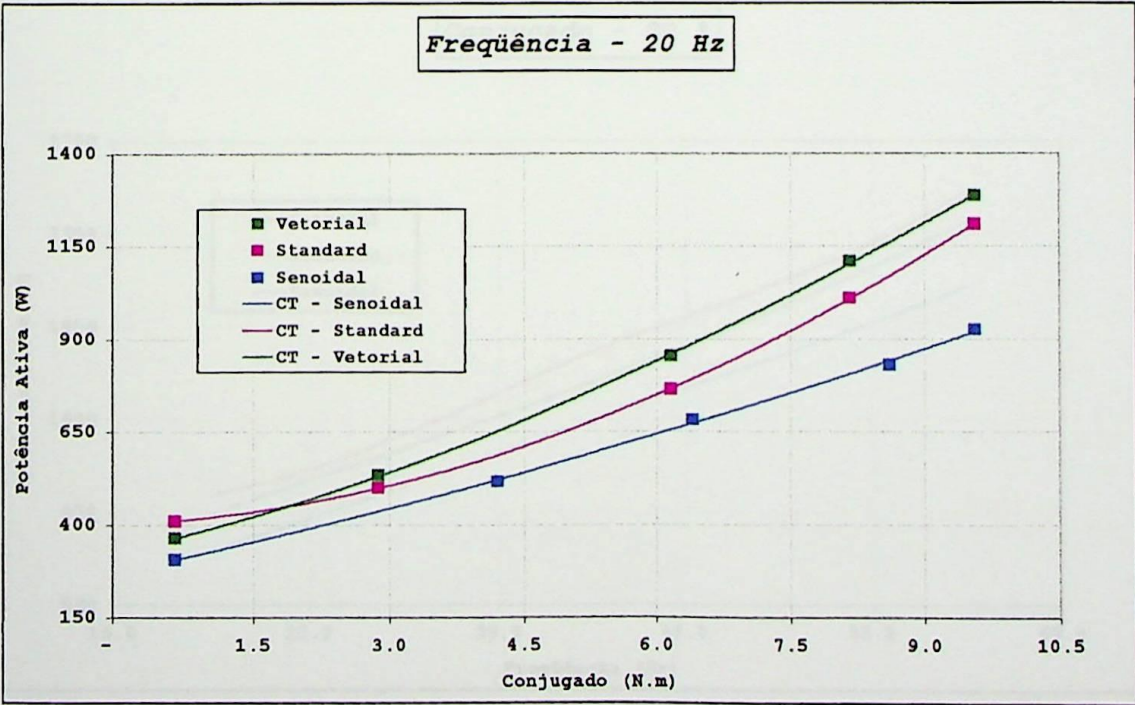


Figura 4.4.1 - 5: Curvas de Tendência da Potência Ativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vectorial), para operação em 20 Hz.

4.4.2 Potência Ativa X Frequência - por patamar de conjugado

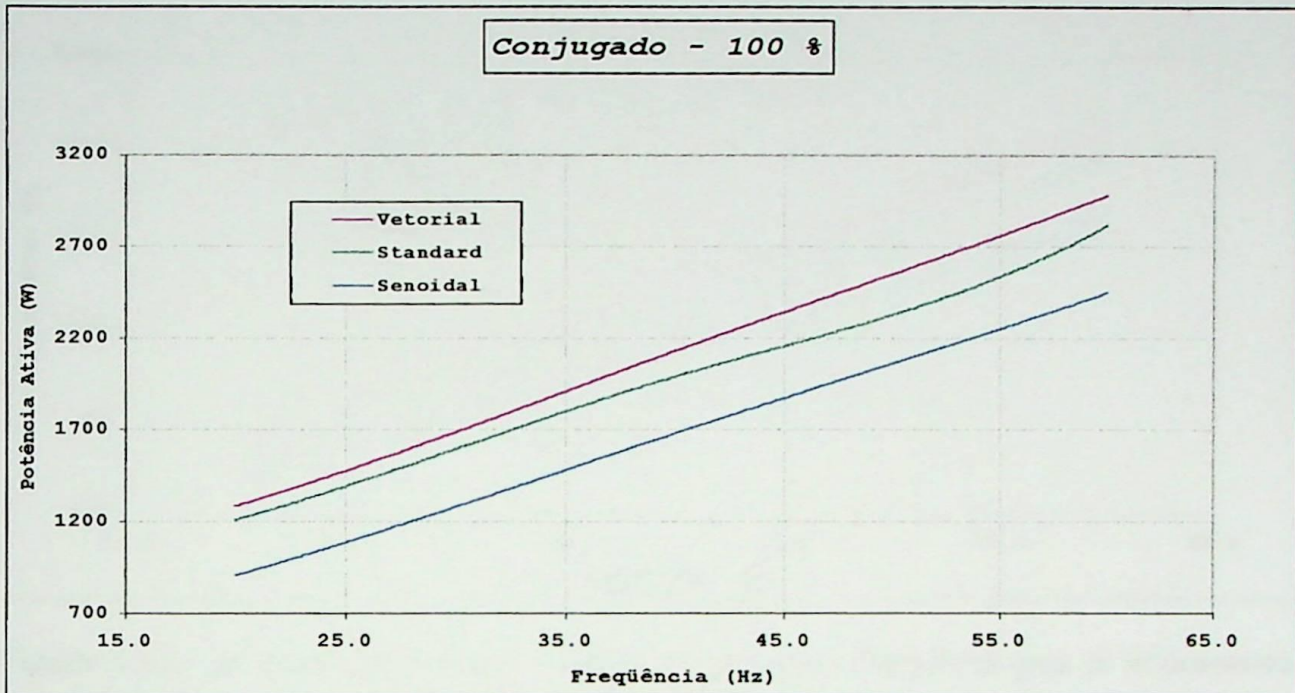


Figura 4.4.2 - 1: Comportamento da Potência Ativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado nominal.

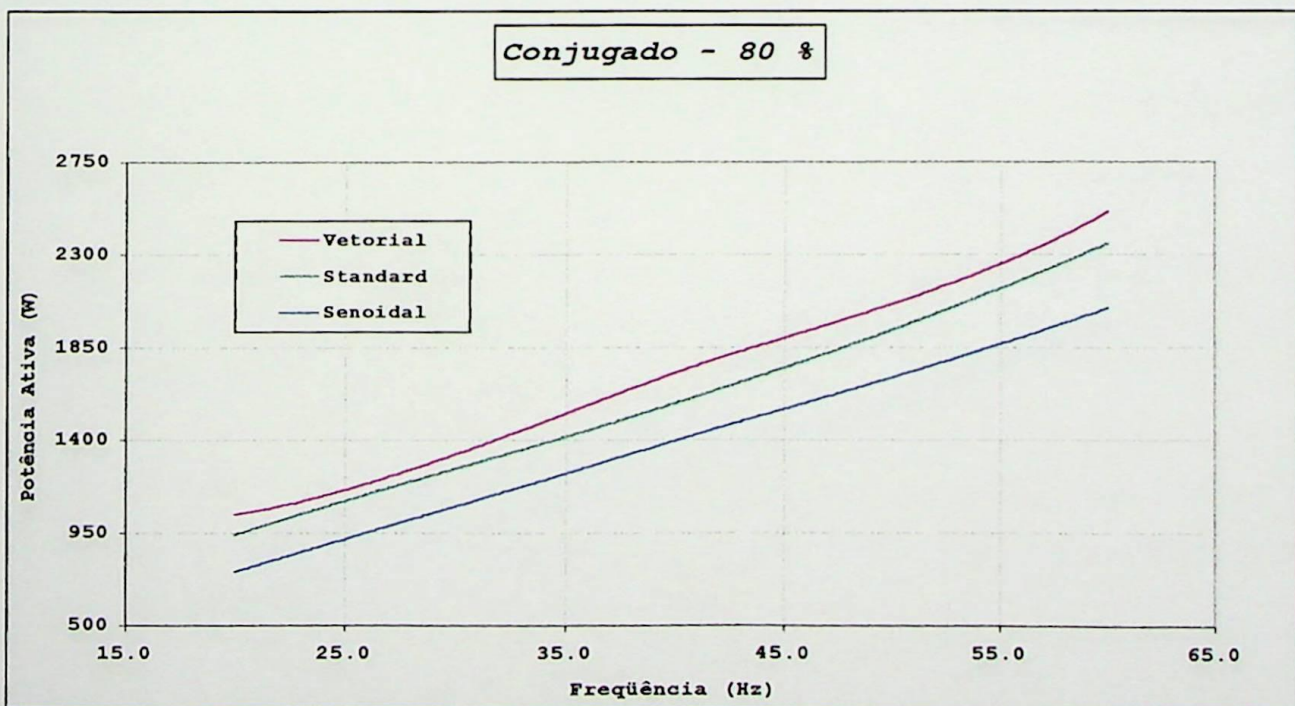


Figura 4.4.2 - 2: Comportamento da Potência Ativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 80 % do nominal.

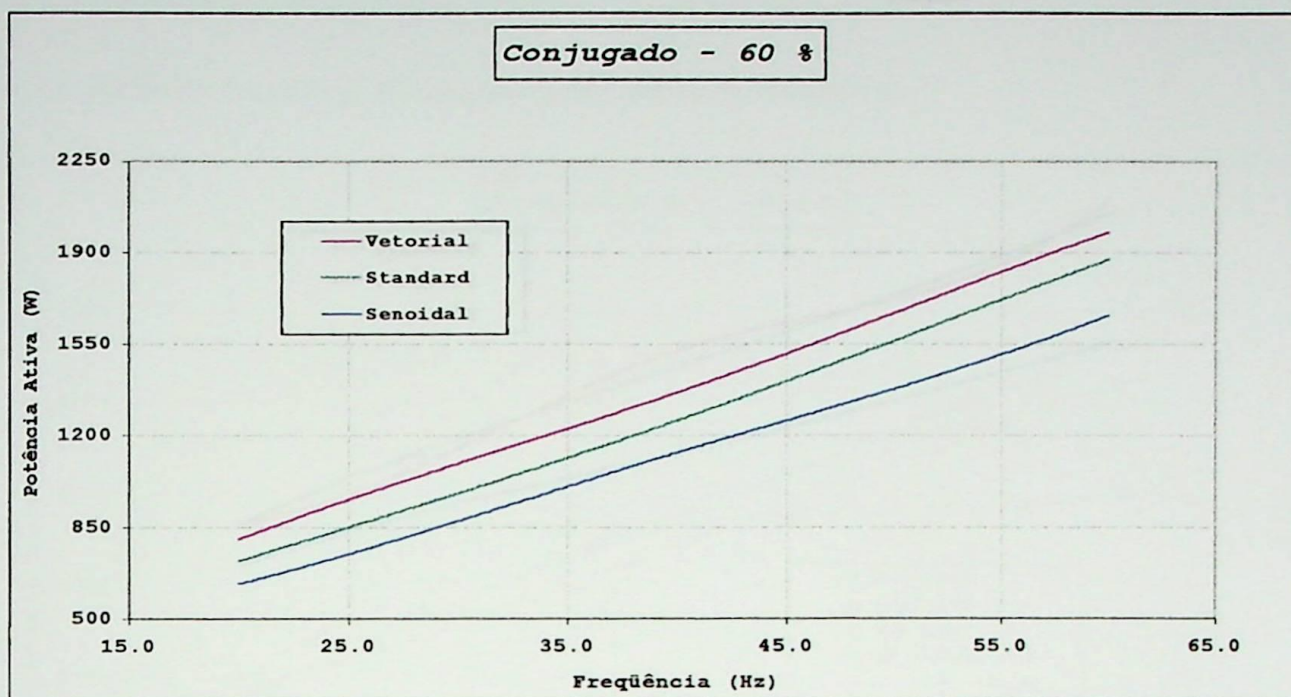


Figura 4.4.2 - 3: Comportamento da Potência Ativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 60 % do nominal.

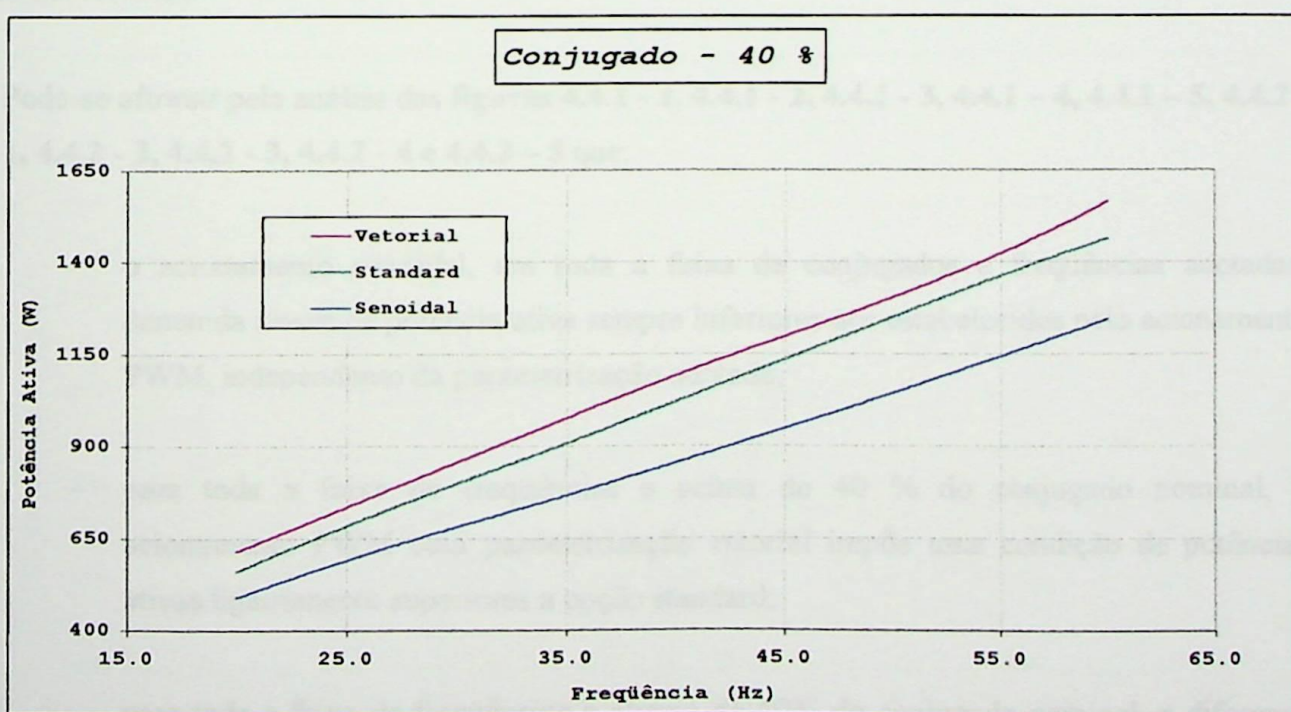


Figura 4.4.2 - 4: Comportamento da Potência Ativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 40 % do nominal.

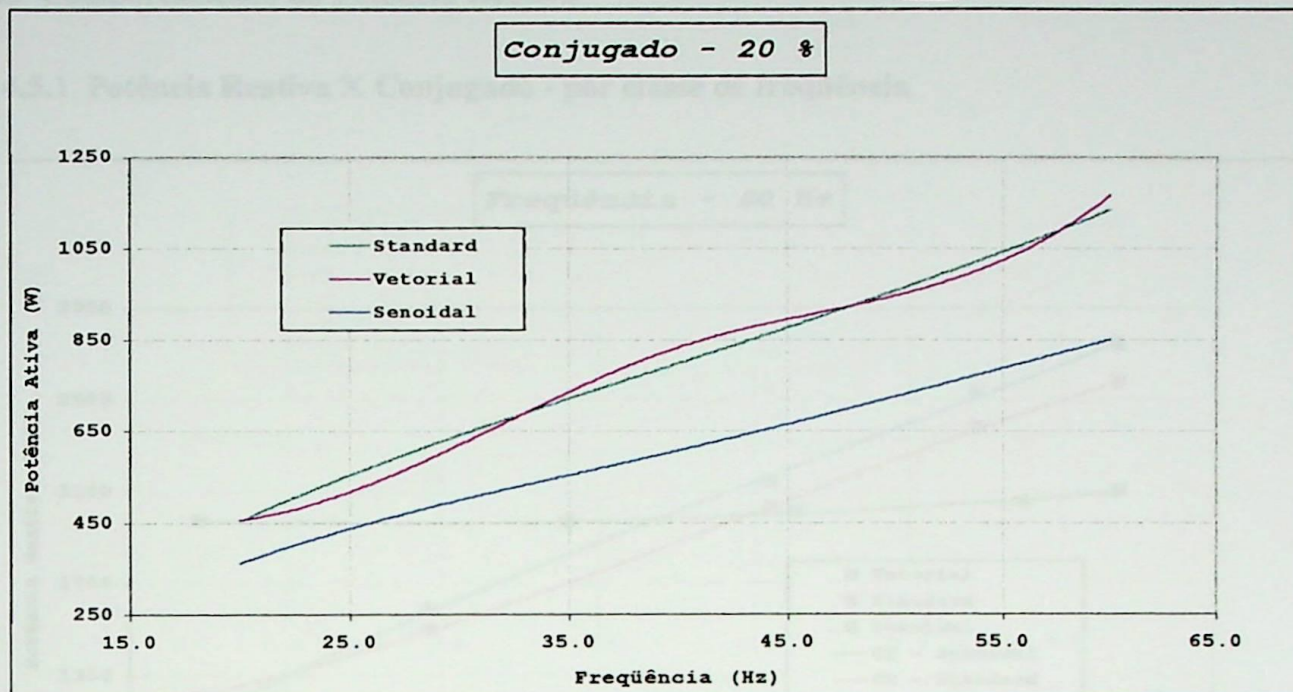


Figura 4.4.2 - 5: Comportamento da Potência Ativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 20 % do nominal.

COMENTÁRIO

Pode-se afirmar pela análise das figuras 4.4.1 - 1, 4.4.1 - 2, 4.4.1 - 3, 4.4.1 - 4, 4.4.1 - 5, 4.4.2 - 1, 4.4.2 - 2, 4.4.2 - 3, 4.4.2 - 4 e 4.4.2 - 5 que:

- o acionamento senoidal, em toda a faixa de conjugados e frequências adotadas, demanda níveis de potência ativa sempre inferiores aos estabelecidos pelo acionamento PWM, independente da parametrização adotada;
- para toda a faixa de frequências e acima de 40 % do conjugado nominal, o acionamento PWM com parametrização vetorial impõe uma condição de potências ativas ligeiramente superiores a opção standard;
- para toda a faixa de frequências e abaixo de 40% do conjugado nominal, a diferença entre as demandas de potência ativa das opções de parametrização do acionamento PWM são desprezíveis.

4.5 Comportamento da Potência Reativa

4.5.1 Potência Reativa X Conjugado - por classe de frequência

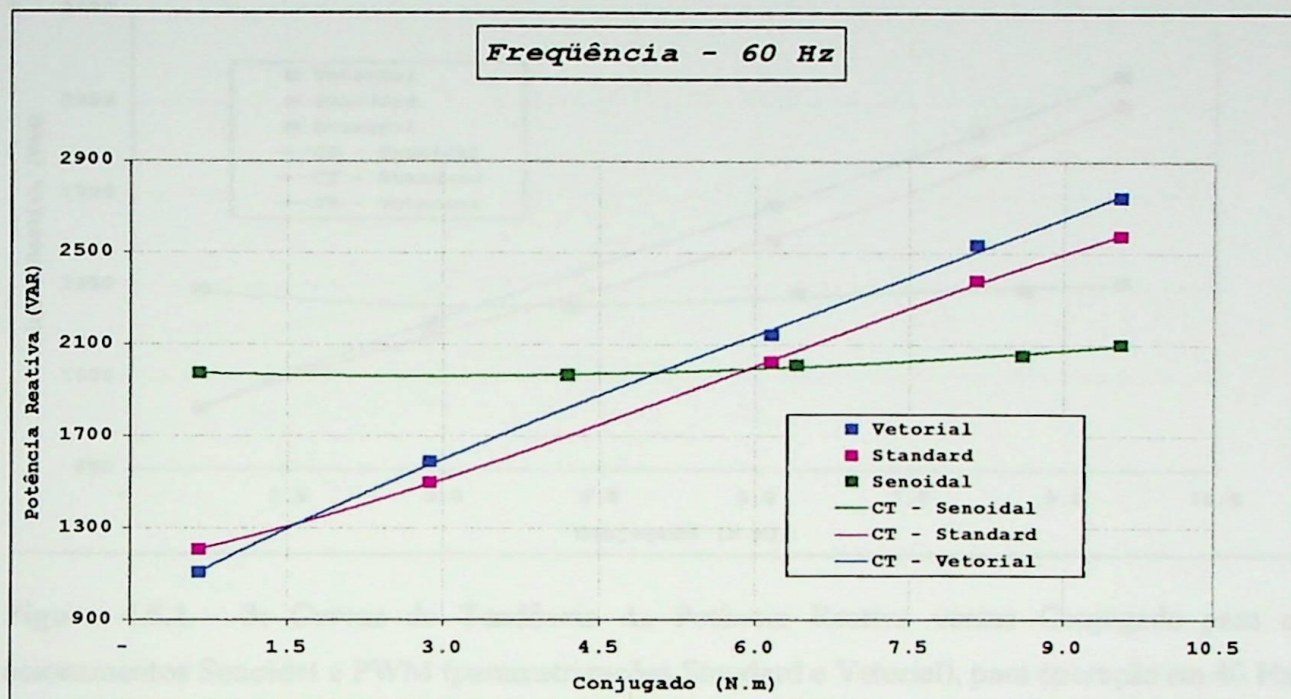


Figura 4.5.1 - 1: Curvas de Tendência da Potência Reativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 60 Hz.

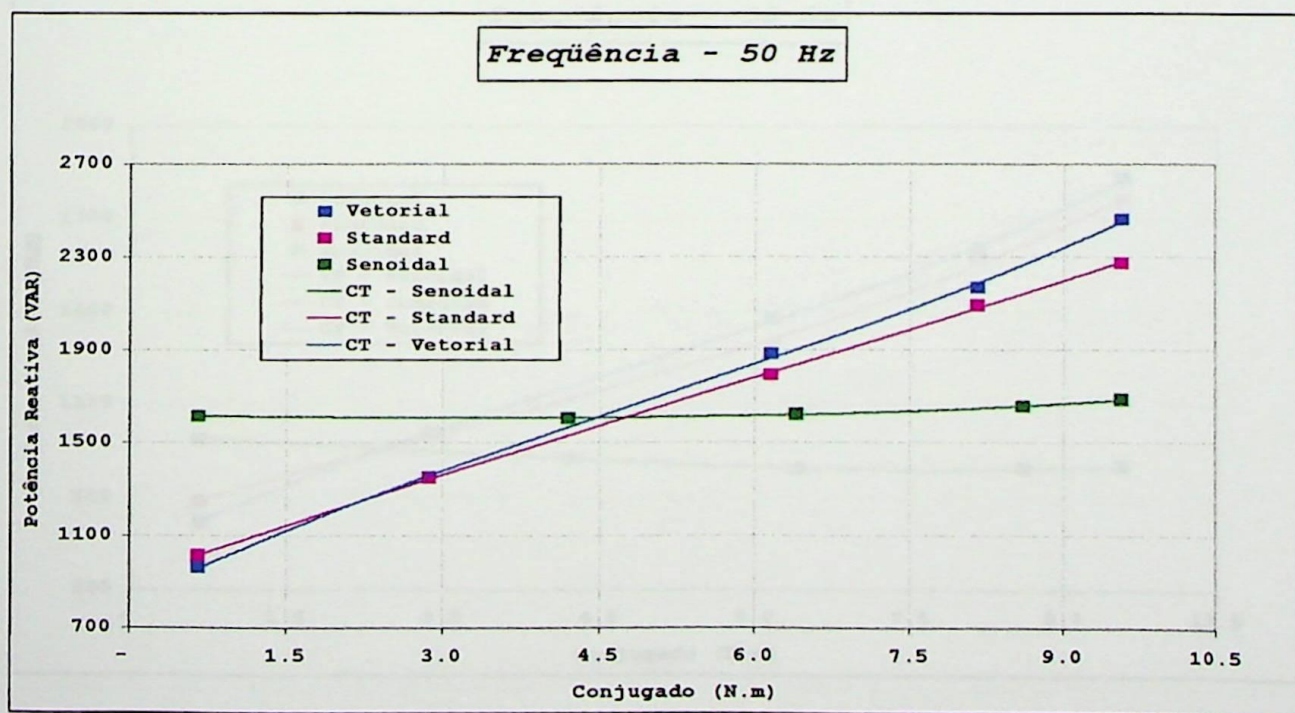


Figura 4.5.1 - 2: Curvas de Tendência da Potência Reativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 50 Hz.

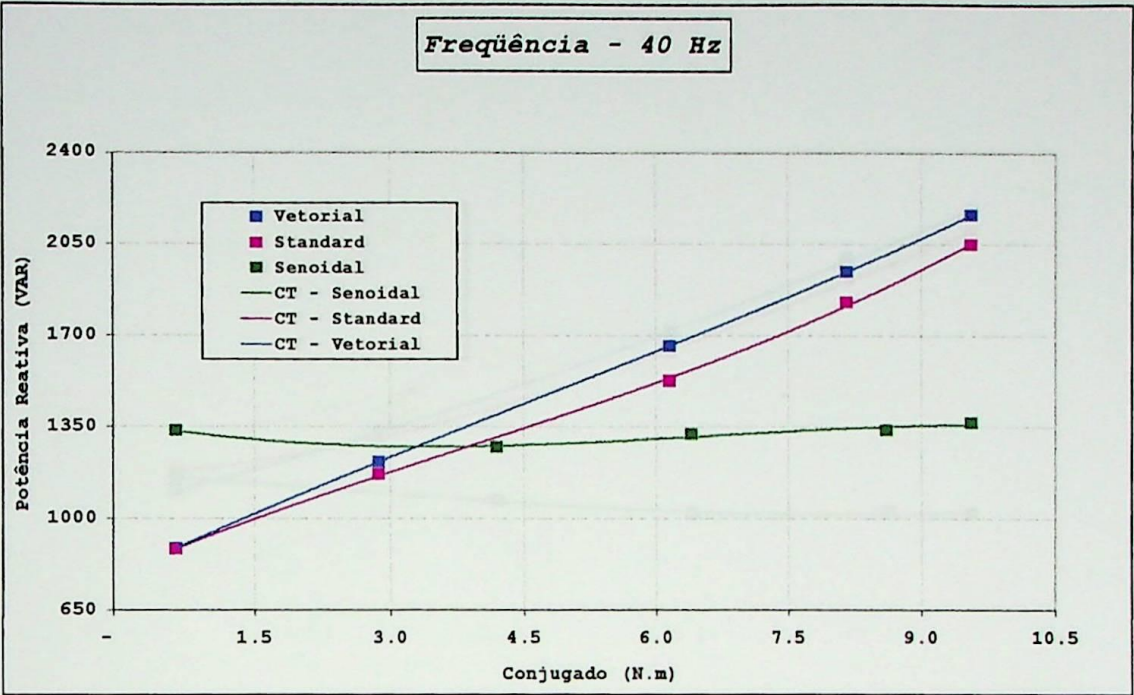


Figura 4.5.1 - 3: Curvas de Tendência da Potência Reativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 40 Hz.

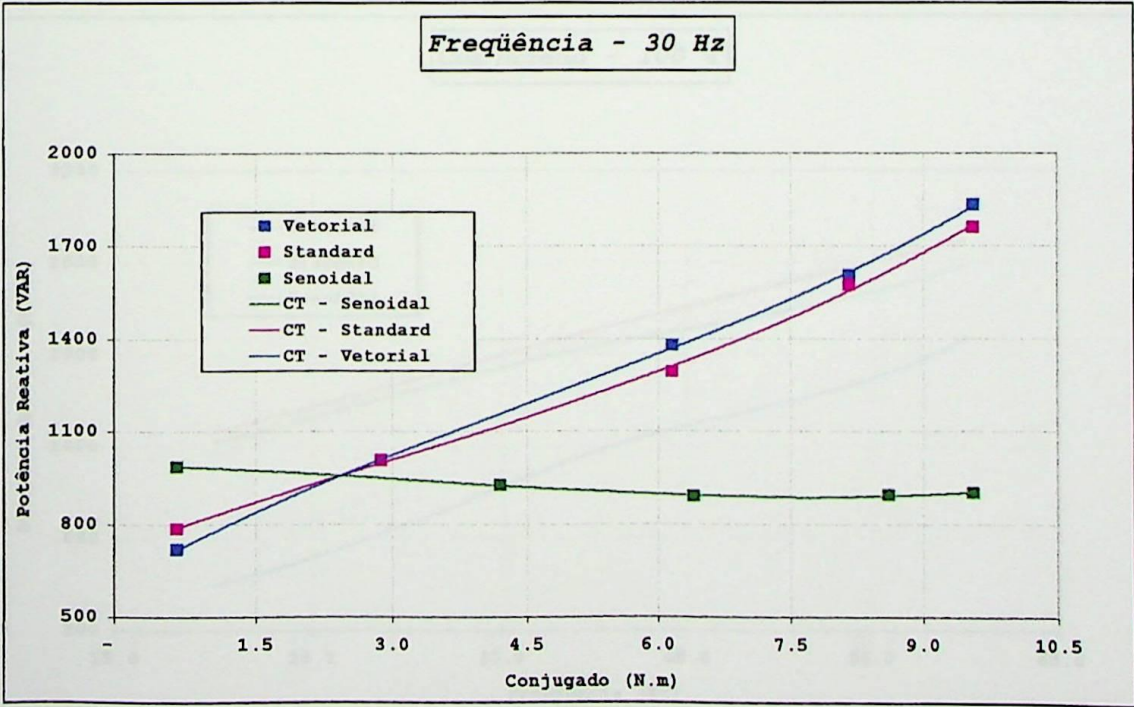


Figura 4.5.1 - 4: Curvas de Tendência da Potência Reativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 30 Hz.

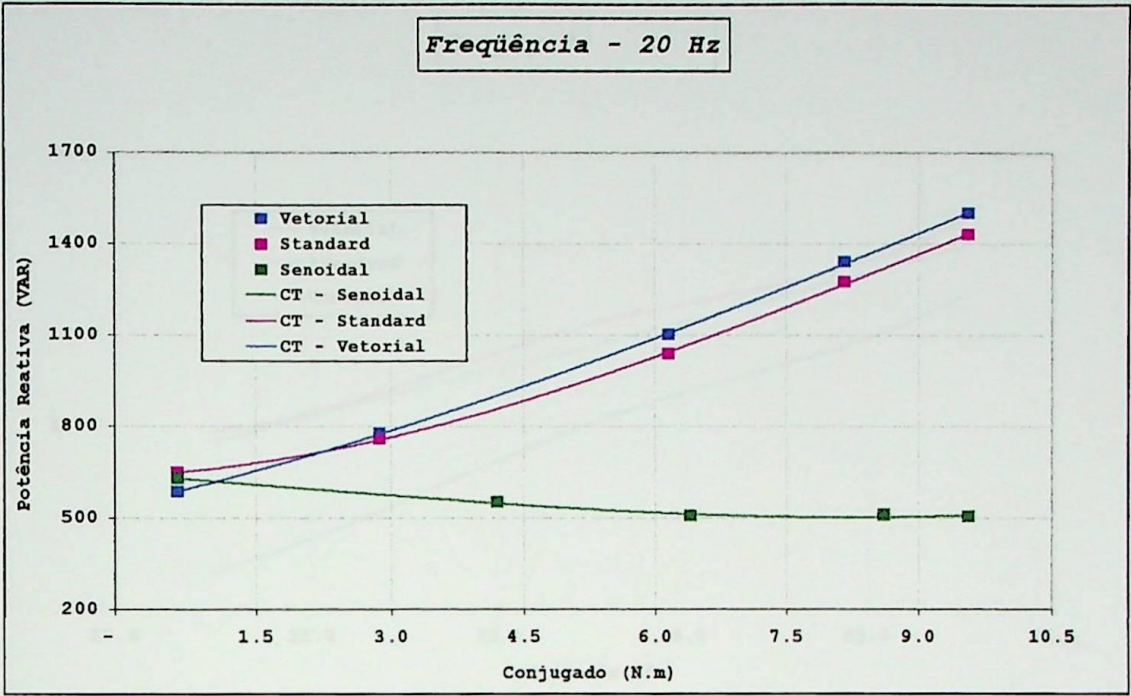


Figura 4.5.1 - 5: Curvas de Tendência da Potência Reativa versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 20 Hz.

4.5.2 Potência Reativa X Frequência - por patamar de conjugado

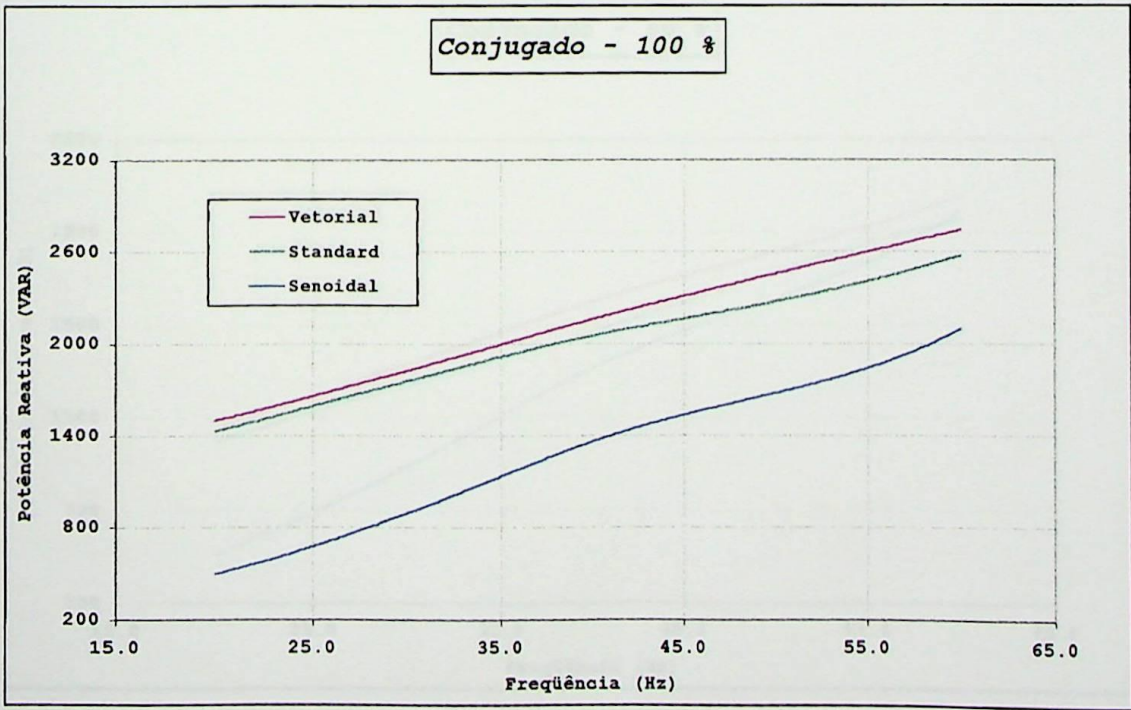


Figura 4.5.2 - 1: Comportamento da Potência Reativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado nominal.

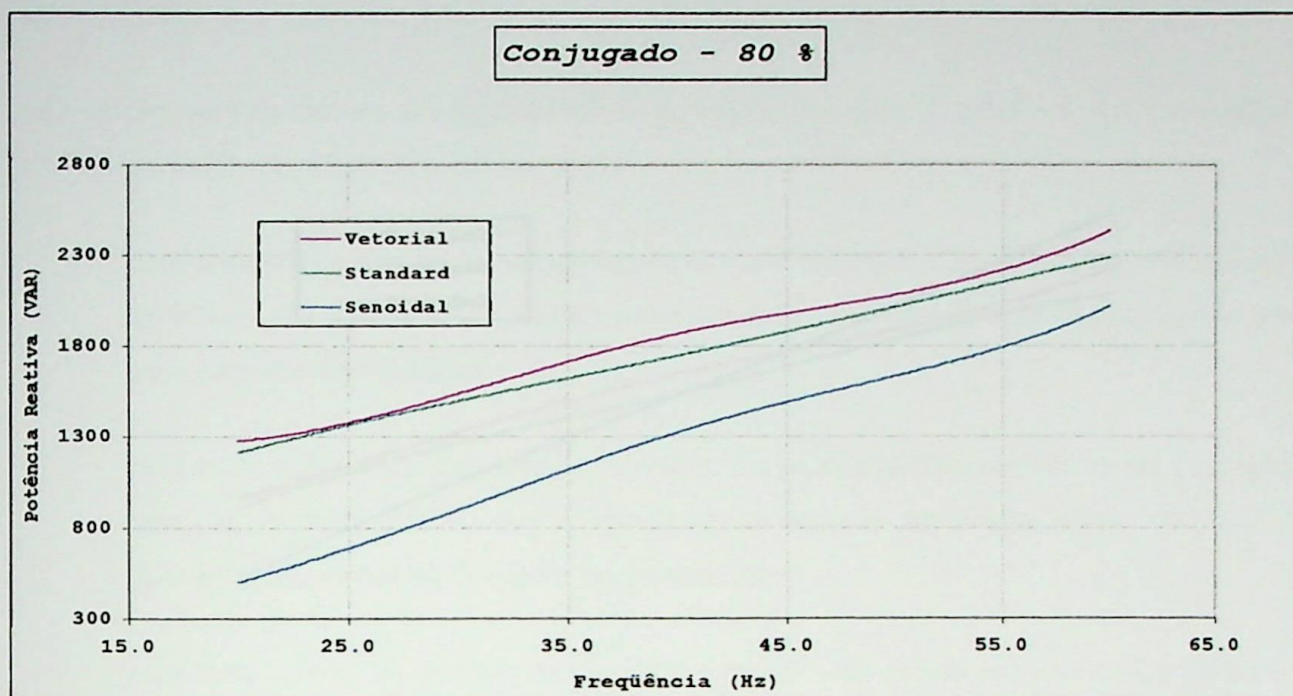


Figura 4.5.2 - 2: Comportamento da Potência Reativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 80 % do nominal.

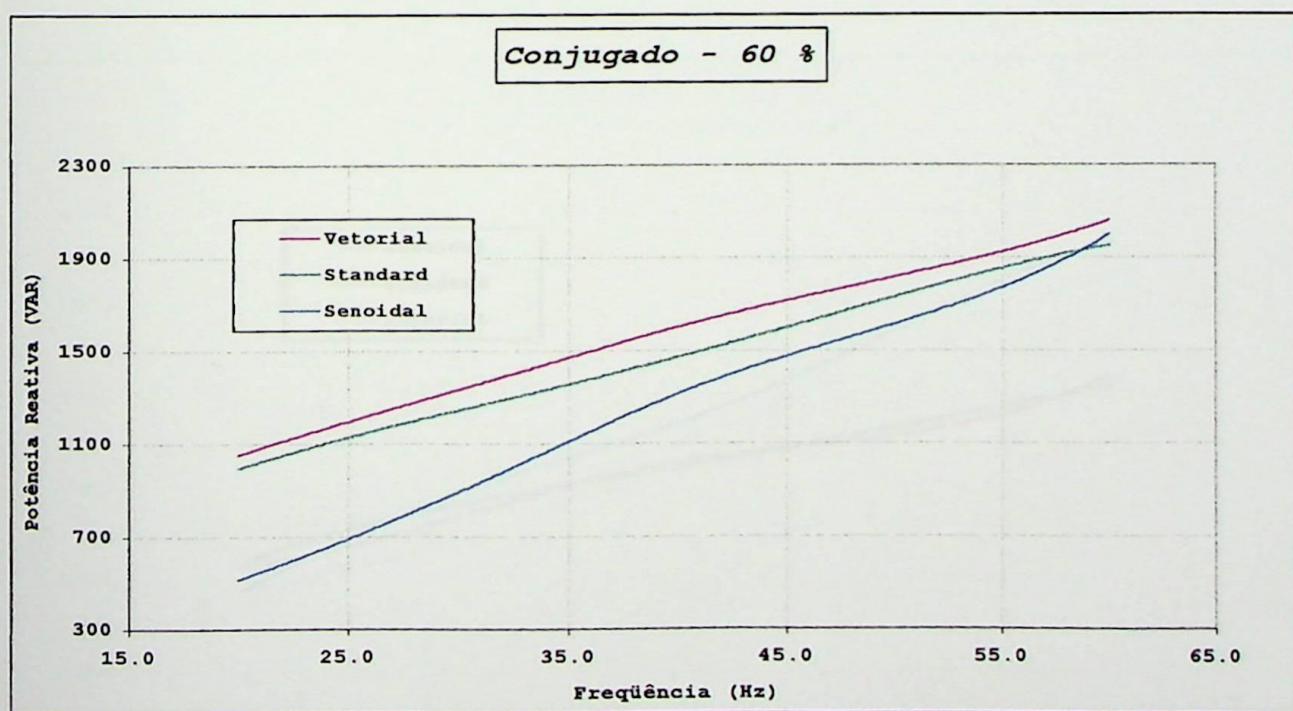


Figura 4.5.2 - 3: Comportamento da Potência Reativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 60 % do nominal.

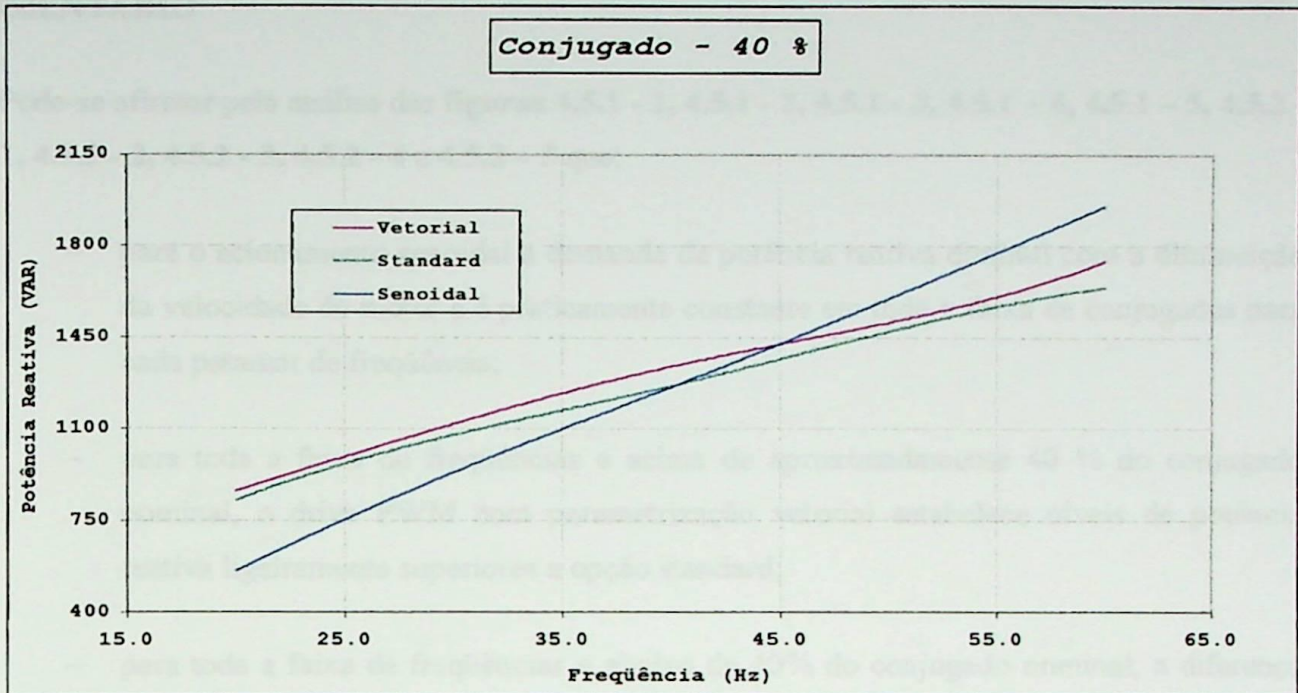


Figura 4.5.2 - 4: Comportamento da Potência Reativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 40 % do nominal.

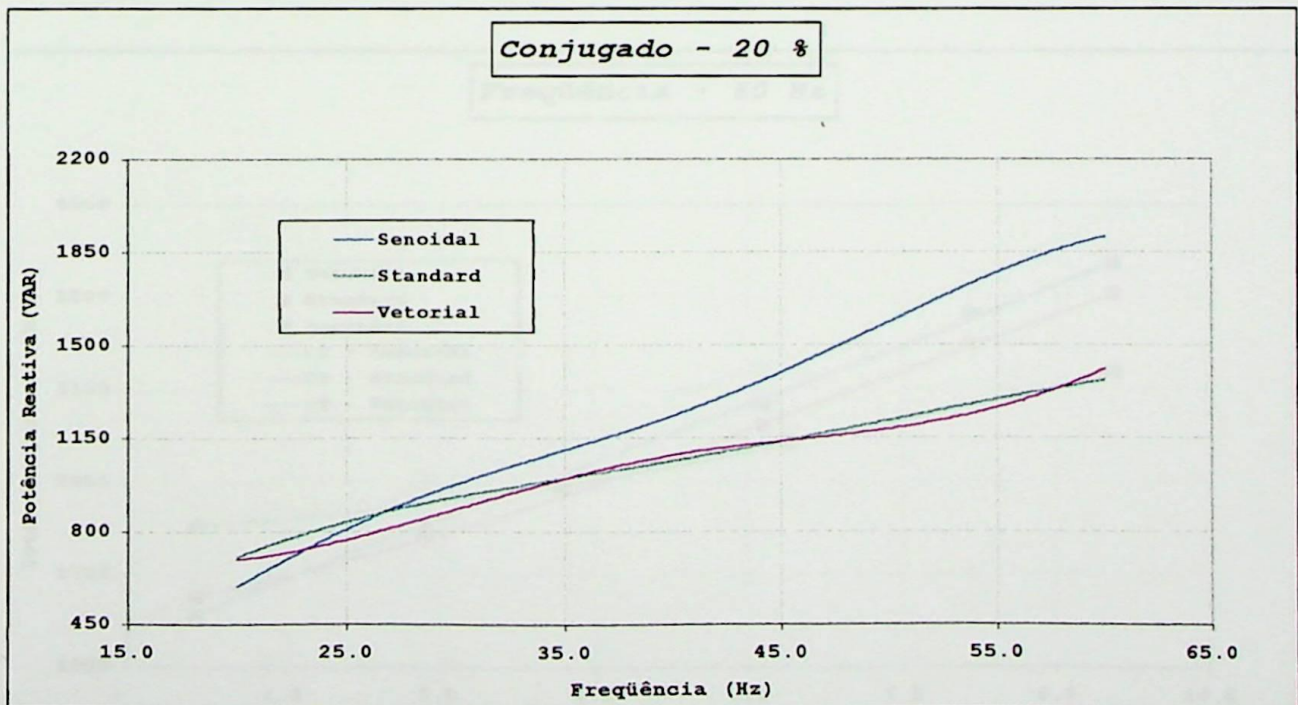


Figura 4.5.2 - 5: Comportamento da Potência Reativa versus Frequência para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 20 % do nominal.

COMENTÁRIO

Pode-se afirmar pela análise das figuras 4.5.1 - 1, 4.5.1 - 2, 4.5.1 - 3, 4.5.1 - 4, 4.5.1 - 5, 4.5.2 - 1, 4.5.2 - 2, 4.5.2 - 3, 4.5.2 - 4 e 4.5.2 - 5 que:

- para o acionamento senoidal a demanda de potência reativa diminui com a diminuição da velocidade do motor e é praticamente constante em toda a faixa de conjugados para cada patamar de frequência;
- para toda a faixa de frequências e acima de aproximadamente 40 % do conjugado nominal, o drive PWM com parametrização vetorial estabelece níveis de potência reativa ligeiramente superiores a opção standard;
- para toda a faixa de frequências e abaixo de 40% do conjugado nominal, a diferença entre as demandas de potência reativa das opções de parametrização do acionamento PWM são desprezíveis.

4.6 Comportamento da Potência Aparente

4.6.1 Potência Aparente X Conjugado - por classe de frequência

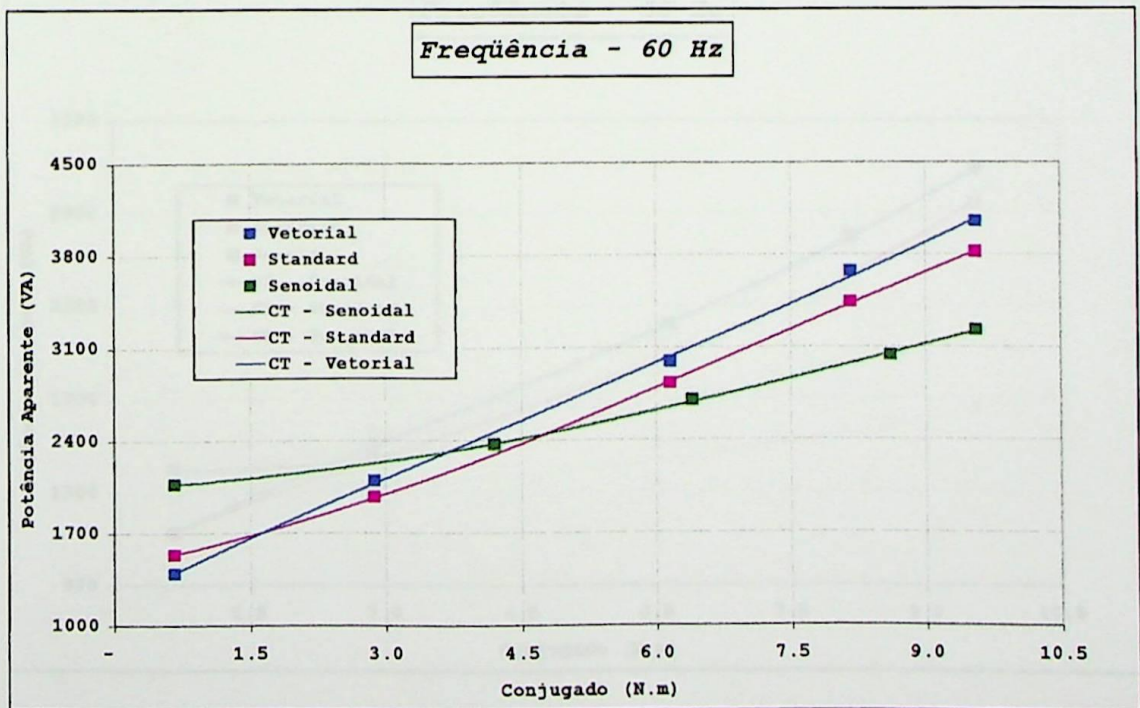


Figura 4.6.1 - 1: Curvas de Tendência da Potência Aparente versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 60 Hz.

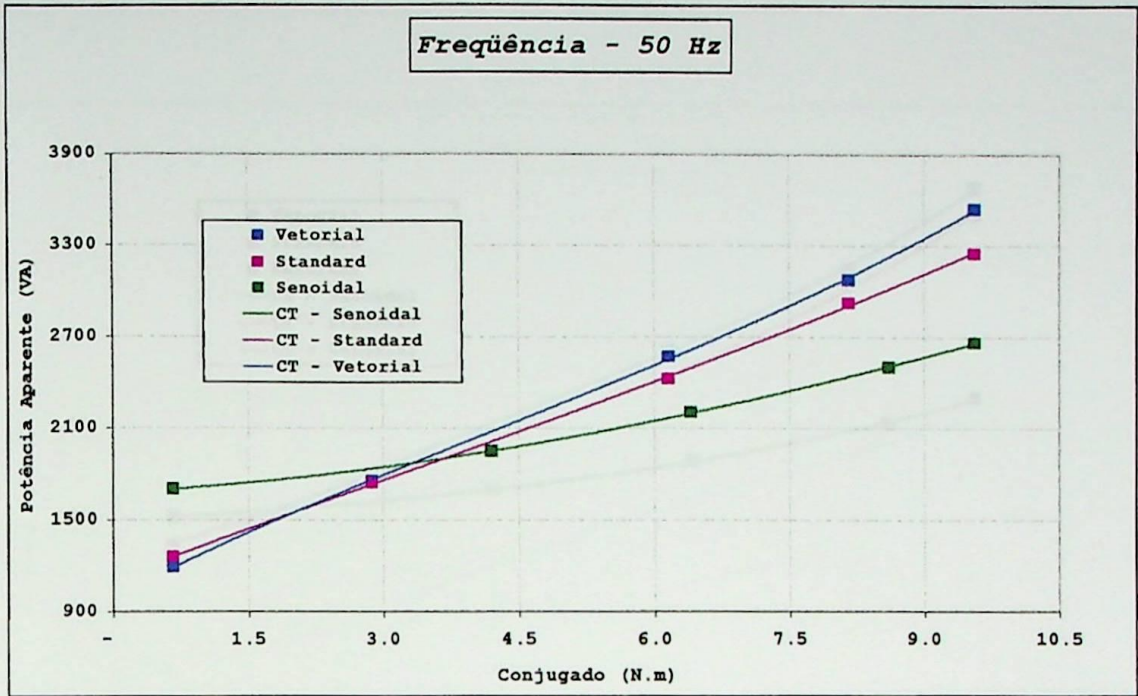


Figura 4.6.1 - 2: Curvas de Tendência da Potência Aparente versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 50 Hz.

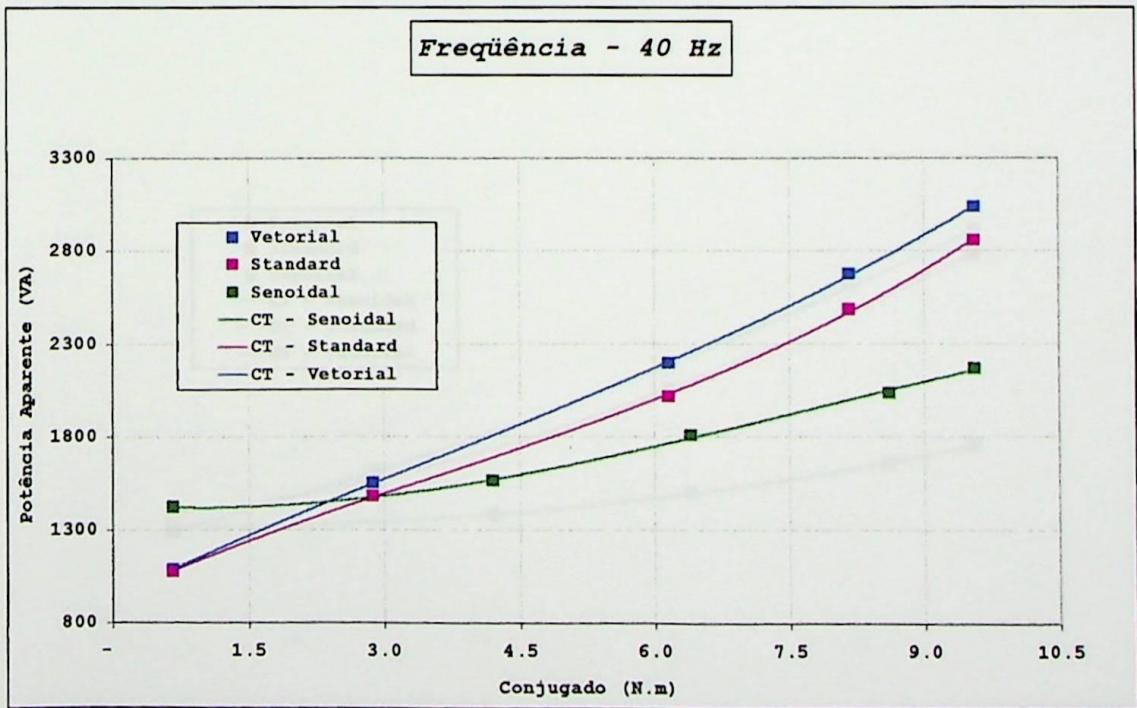


Figura 4.6.1 - 3: Curvas de Tendência da Potência Aparente versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 40 Hz.

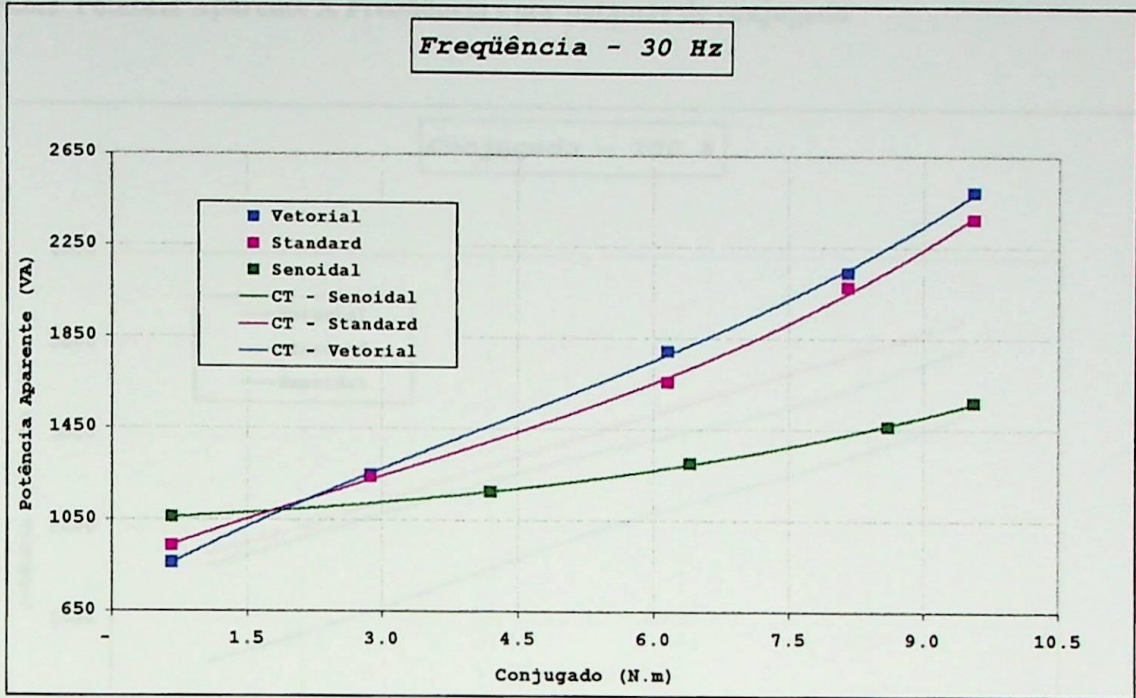


Figura 4.6.1 - 4: Curvas de Tendência da Potência Aparente versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 30 Hz.

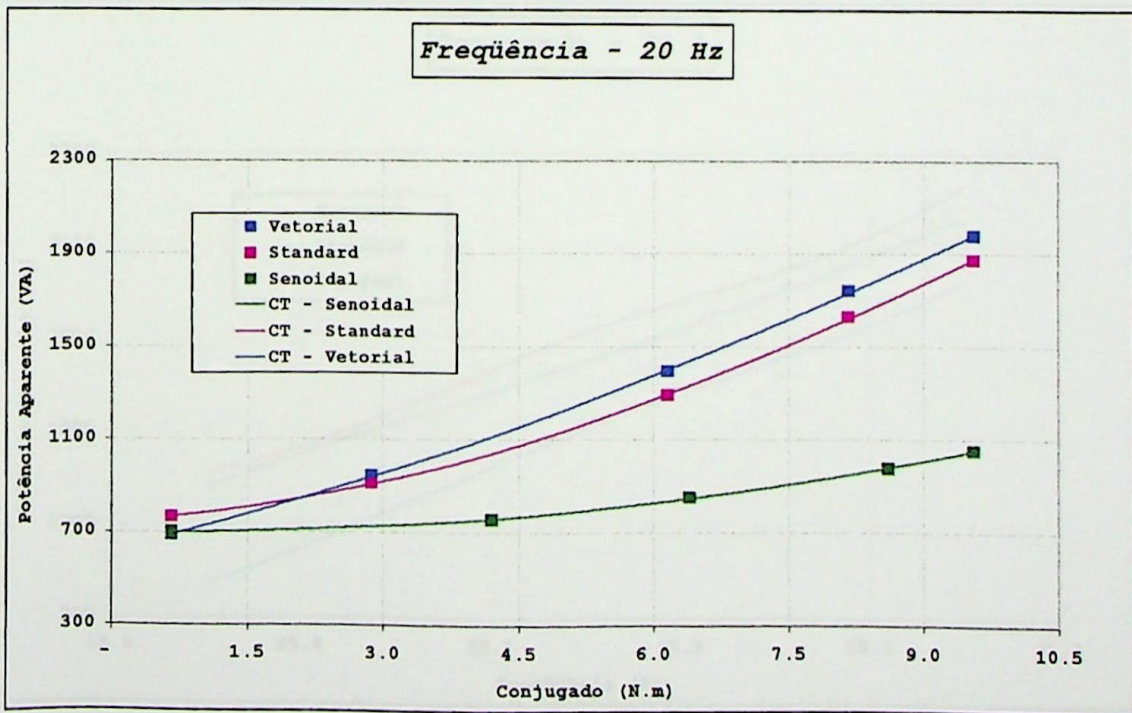


Figura 4.6.1 - 5: Curvas de Tendência da Potência Aparente versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para operação em 20 Hz.

4.6.2 Potência Aparente X Frequência - por patamar de conjugado

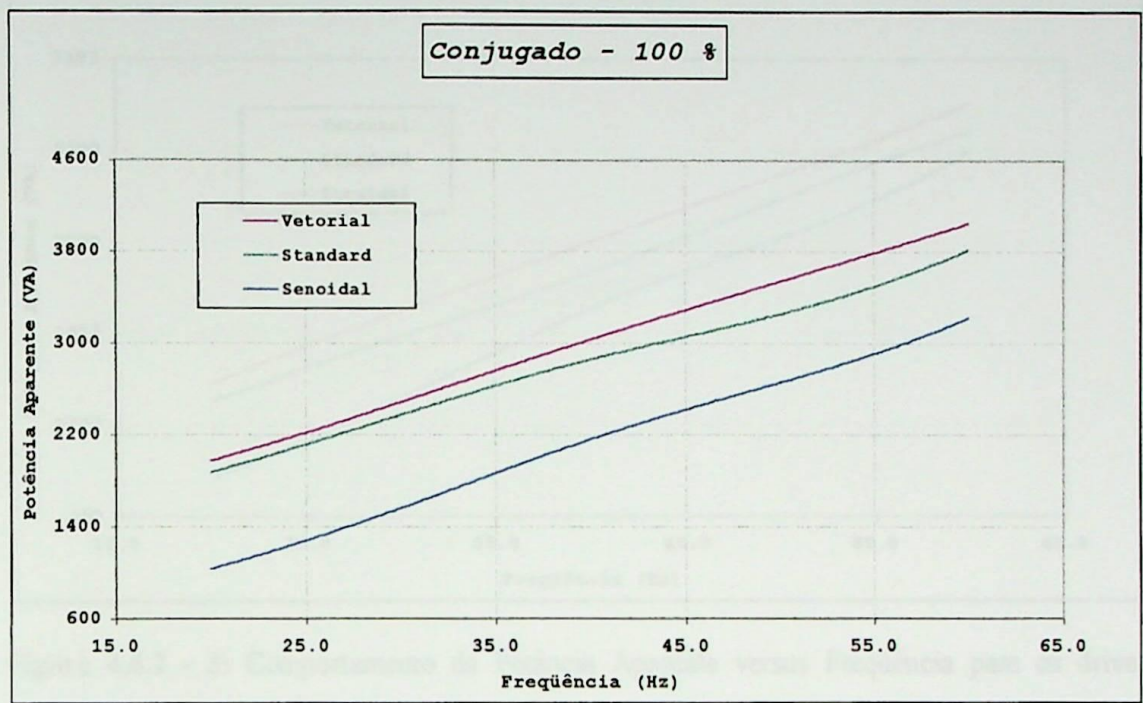


Figura 4.6.2 - 1: Comportamento da Potência Aparente versus Frequência para os drives Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado nominal.

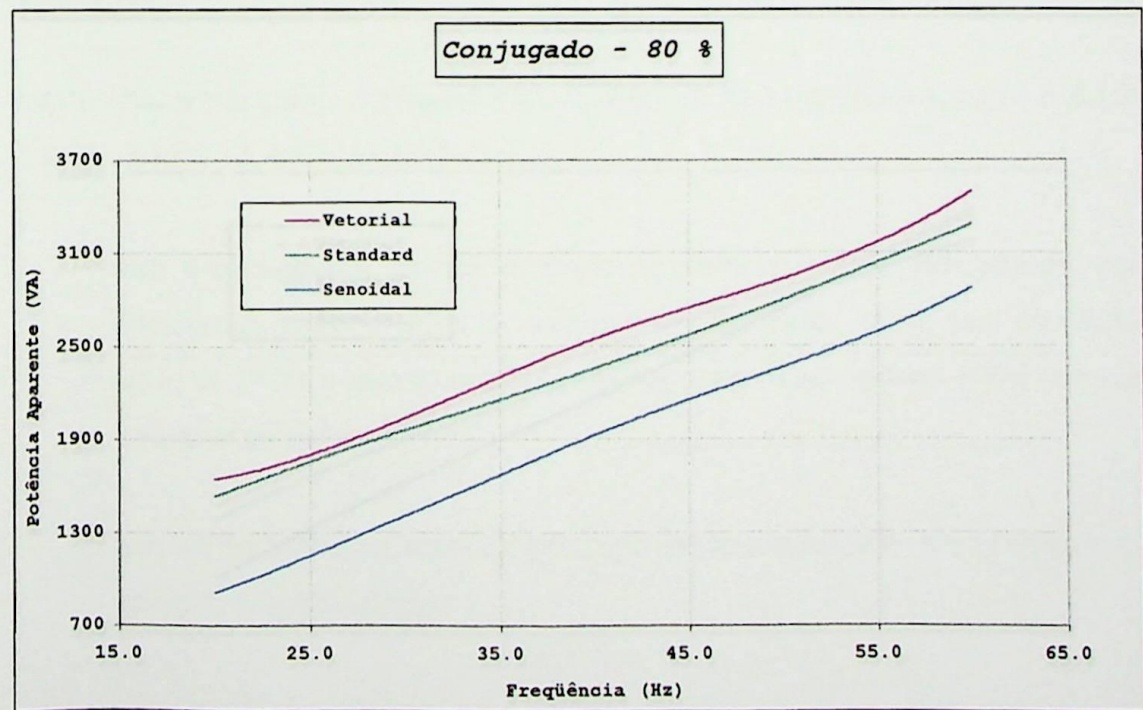


Figura 4.6.2 - 2: Comportamento da Potência Aparente versus Frequência para os drives Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 80 % do nominal.

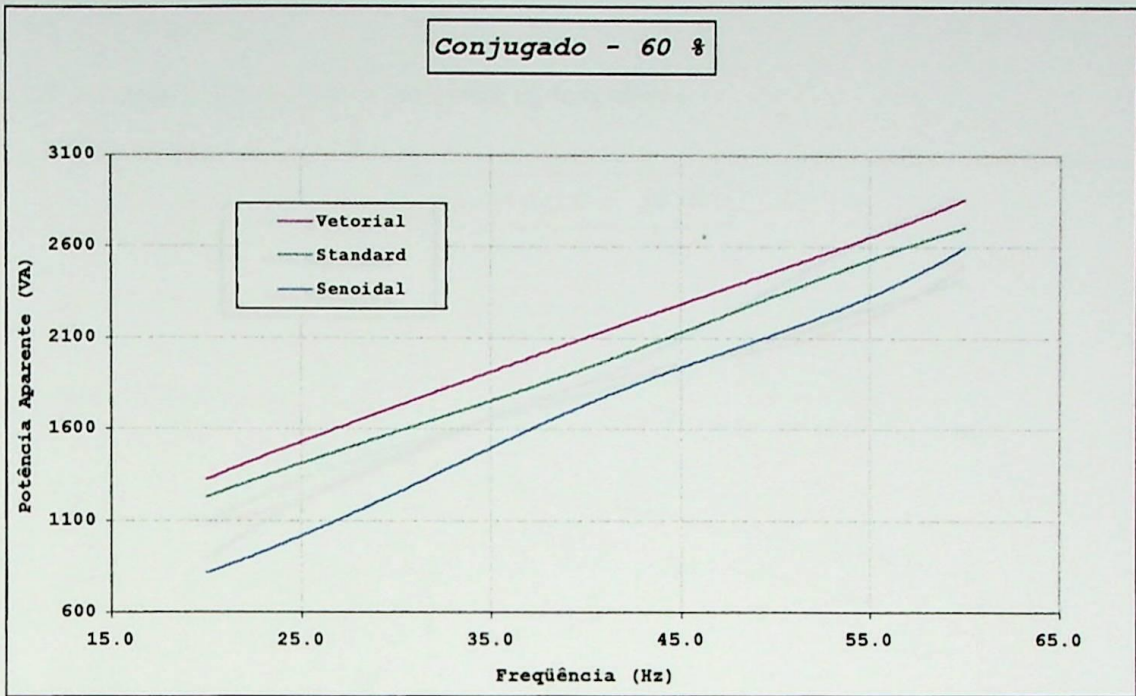


Figura 4.6.2 - 3: Comportamento da Potência Aparente versus Frequência para os drives Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 60 % do nominal.

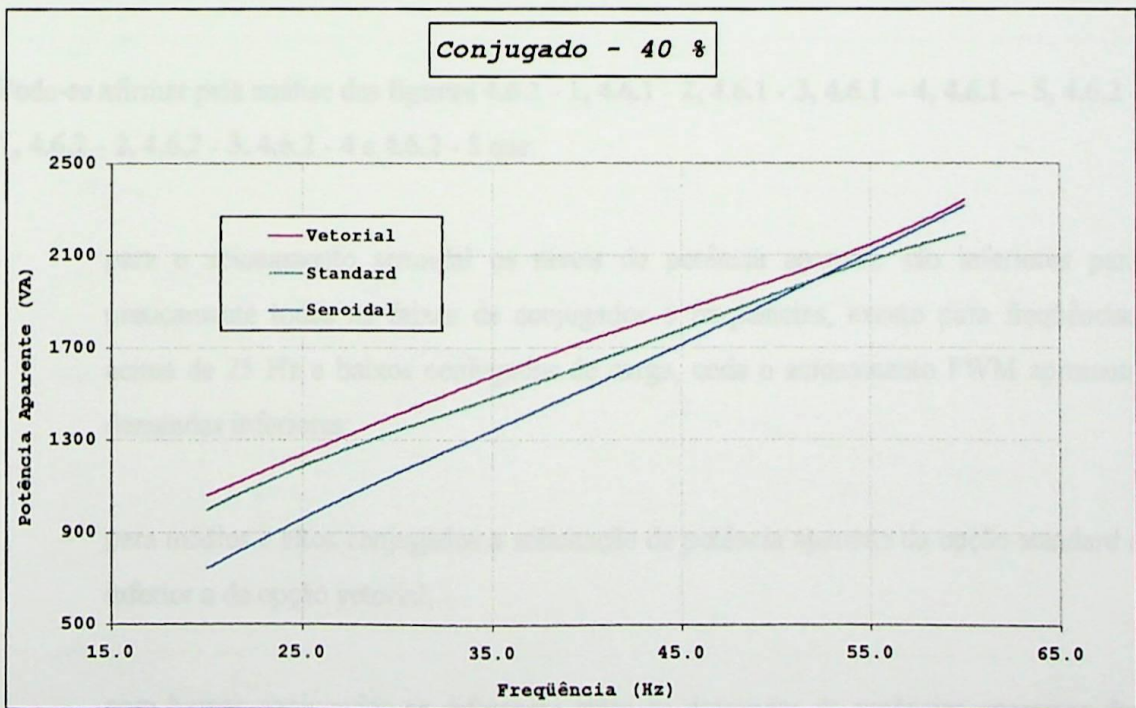


Figura 4.6.2 - 4: Comportamento da Potência Aparente versus Frequência para os drives Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 40 % do nominal.

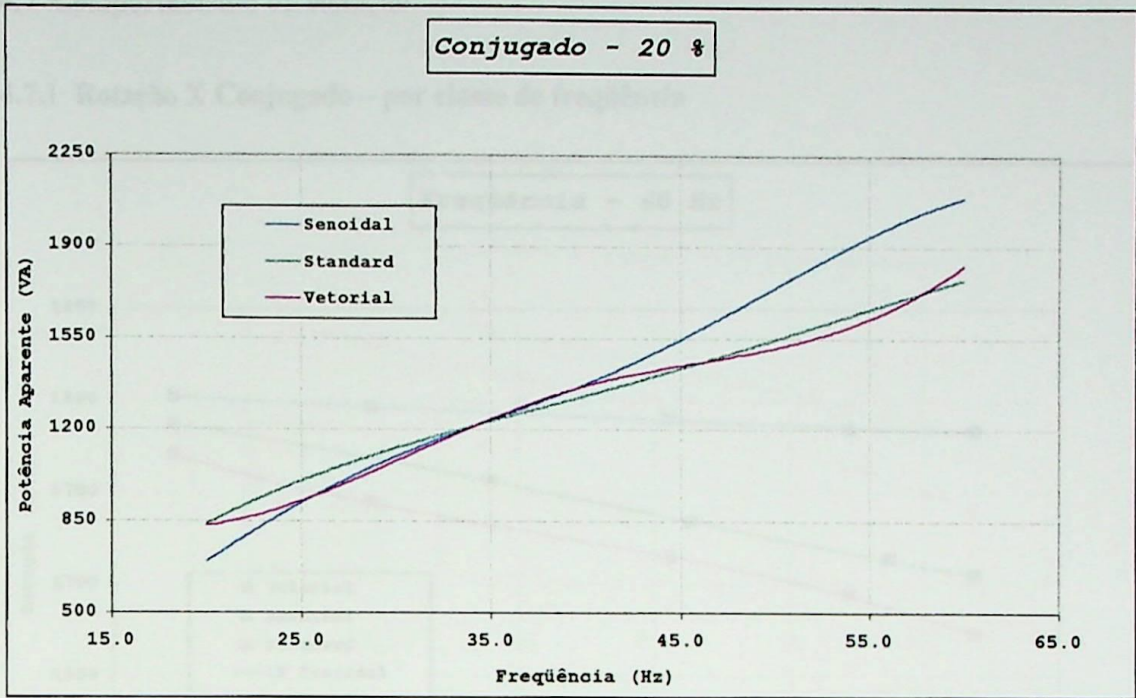


Figura 4.6.2 - 5: Comportamento da Potência Aparente versus Frequência para os drives Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 20 % do nominal.

COMENTÁRIO

Pode-se afirmar pela análise das figuras 4.6.1 - 1, 4.6.1 - 2, 4.6.1 - 3, 4.6.1 - 4, 4.6.1 - 5, 4.6.2 - 1, 4.6.2 - 2, 4.6.2 - 3, 4.6.2 - 4 e 4.6.2 - 5 que:

- para o acionamento senoidal os níveis de potência aparente são inferiores para praticamente todas as faixas de conjugados e frequências, exceto para frequências acima de 25 Hz e baixos conjugados de carga, onde o acionamento PWM apresenta demandas inferiores;
- para médios e altos conjugados a solicitação de potência aparente da opção standard é inferior a da opção vetorial;
- para baixos conjugados as diferenças entre as demandas de potências aparentes das opções de parametrização do acionamento PWM não são consideráveis.

4.7 Comportamento da Rotação

4.7.1 Rotação X Conjugado – por classe de frequência

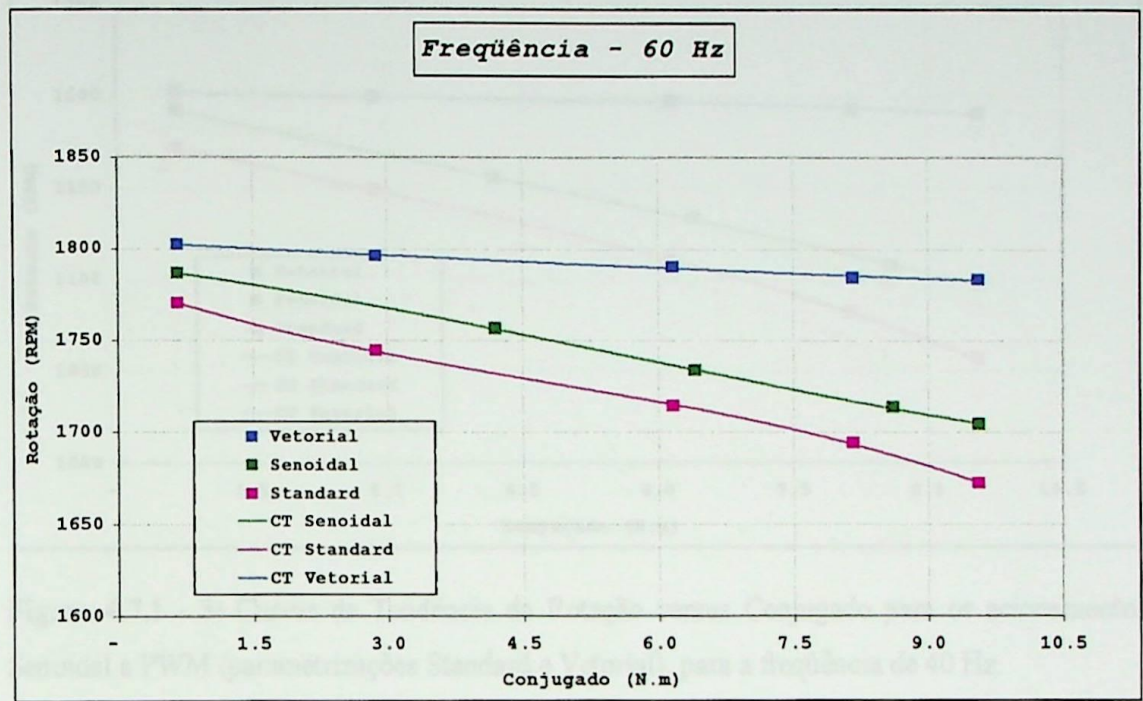


Figura 4.7.1 - 1: Curvas de Tendência da Rotação versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para a frequência de 60 Hz.

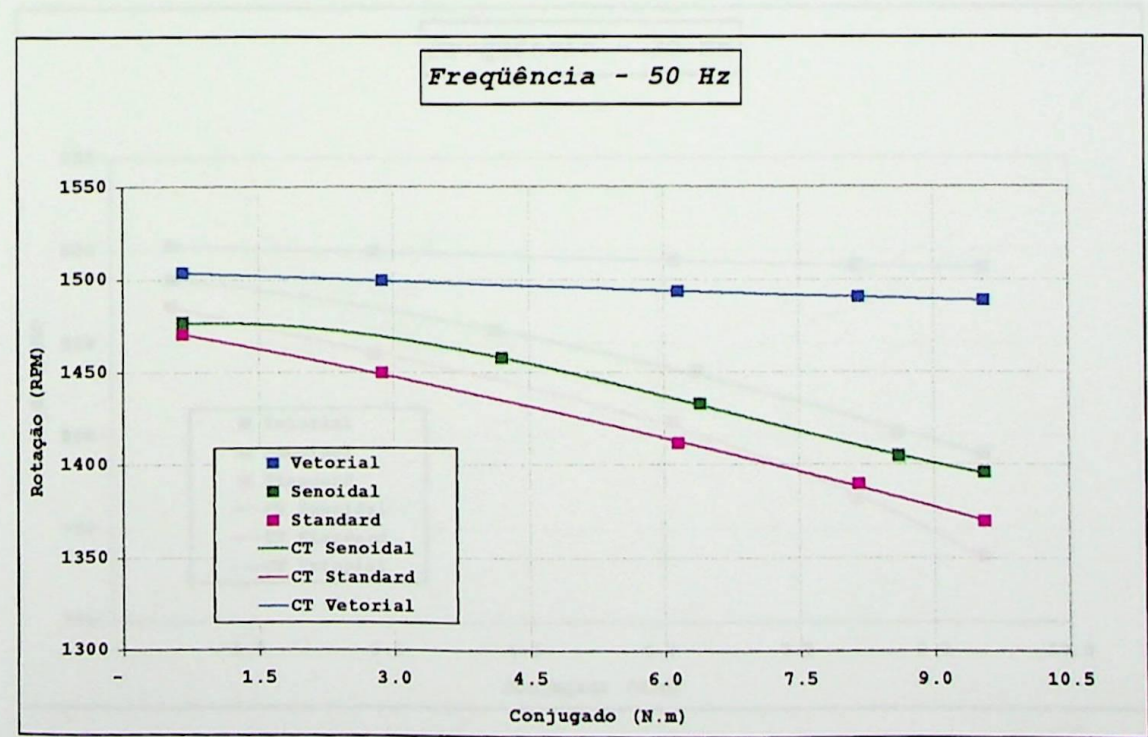


Figura 4.7.1 - 2: Curvas de Tendência da Rotação versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para a frequência de 50 Hz.

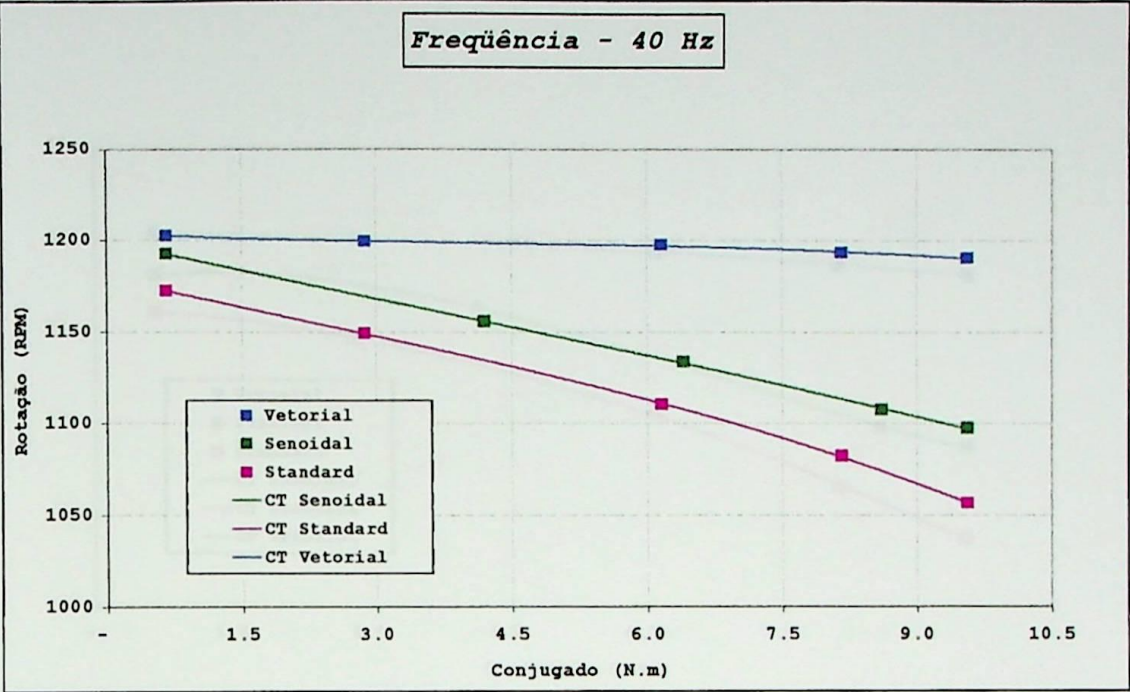


Figura 4.7.1 - 3: Curvas de Tendência da Rotação versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para a frequência de 40 Hz.

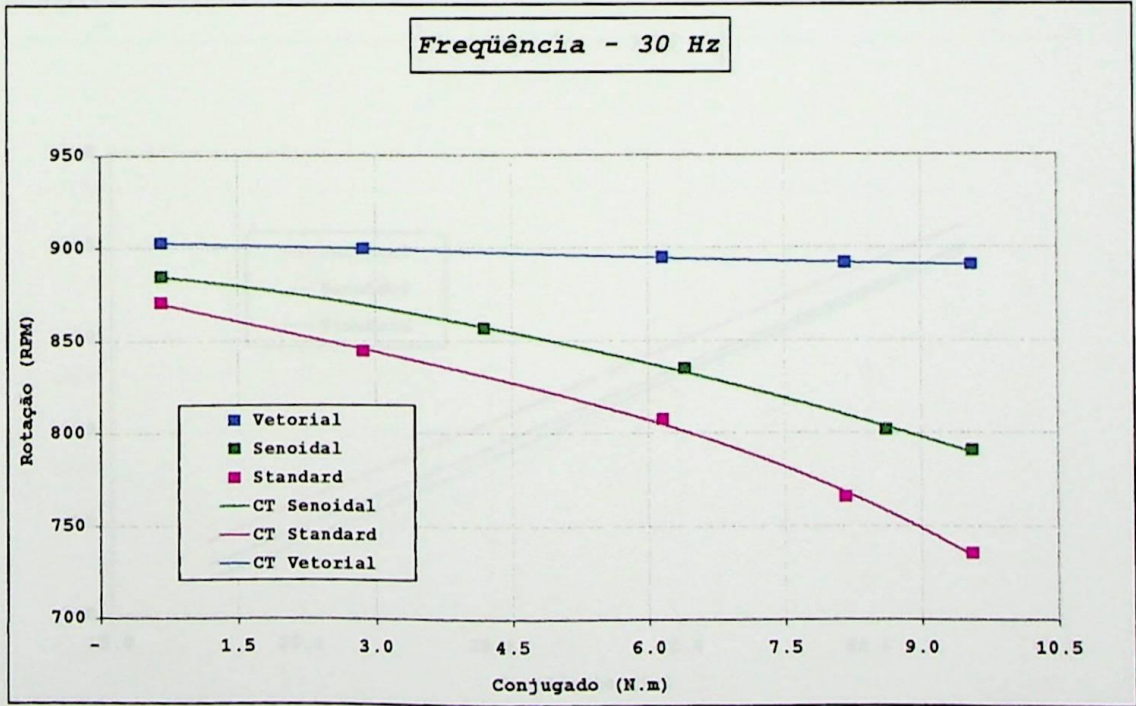


Figura 4.7.1 - 4: Curvas de Tendência da Rotação versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM ((parametrizações Standard e Vetorial), para a frequência de 30 Hz.

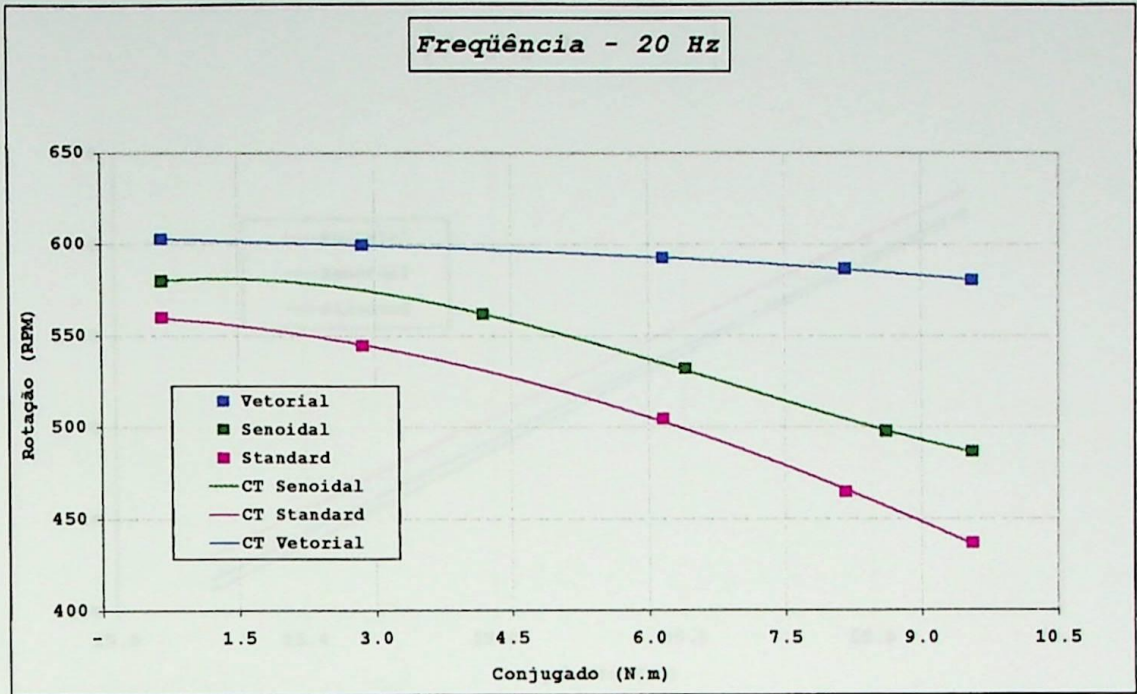


Figura 4.7.1 - 5: Curvas de Tendência da Rotação versus Conjugado para os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para a frequência de 20 Hz.

4.7.2 Rotação X Frequência - por patamar de conjugado

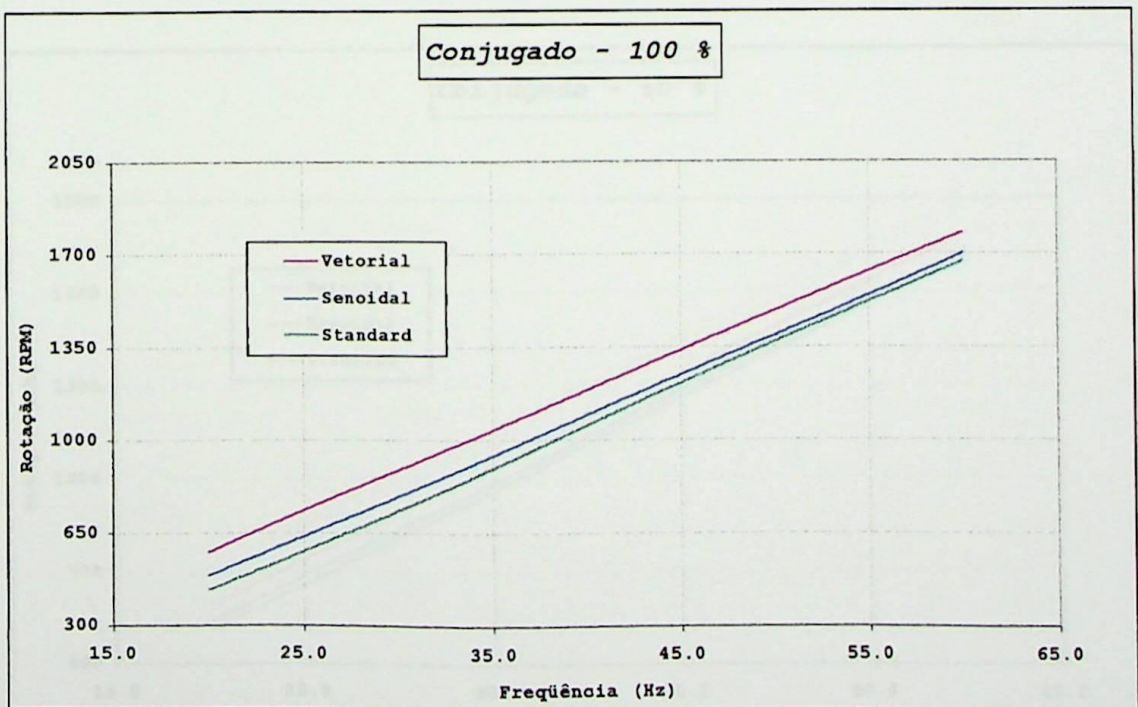


Figura 4.7.2 - 1: Comportamento da Rotação versus Frequência os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado nominal.

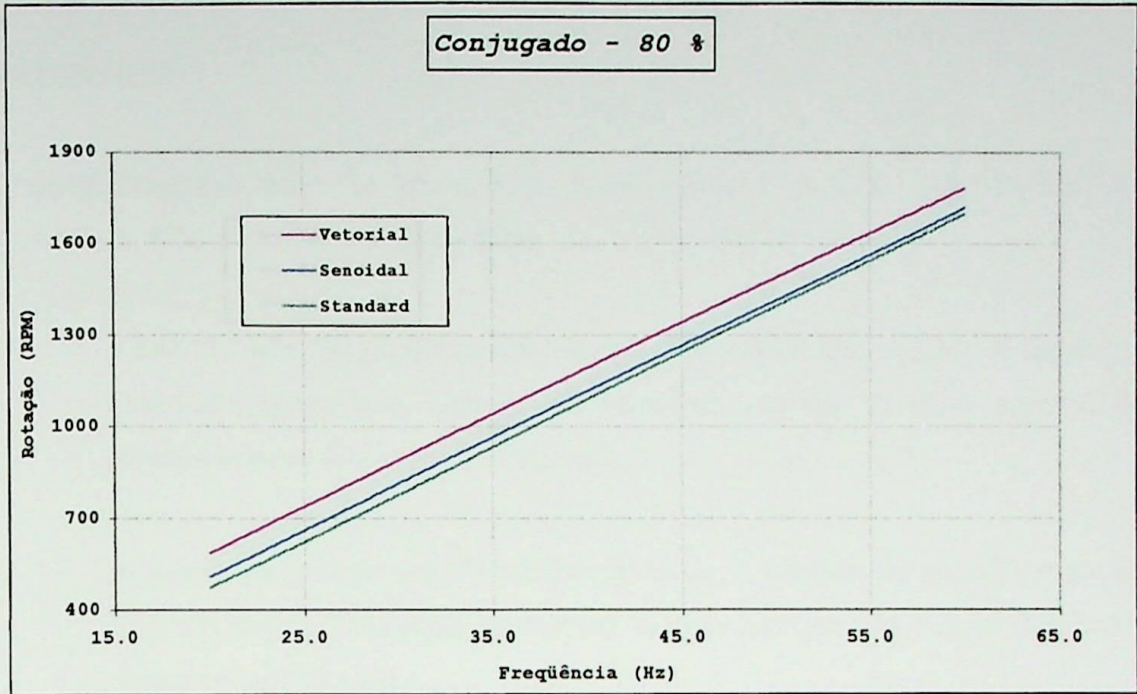


Figura 4.7.2 - 2: Comportamento da Rotação versus Frequência os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 80 % do nominal.

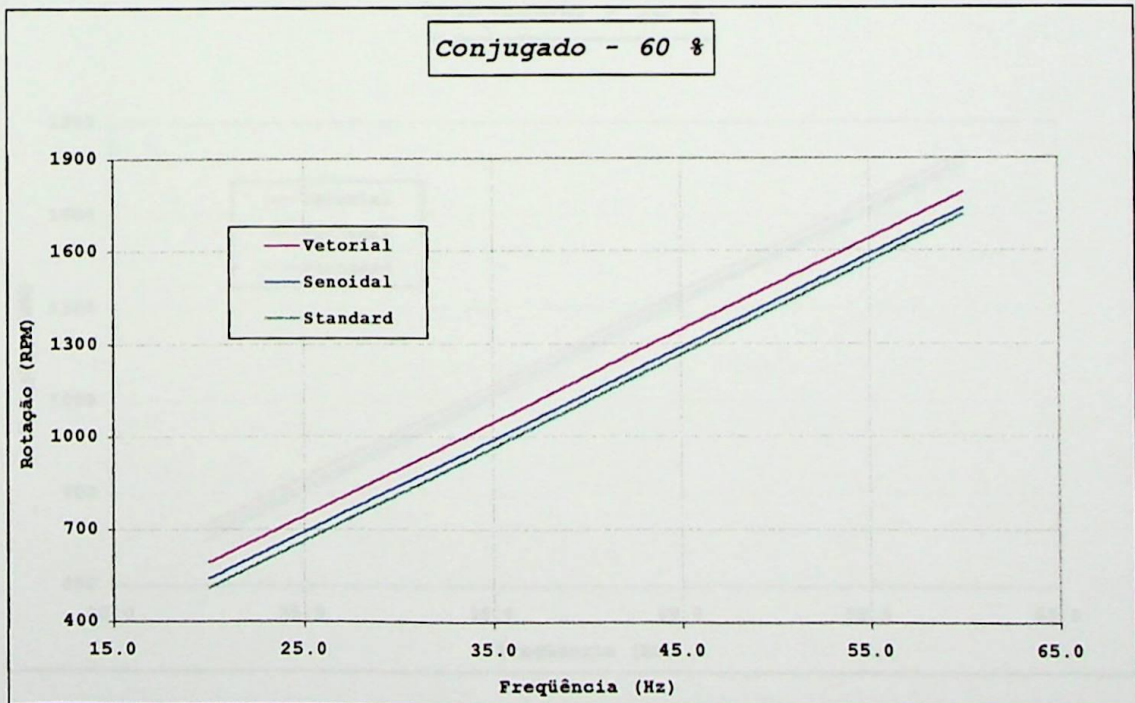


Figura 4.7.2 - 3: Comportamento da Rotação versus Frequência os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 60 % do nominal.

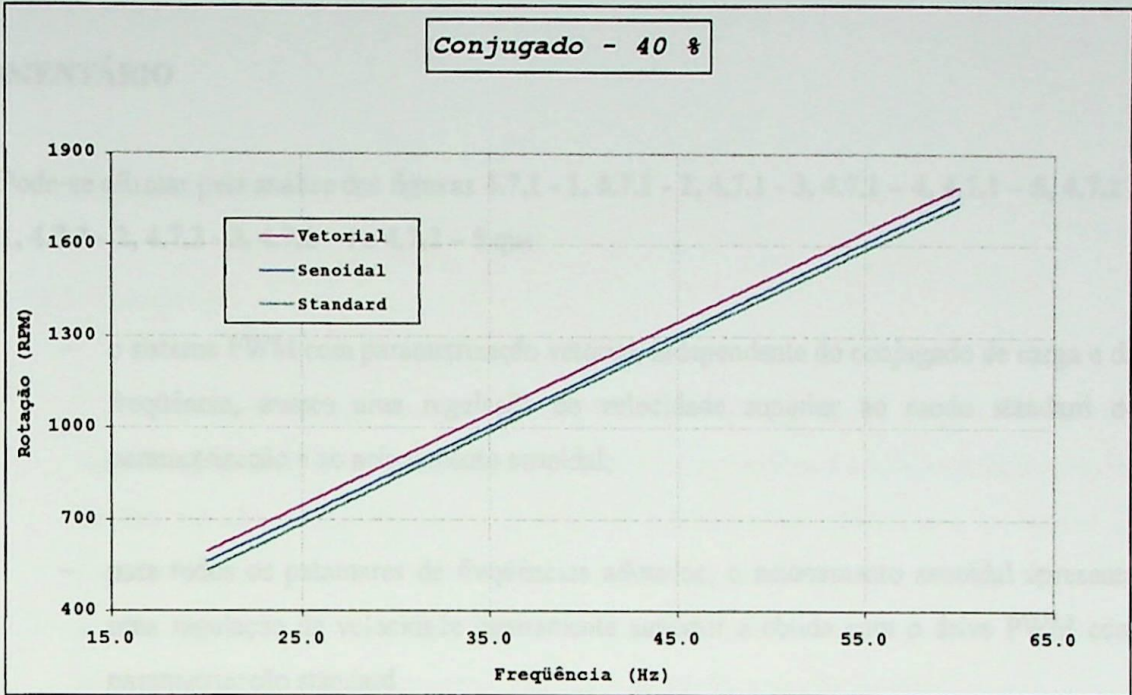


Figura 4.7.2 - 4: Comportamento da Rotação versus Frequência os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 40 % do nominal.

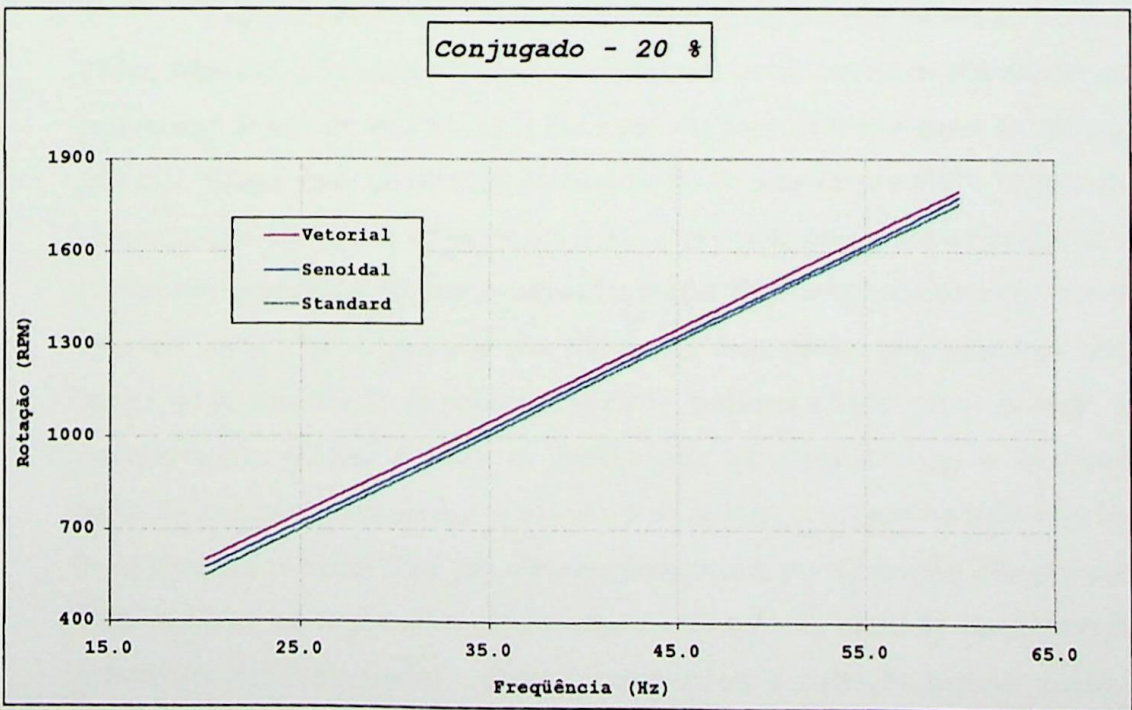


Figura 4.7.2 - 5: Comportamento da Rotação versus Frequência os acionamentos Senoidal e PWM (parametrizações Standard e Vetorial), para o conjugado de 20 % do nominal.

CAPÍTULO V

COMENTÁRIO

Pode-se afirmar pela análise das figuras 4.7.1 - 1, 4.7.1 - 2, 4.7.1 - 3, 4.7.1 - 4, 4.7.1 - 5, 4.7.2 - 1, 4.7.2 - 2, 4.7.2 - 3, 4.7.2 - 4 e 4.7.2 - 5 que:

- o sistema PWM com parametrização vetorial, independente do conjugado de carga e da frequência, exerce uma regulação de velocidade superior ao modo standard de parametrização e ao acionamento senoidal;
- para todos os patamares de frequências adotados, o acionamento senoidal apresenta uma regulação de velocidade ligeiramente superior a obtida com o drive PWM com parametrização standard.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

5.1 Introdução

O trabalho consiste em identificar para vários conjugados de carga e velocidades do motor as principais grandezas envolvidas nos acionamentos e estabelecer comparações de desempenho, tendo em conta os tipos de acionamentos utilizados e os modos de parametrização do sistema PWM. As tabelas apresentadas a seguir indicam os valores das Potências Ativas, Fatores de Potência e Rendimentos por conjugado e frequência, permitindo a avaliação comparativa entre os regimes de operação do motor.

Figura V.1a Faixas de Rendimentos para os acionamentos Senoidal e PWM com parametrização vetorial

5.2 Análise Comparativa

5.2.1 Comportamento do Rendimento

O conjunto dos ensaios realizados demonstram de maneira inequívoca o fato de que os rendimentos do motor obtidos com a utilização de um sistema de alimentação que proporciona formas de onda senoidais são superiores para todos os regimes de operação adotados, independente do modo de parametrização do acionamento PWM. Observa-se, entretanto, que nos limites inferiores das faixas adotadas de conjugados e frequências os rendimentos propiciados pelo acionamento Senoidal e PWM com parametrização vetorial assumem valores muito próximos. Em relação aos desempenhos proporcionados pelas opções de parametrização do acionamento PWM, podemos afirmar que a utilização da parametrização standard somente se justifica para processos de carga e velocidade variáveis, cujas excursões de velocidade situam-se na faixa compreendida entre 80 e 100 % da velocidade nominal. Para processos que excursionam em velocidades inferiores a 80 % da nominal, os rendimentos obtidos com a utilização da opção de parametrização vetorial são significativamente superiores, inviabilizando a utilização do modo standard. A **figura V.1** a seguir indica as faixas de rendimentos para os acionamentos Senoidal e PWM com parametrização vetorial, definidas pelos limites máximo e mínimo dos rendimentos, estabelecidos pelos conjugados de 1,0 (pu) e 0,10 (pu), respectivamente.

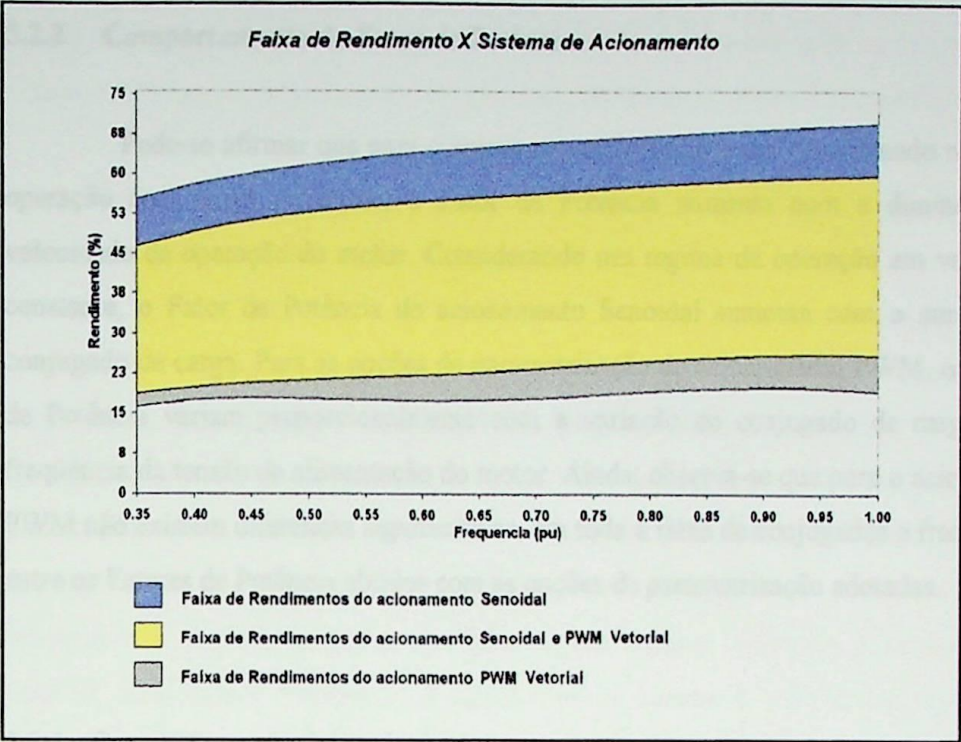


Figura V.1: Faixas limites do Rendimento versus variação de frequência

A figura V.2 a seguir indica as faixas de rendimentos para os acionamentos Senoidal e PWM com parametrização vetorial, definidas pelos limites máximo e mínimo dos rendimentos, estabelecidos pelas frequências de 1,0 (pu) e 0,35 (pu), respectivamente.

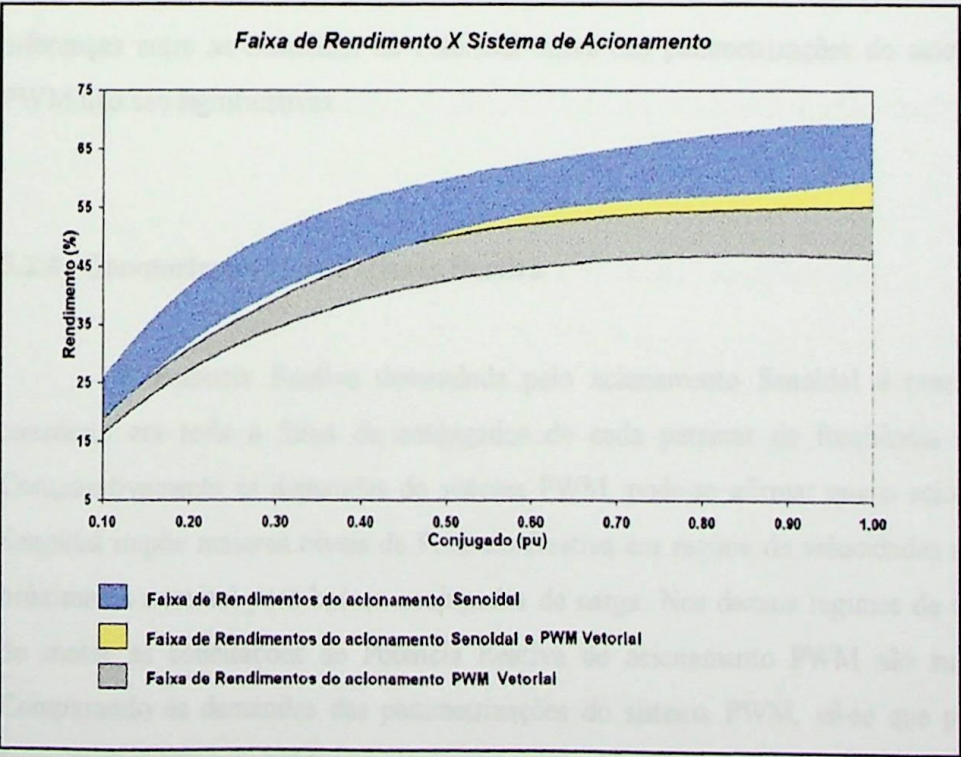


Figura V.2: Faixas limites do Rendimento versus variação de conjugado

5.2.2 Comportamento do Fator de Potência

Pode-se afirmar que para o acionamento Senoidal e um determinado regime de operação com carga constante, o Fator de Potência aumenta com a diminuição da velocidade de operação do motor. Considerando um regime de operação em velocidade constante, o Fator de Potência do acionamento Senoidal aumenta com o aumento do conjugado de carga. Para as opções de parametrização do acionamento PWM, os Fatores de Potência variam proporcionalmente com a variação do conjugado de carga ou da frequência da tensão de alimentação do motor. Ainda, observa-se que para o acionamento PWM não existem diferenças significativas, em toda a faixa de conjugados e frequências, entre os Fatores de Potência obtidos com as opções de parametrização adotadas.

5.2.3 Comportamento da Potência Ativa

A Potência Ativa demandada pelo acionamento PWM, independente da parametrização, patamar de conjugado e frequência adotada, é sempre superior aos níveis de potência estabelecidos com a utilização do acionamento Senoidal. Em relação aos modos de parametrização do acionamento PWM e considerando toda a faixa de frequências, pode-se afirmar que a opção vetorial demanda maiores níveis de Potência Ativa acima de 30 % do conjugado nominal. Abaixo de 30 % do conjugado nominal as diferenças entre as demandas de Potência Ativa das parametrizações do acionamento PWM não são significativas.

5.2.4 Comportamento da Potência Reativa

A Potência Reativa demandada pelo acionamento Senoidal é praticamente constante em toda a faixa de conjugados de cada patamar de frequência adotado. Comparativamente às demandas do sistema PWM, pode-se afirmar que o acionamento Senoidal impõe maiores níveis de Potência Reativa em regime de velocidades médias e próximas a nominal para baixos conjugados de carga. Nos demais regimes de operação do motor as solicitações de Potência Reativa do acionamento PWM são superiores. Comparando as demandas das parametrizações do sistema PWM, vê-se que para toda faixa de frequências, médios e altos conjugados, a parametrização vetorial estabelece

níveis de Potência Reativa superiores a opção standard. Para toda a faixa de frequências e baixos conjugados, a opção standard apresenta demandas ligeiramente superiores.

5.2.5 Comportamento da Potência Aparente

A Potência Aparente demandada pelo acionamento PWM é superior para praticamente toda a faixa de conjugados e frequências adotadas, exceto para baixos conjugados de carga e a metade superior da faixa de frequências, onde o acionamento Senoidal apresenta demandas superiores. Em relação as demandas de Potência Aparente das opções de parametrização do acionamento PWM, observa-se que para médios e altos conjugados a opção standard tem exigências ligeiramente inferiores a parametrização vetorial. Para baixos conjugados a opção vetorial apresenta solicitações ligeiramente inferiores.

5.2.6 Comportamento da Rotação

A capacidade de regulação de velocidade do sistema PWM com parametrização vetorial é superior para todas as faixas de conjugados de carga e frequências, embora as diferenças em relação aos comportamentos da opção standard e do acionamento senoidal diminuam com a diminuição do conjugado de carga. A regulação de velocidade do acionamento senoidal se apresenta superior a obtida com a parametrização standard.

5.3 Tabelas de cálculo das Potências, Fatores de Potência e Rendimentos

As tabelas comparativas apresentam os principais valores das grandezas envolvidas nos acionamentos, calculadas a partir de interpolações, tendo como referencia as medições efetuadas para todos os regimes adotados de conjugados de carga e frequências da tensão de alimentação do motor. Foi utilizado o MATLAB – versão 5.1 para construção das planilhas a seguir:

PLANILHA V - 1

**PLANILHA DE CÁLCULO DAS POTÊNCIAS ATIVAS ENVOLVIDAS NO ACIONAMENTO
SENOIDAL EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS**

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Potencia Ativa (W)													
1,00	2454	2335	2218	2104	1990	1877	1762	1645	1525	1404	1284	1166	1053	945
0,95	2342	2229	2117	2007	1898	1789	1680	1570	1459	1348	1236	1125	1015	906
0,90	2239	2128	2021	1915	1811	1707	1604	1501	1396	1292	1186	1081	974	868
0,85	2141	2032	1928	1827	1728	1630	1533	1435	1336	1236	1135	1035	933	832
0,80	2047	1940	1838	1741	1648	1556	1464	1371	1276	1180	1084	987	892	797
0,75	1954	1848	1750	1658	1570	1483	1397	1308	1217	1124	1032	939	850	763
0,70	1860	1757	1663	1575	1492	1410	1329	1245	1158	1069	979	892	808	729
0,65	1764	1665	1575	1492	1413	1336	1259	1180	1097	1013	928	846	767	694
0,60	1664	1571	1486	1407	1333	1260	1188	1113	1035	956	878	801	727	658
0,55	1561	1476	1397	1322	1252	1183	1114	1044	973	900	828	757	688	622
0,50	1457	1380	1307	1237	1170	1105	1040	975	910	845	779	714	649	585
0,45	1352	1283	1217	1152	1089	1027	966	907	848	790	731	672	611	549
0,40	1247	1187	1127	1067	1008	950	893	839	787	736	684	630	574	513
0,35	1144	1092	1038	983	928	875	823	774	728	683	637	589	537	478
0,30	1043	998	950	900	851	802	755	711	671	632	592	548	500	444
0,25	946	905	863	819	775	732	691	653	617	582	546	507	463	411
0,20	853	815	777	740	703	667	632	599	567	535	502	466	426	381
0,15	766	728	694	663	634	606	579	551	521	490	458	424	389	352
0,10	686	644	612	588	569	551	532	509	480	448	415	382	351	326
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

PLANILHA V - 2

PLANILHA DE CÁLCULO DOS FATORES DE POTÊNCIA ENVOLVIDOS NO ACIONAMENTO
SENoidal EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Fator de Potência													
1,00	0,759	0,770	0,775	0,775	0,774	0,773	0,773	0,778	0,788	0,802	0,818	0,836	0,853	0,869
0,95	0,748	0,758	0,762	0,763	0,762	0,762	0,763	0,768	0,777	0,789	0,804	0,821	0,839	0,856
0,90	0,737	0,745	0,749	0,750	0,750	0,749	0,751	0,756	0,765	0,777	0,792	0,809	0,827	0,846
0,85	0,724	0,732	0,736	0,737	0,736	0,736	0,738	0,743	0,752	0,764	0,780	0,798	0,817	0,837
0,80	0,710	0,718	0,722	0,722	0,721	0,721	0,723	0,728	0,738	0,751	0,768	0,786	0,807	0,828
0,75	0,695	0,703	0,707	0,707	0,706	0,705	0,706	0,712	0,722	0,737	0,754	0,774	0,796	0,818
0,70	0,678	0,687	0,690	0,690	0,688	0,687	0,689	0,695	0,705	0,720	0,739	0,760	0,782	0,805
0,65	0,659	0,668	0,671	0,671	0,670	0,669	0,670	0,676	0,687	0,702	0,721	0,742	0,764	0,788
0,60	0,639	0,646	0,649	0,650	0,649	0,649	0,651	0,656	0,667	0,681	0,699	0,720	0,743	0,767
0,55	0,616	0,623	0,626	0,627	0,627	0,627	0,630	0,635	0,645	0,658	0,675	0,695	0,717	0,742
0,50	0,592	0,597	0,600	0,602	0,603	0,604	0,607	0,613	0,622	0,634	0,649	0,667	0,689	0,713
0,45	0,565	0,570	0,573	0,575	0,577	0,580	0,583	0,589	0,596	0,607	0,620	0,637	0,657	0,682
0,40	0,537	0,540	0,543	0,546	0,549	0,553	0,558	0,563	0,570	0,578	0,590	0,605	0,624	0,649
0,35	0,507	0,509	0,511	0,515	0,520	0,525	0,531	0,536	0,541	0,548	0,558	0,571	0,589	0,615
0,30	0,476	0,476	0,478	0,483	0,489	0,496	0,502	0,507	0,512	0,517	0,524	0,536	0,554	0,580
0,25	0,442	0,441	0,444	0,449	0,456	0,464	0,471	0,477	0,480	0,484	0,490	0,501	0,519	0,544
0,20	0,407	0,405	0,408	0,414	0,422	0,430	0,438	0,444	0,447	0,451	0,456	0,466	0,483	0,510
0,15	0,371	0,368	0,370	0,376	0,385	0,395	0,403	0,409	0,413	0,416	0,421	0,432	0,449	0,476
0,10	0,333	0,329	0,331	0,338	0,347	0,357	0,366	0,373	0,377	0,381	0,387	0,398	0,417	0,445
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

PLANILHA V - 3

PLANILHA DE CÁLCULO DOS RENDIMENTOS ENVOLVIDOS NO ACIONAMENTO
SENOIDAL EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Rendimento (%)													
1,00	69,56	68,98	68,42	67,85	67,24	66,57	65,82	64,99	64,06	62,98	61,67	60,05	57,97	55,26
0,95	69,41	68,83	68,29	67,77	67,21	66,58	65,84	64,96	63,93	62,70	61,24	59,52	57,46	54,99
0,90	68,98	68,48	68,01	67,52	66,98	66,35	65,61	64,72	63,66	62,40	60,92	59,18	57,15	54,78
0,85	68,30	67,95	67,56	67,10	66,56	65,92	65,16	64,27	63,25	62,05	60,63	58,96	56,96	54,58
0,80	67,41	67,24	66,95	66,52	65,97	65,29	64,50	63,64	62,70	61,62	60,34	58,77	56,81	54,34
0,75	66,36	66,39	66,19	65,79	65,22	64,50	63,69	62,86	62,02	61,09	59,97	58,53	56,61	54,03
0,70	65,21	65,40	65,30	64,92	64,33	63,59	62,77	61,97	61,23	60,43	59,45	58,13	56,26	53,60
0,65	64,03	64,32	64,27	63,93	63,34	62,59	61,78	61,01	60,32	59,60	58,72	57,48	55,67	53,02
0,60	62,83	63,14	63,12	62,80	62,24	61,53	60,74	59,98	59,30	58,58	57,70	56,50	54,77	52,26
0,55	61,56	61,83	61,79	61,50	61,00	60,34	59,59	58,84	58,11	57,33	56,39	55,18	53,54	51,28
0,50	60,16	60,31	60,24	59,98	59,54	58,95	58,26	57,51	56,70	55,80	54,75	53,50	51,96	50,03
0,45	58,52	58,53	58,41	58,16	57,79	57,29	56,66	55,89	54,98	53,93	52,75	51,44	50,00	48,44
0,40	56,55	56,39	56,20	55,97	55,67	55,25	54,67	53,88	52,86	51,66	50,34	48,97	47,63	46,43
0,35	54,10	53,78	53,53	53,30	53,03	52,67	52,14	51,33	50,21	48,88	47,45	46,03	44,79	43,91
0,30	50,99	50,55	50,24	49,99	49,74	49,41	48,88	48,04	46,87	45,47	43,99	42,58	41,42	40,74
0,25	46,97	46,50	46,15	45,87	45,59	45,22	44,66	43,81	42,64	41,27	39,84	38,50	37,41	36,80
0,20	41,75	41,36	41,02	40,69	40,32	39,85	39,22	38,37	37,30	36,10	34,85	33,66	32,64	31,93
0,15	34,94	34,76	34,48	34,09	33,59	32,97	32,26	31,46	30,60	29,70	28,77	27,84	26,90	25,96
0,10	26,06	26,20	26,04	25,61	24,99	24,25	23,50	22,82	22,27	21,78	21,30	20,71	19,91	18,73
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

PLANILHA V - 4

PLANILHA DE CÁLCULO DAS POTÊNCIAS ATIVAS ENVOLVIDAS NO ACIONAMENTO
PWM STANDARD EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Potencia Ativa (W)													
1,00	2822	2641	2493	2368	2259	2159	2061	1956	1841	1720	1596	1473	1355	1245
0,95	2715	2547	2402	2275	2161	2055	1953	1848	1740	1628	1515	1401	1288	1177
0,90	2600	2445	2305	2178	2061	1952	1847	1744	1641	1536	1431	1325	1218	1109
0,85	2481	2337	2203	2079	1962	1852	1746	1644	1545	1446	1347	1248	1147	1043
0,80	2358	2225	2098	1978	1863	1754	1649	1549	1453	1358	1265	1171	1076	977
0,75	2234	2112	1993	1878	1767	1660	1558	1460	1366	1275	1185	1096	1007	915
0,70	2111	1999	1889	1780	1674	1571	1471	1376	1285	1196	1110	1026	941	855
0,65	1991	1890	1787	1686	1585	1487	1391	1299	1211	1125	1042	961	880	800
0,60	1876	1784	1691	1596	1502	1409	1318	1229	1144	1062	982	904	826	749
0,55	1766	1684	1598	1511	1423	1336	1250	1166	1085	1006	929	853	778	703
0,50	1661	1587	1510	1430	1349	1267	1186	1107	1031	956	882	809	735	660
0,45	1561	1495	1425	1352	1277	1201	1126	1052	980	910	840	769	697	622
0,40	1466	1406	1342	1275	1207	1137	1067	999	932	866	800	732	661	587
0,35	1377	1321	1262	1200	1137	1074	1010	947	886	824	762	697	629	556
0,30	1292	1238	1183	1126	1068	1010	952	895	839	782	724	663	597	527
0,25	1212	1158	1105	1051	998	945	892	841	790	738	685	628	567	501
0,20	1136	1080	1027	975	925	877	830	784	738	691	643	591	536	476
0,15	1066	1004	948	897	850	806	764	723	681	639	596	551	504	454
0,10	1000	929	869	817	771	730	692	655	619	582	545	507	470	433
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

PLANILHA V - 5

PLANILHA DE CÁLCULO DOS FATORES DE POTÊNCIA ENVOLVIDOS NO ACIONAMENTO
PWM STANDARD EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]
Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Fator de Potência													
1,00	0,738	0,730	0,723	0,717	0,711	0,706	0,700	0,694	0,687	0,679	0,671	0,663	0,655	0,647
0,95	0,733	0,725	0,718	0,712	0,706	0,700	0,693	0,687	0,680	0,673	0,665	0,657	0,648	0,639
0,90	0,728	0,720	0,713	0,706	0,700	0,693	0,687	0,680	0,673	0,666	0,658	0,650	0,641	0,631
0,85	0,722	0,715	0,708	0,701	0,694	0,688	0,681	0,674	0,667	0,659	0,651	0,643	0,634	0,624
0,80	0,717	0,709	0,702	0,695	0,688	0,682	0,675	0,668	0,661	0,653	0,645	0,636	0,626	0,617
0,75	0,711	0,703	0,696	0,689	0,683	0,676	0,670	0,663	0,655	0,647	0,638	0,629	0,619	0,610
0,70	0,705	0,697	0,690	0,683	0,677	0,671	0,665	0,657	0,649	0,640	0,631	0,622	0,612	0,603
0,65	0,699	0,691	0,684	0,678	0,672	0,666	0,659	0,652	0,644	0,634	0,625	0,615	0,605	0,597
0,60	0,692	0,684	0,678	0,672	0,666	0,661	0,654	0,647	0,638	0,629	0,619	0,609	0,599	0,590
0,55	0,686	0,678	0,672	0,666	0,661	0,655	0,649	0,642	0,633	0,623	0,613	0,603	0,593	0,583
0,50	0,679	0,672	0,666	0,661	0,656	0,650	0,644	0,636	0,628	0,618	0,607	0,597	0,586	0,577
0,45	0,672	0,666	0,660	0,655	0,650	0,645	0,638	0,631	0,622	0,612	0,602	0,591	0,580	0,570
0,40	0,666	0,659	0,654	0,649	0,644	0,639	0,633	0,625	0,616	0,606	0,596	0,585	0,574	0,564
0,35	0,659	0,652	0,647	0,642	0,638	0,632	0,626	0,619	0,610	0,600	0,590	0,579	0,568	0,558
0,30	0,652	0,646	0,640	0,636	0,631	0,626	0,620	0,612	0,603	0,593	0,583	0,572	0,562	0,553
0,25	0,645	0,639	0,633	0,628	0,623	0,618	0,612	0,605	0,596	0,586	0,576	0,566	0,556	0,548
0,20	0,639	0,631	0,625	0,620	0,615	0,610	0,605	0,597	0,588	0,578	0,568	0,558	0,550	0,543
0,15	0,632	0,624	0,617	0,612	0,607	0,602	0,596	0,588	0,579	0,569	0,559	0,550	0,543	0,539
0,10	0,626	0,616	0,608	0,602	0,597	0,592	0,586	0,579	0,569	0,559	0,550	0,542	0,536	0,535
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

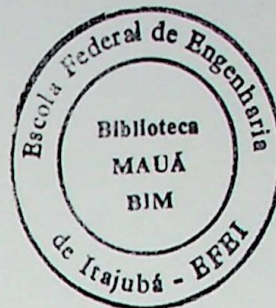
PLANILHA V - 6

PLANILHA DE CÁLCULO DOS RENDIMENTOS ENVOLVIDOS NO ACIONAMENTO
PWM STANDARD EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Rendimento (%)													
1,00	59,35	59,96	59,91	59,22	57,99	56,35	54,45	52,46	50,46	48,40	46,17	43,68	40,79	37,40
0,95	58,91	59,36	59,35	58,87	57,96	56,66	55,06	53,25	51,28	49,15	46,83	44,28	41,46	38,32
0,90	58,53	58,84	58,85	58,53	57,87	56,86	55,54	53,93	52,05	49,94	47,61	45,06	42,30	39,33
0,85	58,16	58,36	58,38	58,17	57,70	56,93	55,86	54,46	52,73	50,72	48,44	45,94	43,24	40,37
0,80	57,78	57,88	57,89	57,75	57,41	56,84	55,98	54,80	53,26	51,41	49,26	46,85	44,21	41,38
0,75	57,33	57,36	57,34	57,23	56,98	56,55	55,87	54,89	53,57	51,92	49,95	47,67	45,11	42,29
0,70	56,77	56,72	56,65	56,55	56,35	56,01	55,48	54,69	53,58	52,15	50,38	48,27	45,81	43,01
0,65	56,03	55,89	55,77	55,64	55,46	55,18	54,75	54,10	53,18	51,96	50,39	48,47	46,17	43,45
0,60	55,03	54,80	54,61	54,44	54,25	54,00	53,63	53,08	52,29	51,22	49,84	48,11	46,00	43,48
0,55	53,71	53,39	53,13	52,91	52,69	52,44	52,09	51,59	50,87	49,91	48,67	47,13	45,27	43,04
0,50	52,04	51,63	51,30	51,03	50,77	50,49	50,14	49,64	48,96	48,05	46,93	45,57	43,96	42,10
0,45	49,96	49,48	49,09	48,77	48,48	48,16	47,78	47,26	46,57	45,69	44,65	43,44	42,09	40,63
0,40	47,40	46,89	46,48	46,12	45,79	45,43	45,00	44,45	43,73	42,87	41,88	40,80	39,69	38,59
0,35	44,29	43,81	43,41	43,04	42,67	42,28	41,82	41,22	40,48	39,61	38,67	37,70	36,77	35,97
0,30	40,57	40,18	39,82	39,47	39,11	38,69	38,19	37,58	36,82	35,97	35,06	34,17	33,36	32,75
0,25	36,15	35,91	35,65	35,36	35,02	34,60	34,10	33,48	32,74	31,92	31,06	30,22	29,48	28,92
0,20	30,93	30,89	30,78	30,59	30,31	29,93	29,45	28,86	28,17	27,42	26,63	25,83	25,09	24,46
0,15	24,81	25,00	25,07	25,01	24,82	24,51	24,10	23,59	23,01	22,36	21,66	20,92	20,15	19,37
0,10	17,69	18,07	18,30	18,37	18,30	18,10	17,79	17,41	16,98	16,49	15,93	15,28	14,51	13,62
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35



PLANILHA V - 7

PLANILHA DE CÁLCULO DAS POTÊNCIAS ATIVAS ENVOLVIDAS NO ACIONAMENTO
PWM VETORIAL EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Potencia Ativa (W)													
1,00	2988	2853	2722	2596	2471	2346	2220	2090	1958	1824	1691	1562	1439	1324
0,95	2890	2725	2583	2458	2342	2231	2116	1993	1858	1719	1582	1454	1342	1252
0,90	2775	2599	2453	2330	2221	2117	2011	1893	1761	1623	1488	1365	1261	1185
0,85	2648	2474	2332	2212	2107	2007	1905	1792	1667	1535	1407	1290	1192	1121
0,80	2513	2352	2217	2101	1998	1900	1801	1693	1576	1455	1336	1226	1132	1060
0,75	2374	2232	2108	1997	1895	1797	1699	1597	1489	1379	1272	1170	1079	1002
0,70	2237	2116	2003	1897	1796	1698	1602	1505	1407	1309	1212	1119	1030	947
0,65	2105	2002	1900	1800	1701	1605	1510	1418	1329	1241	1155	1068	981	892
0,60	1984	1893	1799	1704	1609	1516	1425	1339	1256	1176	1097	1015	930	839
0,55	1871	1786	1699	1609	1520	1432	1347	1266	1189	1113	1038	960	877	788
0,50	1765	1682	1599	1515	1433	1352	1274	1198	1124	1052	979	903	823	737
0,45	1665	1580	1500	1422	1348	1275	1204	1133	1063	991	919	845	768	688
0,40	1568	1479	1401	1329	1263	1200	1136	1071	1003	932	859	786	713	640
0,35	1472	1379	1302	1237	1179	1125	1070	1010	943	872	799	727	658	594
0,30	1375	1279	1204	1145	1096	1050	1003	948	884	813	740	669	604	550
0,25	1275	1177	1106	1053	1012	975	935	885	823	753	681	612	552	507
0,20	1170	1074	1007	961	927	897	864	819	760	692	623	557	503	466
0,15	1057	969	908	868	840	816	788	748	693	630	565	505	457	427
0,10	936	861	809	776	752	731	707	671	623	567	509	456	415	390
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

PLANILHA V - 8

PLANILHA DE CÁLCULO DOS FATORES DE POTÊNCIA ENVOLVIDOS NO ACIONAMENTO
PWM VETORIAL EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Fator de Potência													
1,00	0,736	0,731	0,726	0,722	0,717	0,712	0,706	0,700	0,693	0,686	0,678	0,670	0,661	0,653
0,95	0,732	0,728	0,724	0,720	0,715	0,710	0,703	0,696	0,688	0,680	0,671	0,663	0,655	0,648
0,90	0,728	0,725	0,721	0,716	0,711	0,705	0,698	0,691	0,682	0,674	0,665	0,657	0,649	0,643
0,85	0,723	0,720	0,716	0,711	0,705	0,699	0,691	0,684	0,676	0,668	0,660	0,652	0,645	0,638
0,80	0,717	0,715	0,711	0,705	0,699	0,691	0,684	0,676	0,669	0,661	0,654	0,648	0,641	0,634
0,75	0,711	0,709	0,705	0,699	0,691	0,683	0,675	0,668	0,661	0,655	0,650	0,643	0,637	0,629
0,70	0,705	0,703	0,699	0,692	0,684	0,675	0,667	0,660	0,654	0,649	0,645	0,639	0,632	0,623
0,65	0,699	0,697	0,693	0,685	0,677	0,668	0,660	0,653	0,648	0,644	0,640	0,635	0,628	0,618
0,60	0,693	0,691	0,686	0,679	0,671	0,662	0,653	0,647	0,642	0,638	0,634	0,629	0,622	0,612
0,55	0,687	0,685	0,680	0,673	0,665	0,656	0,648	0,642	0,637	0,632	0,628	0,623	0,615	0,605
0,50	0,681	0,679	0,674	0,668	0,660	0,652	0,644	0,637	0,632	0,627	0,622	0,616	0,608	0,598
0,45	0,675	0,672	0,668	0,662	0,655	0,647	0,640	0,633	0,627	0,621	0,615	0,608	0,600	0,591
0,40	0,668	0,665	0,661	0,656	0,650	0,643	0,636	0,629	0,622	0,615	0,608	0,600	0,592	0,583
0,35	0,661	0,658	0,654	0,650	0,644	0,638	0,632	0,624	0,617	0,608	0,600	0,592	0,583	0,575
0,30	0,654	0,650	0,646	0,642	0,638	0,633	0,627	0,619	0,611	0,602	0,592	0,583	0,574	0,567
0,25	0,646	0,642	0,638	0,634	0,631	0,626	0,621	0,613	0,604	0,594	0,584	0,574	0,565	0,559
0,20	0,638	0,632	0,628	0,625	0,622	0,618	0,613	0,606	0,596	0,586	0,575	0,565	0,556	0,550
0,15	0,628	0,622	0,618	0,615	0,612	0,609	0,604	0,597	0,587	0,577	0,566	0,555	0,547	0,542
0,10	0,618	0,611	0,607	0,603	0,600	0,597	0,592	0,586	0,577	0,567	0,556	0,546	0,538	0,533
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

PLANILHA V - 9

PLANILHA DE CÁLCULO DOS RENDIMENTOS ENVOLVIDOS NO ACIONAMENTO
PWM VETORIAL EM REGIME DE CARGA E VELOCIDADE VARIÁVEIS

Conjugado Base = 9.56 [N.m]

Frequência Base = 60 [Hz]

Conjugado (pu)	Rendimento (%)													
1,00	59,77	59,53	59,12	58,58	57,92	57,18	56,40	55,61	54,81	53,90	52,75	51,22	49,13	46,30
0,95	58,70	59,20	59,21	58,80	58,08	57,18	56,25	55,47	54,89	54,34	53,58	52,29	50,11	46,65
0,90	57,93	58,82	59,07	58,78	58,06	57,11	56,14	55,37	54,91	54,54	53,98	52,83	50,61	46,84
0,85	57,37	58,36	58,72	58,50	57,85	56,95	56,01	55,27	54,83	54,49	53,95	52,83	50,64	46,88
0,80	56,94	57,81	58,14	57,98	57,44	56,66	55,82	55,11	54,62	54,18	53,53	52,35	50,24	46,75
0,75	56,55	57,13	57,35	57,22	56,81	56,21	55,51	54,83	54,24	53,60	52,75	51,47	49,48	46,47
0,70	56,06	56,30	56,36	56,25	55,97	55,54	54,99	54,36	53,63	52,77	51,70	50,30	48,47	46,03
0,65	55,35	55,27	55,19	55,07	54,90	54,62	54,20	53,58	52,75	51,70	50,44	48,98	47,31	45,42
0,60	54,27	54,01	53,84	53,72	53,59	53,39	53,03	52,42	51,53	50,39	49,06	47,62	46,12	44,65
0,55	52,77	52,49	52,31	52,18	52,03	51,82	51,45	50,85	49,95	48,83	47,56	46,21	44,89	43,70
0,50	50,86	50,70	50,56	50,40	50,20	49,91	49,49	48,86	48,03	47,02	45,89	44,72	43,56	42,52
0,45	48,56	48,61	48,55	48,37	48,07	47,66	47,13	46,49	45,75	44,92	44,02	43,07	42,08	41,07
0,40	45,86	46,18	46,23	46,03	45,61	45,04	44,39	43,73	43,11	42,51	41,89	41,20	40,36	39,28
0,35	42,76	43,38	43,54	43,31	42,77	42,04	41,26	40,59	40,11	39,75	39,43	39,00	38,30	37,09
0,30	39,26	40,14	40,40	40,14	39,48	38,61	37,73	37,06	36,71	36,59	36,54	36,37	35,79	34,41
0,25	35,31	36,35	36,69	36,40	35,65	34,68	33,75	33,10	32,87	32,93	33,11	33,15	32,65	31,13
0,20	30,80	31,89	32,24	31,93	31,15	30,17	29,24	28,64	28,49	28,67	28,99	29,15	28,71	27,12
0,15	25,57	26,54	26,83	26,51	25,78	24,88	24,04	23,52	23,43	23,63	23,96	24,14	23,73	22,22
0,10	19,27	19,93	20,08	19,80	19,22	18,52	17,88	17,48	17,40	17,53	17,75	17,83	17,45	16,24
Frequência (pu)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Simovert Master Drives - **Operating Instructions** – SIEMENS
- [2] Luís Eduardo Borges da Silva e Valberto Ferreira da Silva - **Conversão Estática Industrial** - EFEI (Escola Federal de Engenharia de Itajubá).
- [3] David D. Shipp and William S. Vilcheck - **Power Quality and Line Considerations for Variable Speed AC Drives** - IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, No 2, March/April 1996.
- [4] Austin H. Bonnett - **Analysis of the Impact of Pulse-Width Modulated Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors** - IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, No 2, March/April 1996.
- [5] Jocélio Souza de Sá – **Acionamentos Elétricos/1 Parte** – EFEI (Escola Federal de Engenharia de Itajubá).
- [6] Hugo Luiz Sepúlveda - **Máquinas Elétricas – Máquinas Síncronas** - Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Minas Gerais
- [7] Alexandre Rasi Aoki – **Introdução ao MATLAB** - EFEI (Escola Federal de Engenharia de Itajubá).
- [8] The Math Works Inc. – **MATLAB – Guia do Usuário** – Makron Books.

APÊNDICE I

I. CONVERSOR ROTATIVO

I. 1 Princípio de Funcionamento

A f.e.m. induzida no rotor ou no estator, dependendo por onde é excitado o MIT de rotor bobinado e desde que esteja acoplado a uma máquina motriz, pode ser utilizada para alimentação de uma determinada carga. O motor operando dessa forma funciona como um gerador de indução e a sua operação como conversor de frequência se dá pela variação da velocidade e do sentido de rotação do rotor em relação à velocidade síncrona, determinada pelo campo girante da tensão de excitação. Dessa maneira pode-se afirmar que se o estator de uma máquina de indução é excitado a 60 Hz, o acionamento do rotor no mesmo sentido produzirá tensões de frequências abaixo de 60 Hz, sendo que na velocidade síncrona a frequência será zero. Em repouso a frequência da tensão de saída será de 60 Hz e na velocidade síncrona em sentido oposto será de 120 Hz.. A equação que caracteriza esse desempenho è:

$$F_c = F_s \times (1 \pm n_c / n_s), \quad \text{onde:}$$

F_c = frequência da tensão de saída do conversor rotativo em Hz;

F_s = frequência do campo girante da tensão de alimentação em Hz;

n_c = velocidade de rotação do rotor do conversor em r.p.m;

n_s = velocidade de rotação do campo girante em r.p.m. = $n = 120 f / P$.

O sinal positivo (+) é usado quando o sentido de rotação do rotor é oposto ao do campo girante da fonte. Em contrapartida, o sinal negativo (-) é usado quando o sentido de rotação é coincidente com o do campo girante da alimentação.

I. 2 Desenvolvimento do 1º Ensaio

A excitação do motor foi feita através do rotor e utilizando-se de um varivolt de controle, de modo a obter-se no estator uma tensão variável em amplitude pela ação no varivolt e em frequência pela variação relativa entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona. A variação na velocidade do rotor foi feita através da ação no controle de velocidade do motor de corrente contínua (MCC), mecanicamente interligado ao rotor do conversor. A tensão de excitação (rotor) e a de saída (estator) foram monitoradas por voltímetros e a frequência da tensão de saída por um osciloscópio. A **Figura I - 1** ilustra o esquema de montagem adotado.

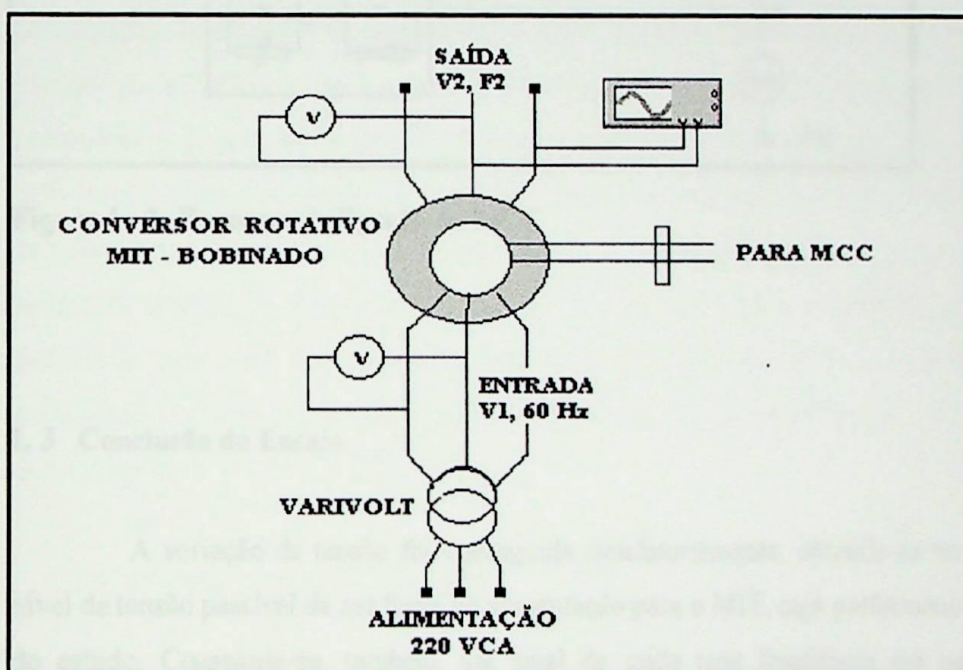


Figura I - 1: Conversor Rotativo

O MCC foi excitado por uma corrente constante e a ponte não controlada foi adicionada para possibilitar a variação da tensão de armadura do MCC através da ação no nível CA. Assim, foi implementando o controle de velocidade do rotor do conversor rotativo, obtendo-se na saída (estator) uma tensão senoidal pura com frequência ajustável. A ligação do MCC é indicada na **Figura I - 2**.

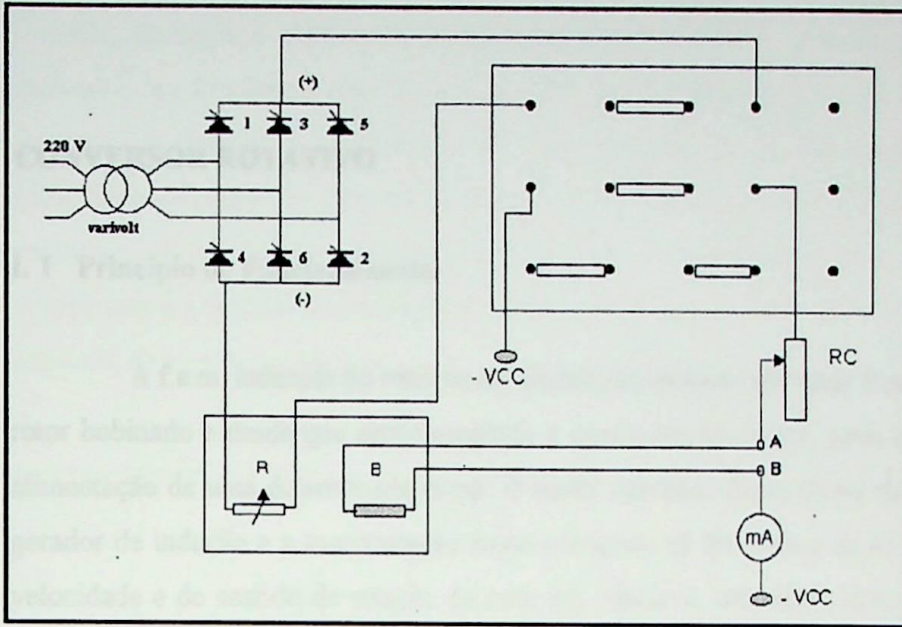


Figura I - 2: Esquema de ligação do MCC

I. 3 Conclusão do Ensaio

A variação de tensão foi conseguida satisfatoriamente, obtendo-se no estator um nível de tensão passível de ser fonte de alimentação para o MIT, cuja performance é o objeto do estudo. Conseguiu-se, também, um sinal de saída cuja frequência era perfeitamente controlável pela variação da velocidade do MCC. Para o rotor em repouso obteve-se uma tensão de saída de frequência 60 Hz isenta de ruídos. À medida que incrementou-se a velocidade do MCC no mesmo sentido de rotação do campo, de maneira a obter tensões com frequências inferiores a 60 Hz, notou-se deformações no sinal, indicando a composição da fundamental com outros sinais de origem indeterminada. Quanto maior a velocidade do rotor (menor a frequência do sinal gerado) maior, também, a deformação observada na onda de saída. Configurou-se, portanto, a inviabilidade de utilização deste motor como conversor de frequências.

PLANILHA II - 1

SENOIDAL - BOBINADO - MEDIÇÃO ELETRODINÂMICA

Freq.(Hz)	Peso (KG)	Rpm	W1 (W)	W2 (W)	V1 (V)	A4 (A)	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	F.P.	C (N . m)	Pm (W)	Rend. (%)
50	3,350	1372	1560	640	220	7,30	2200	1592	2715	0,81	12,36	1775	80,68
	3,200	1391	1520	600	220	6,80	2120	1592	2651	0,80	11,70	1703	80,34
	2,825	1417	1340	520	220	6,10	1860	1419	2339	0,80	10,04	1490	80,08
	2,440	1423	1180	380	220	5,40	1560	1384	2085	0,75	8,34	1243	79,66
	2,040	1452	1000	240	220	4,70	1240	1315	1807	0,69	6,58	1000	80,62
	1,425	1468	780	40	220	4,00	820	1280	1520	0,54	3,86	594	72,38
	0,800	1490	560	-240	220	3,50	320	1384	1421	0,23	1,10	172	53,79
45	3,350	1228	1440	600	198	7,10	2040	1453	2505	0,81	12,36	1589	77,88
	3,100	1250	1300	560	198	6,50	1860	1280	2258	0,82	11,26	1473	79,18
	2,710	1254	1160	420	198	5,90	1580	1280	2034	0,78	9,54	1252	79,21
	2,350	1284	1000	320	198	5,20	1320	1176	1768	0,75	7,95	1068	80,90
	1,870	1302	860	200	198	4,50	1060	1142	1558	0,68	5,83	794	74,92
	1,380	1312	680	0	198	3,90	680	1176	1359	0,50	3,66	503	73,99
	0,800	1331	520	-210	198	3,60	310	1263	1300	0,24	1,10	154	49,60
40	3,350	1052	1260	520	176	7,10	1780	1280	2193	0,81	12,36	1361	76,46
	2,930	1085	1120	440	176	6,30	1560	1176	1954	0,80	10,51	1193	76,48
	2,570	1121	1000	360	176	5,60	1360	1107	1754	0,78	8,92	1046	76,93
	2,200	1136	840	240	176	4,90	1080	1038	1498	0,72	7,28	866	80,19
	1,800	1136	760	160	176	4,30	920	1038	1387	0,66	5,52	656	71,32
	1,320	1172	620	-40	176	4,10	580	1142	1281	0,45	3,40	417	71,89
	0,770	1188	440	-200	176	3,60	240	1107	1133	0,21	0,97	121	50,32
30	3,320	754	960	440	132	7,30	1400	900	1664	0,84	12,23	965	68,93
	3,000	799	860	360	132	6,30	1220	865	1496	0,82	10,82	904	74,14
	2,650	828	780	340	132	5,70	1120	761	1354	0,83	9,27	803	71,73
	2,250	858	660	240	132	4,90	900	727	1157	0,78	7,50	674	74,88
	1,770	864	540	120	132	4,10	660	727	982	0,67	5,39	487	73,79
	1,300	891	420	0	132	3,60	420	727	839	0,50	3,31	309	73,52
	0,750	919	320	-120	132	3,20	200	761	787	0,25	0,88	85	42,46
20	3,150	479	640	320	88	7,00	960	554	1108	0,87	11,48	575	59,94
	2,870	484	600	300	88	6,40	900	519	1039	0,87	10,24	519	57,65
	2,670	503	520	240	88	6,00	760	484	901	0,84	9,36	493	64,83
	2,250	519	460	180	88	4,90	640	484	803	0,80	7,50	408	63,70
	1,820	530	400	40	88	4,30	440	623	763	0,58	5,61	311	70,68
	1,330	550	340	0	88	3,70	340	588	679	0,50	3,44	198	58,30
	0,710	589	210	-80	88	3,30	130	502	518	0,25	0,71	44	33,50

PLANILHA II - 2

SENOIDAL - BOBINADO - MEDIÇÃO ELETRÔNICA

Freq.(Hz)	Pêso (KG)	Rpm	V1 (V)	A4 (A)	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	F.P.	C (N . m)	Pm (W)	Rend. (%)
50	3,350	1372	220	7,31	2326	1490	2762	0,84	12,36	1775	76,31
	3,200	1391	220	7,00	2235	1479	2680	0,83	11,70	1703	76,21
	2,825	1417	220	6,26	1954	1373	2388	0,82	10,04	1490	76,23
	2,440	1423	220	5,50	1632	1318	2098	0,78	8,34	1243	76,14
	2,040	1452	220	4,79	1320	1267	1830	0,72	6,58	1000	75,73
	1,425	1468	220	4,00	889	1237	1523	0,58	3,86	594	66,76
	0,800	1490	220	3,54	431	1281	1352	0,32	1,10	172	39,93
45	3,350	1228	198	7,36	2147	1339	2530	0,85	12,36	1589	74,00
	3,100	1250	198	6,68	1934	1258	2307	0,84	11,26	1473	76,15
	2,710	1266	198	6,00	1667	1193	2050	0,81	9,54	1264	75,80
	2,350	1284	198	5,28	1410	1144	1816	0,78	7,95	1088	75,74
	1,870	1302	198	4,54	1118	1097	1566	0,71	5,83	794	71,03
	1,380	1312	198	3,97	774	1124	1365	0,57	3,66	503	65,01
	0,800	1331	198	3,66	394	1196	1259	0,31	1,10	154	39,02
40	3,350	1052	176	7,16	1892	1159	2219	0,85	12,36	1361	71,94
	2,930	1085	176	6,41	1639	1046	1944	0,84	10,51	1193	72,80
	2,570	1121	176	5,69	1418	1009	1740	0,81	8,92	1046	73,79
	2,200	1136	176	5,06	1220	970	1559	0,78	7,28	866	70,99
	1,800	1136	176	4,36	950	927	1327	0,72	5,52	656	69,06
	1,320	1172	176	4,08	648	1066	1248	0,52	3,40	417	64,35
	0,770	1188	176	3,60	347	1048	1104	0,31	0,97	121	34,80
30	3,320	784	132	7,12	1457	780	1653	0,88	12,23	1003	68,87
	3,000	799	132	6,40	1285	724	1475	0,87	10,82	904	70,39
	2,650	828	132	5,84	1155	683	1342	0,86	9,27	803	69,56
	2,250	838	132	4,93	956	643	1152	0,83	7,50	658	68,85
	1,770	854	132	4,16	700	636	946	0,74	5,39	481	68,77
	1,300	891	132	3,59	496	662	827	0,60	3,31	309	62,25
	0,750	919	132	3,18	258	679	726	0,36	0,88	85	32,92
20	3,150	479	88	7,00	995	410	1076	0,92	11,48	575	57,83
	2,870	492	88	6,50	930	398	1012	0,92	10,24	527	56,71
	2,670	503	88	5,86	814	420	916	0,89	9,36	493	60,53
	2,250	511	88	4,91	654	397	765	0,85	7,50	401	61,37
	1,820	530	88	4,35	511	408	654	0,78	5,61	311	60,86
	1,330	550	88	3,96	395	466	611	0,65	3,44	198	50,18
	0,710	589	88	3,22	188	442	480	0,39	0,71	44	23,16

PLANILHA II - 3

SENOIDAL - GAIOLA

Freq. (Hz)	Pêso (KG)	Rpm	s (%)	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	F.P.	C (N . m)	Pm (W)	Rend. (%)
60	2,215	1705	5,28	2454	2103	3232	0,759	9,56	1706	69,50
	2,000	1714	4,78	2240	2054	3039	0,737	8,61	1544	68,94
	1,500	1734	3,67	1802	2012	2701	0,667	6,40	1162	64,47
	1,000	1757	2,39	1327	1967	2373	0,559	4,19	771	58,12
	0,200	1787	0,72	640	1976	2077	0,308	0,66	124	19,35
50	2,215	1396	6,93	2066	1686	2667	0,775	9,56	1396	67,59
	2,000	1405	6,33	1881	1657	2507	0,750	8,61	1266	67,30
	1,500	1433	4,47	1497	1623	2208	0,678	6,40	960	64,13
	1,000	1458	2,80	1111	1607	1954	0,569	4,19	640	57,60
	0,200	1477	1,53	539	1616	1704	0,316	0,66	102	18,99
40	2,215	1098	8,50	1684	1369	2170	0,776	9,56	1098	65,22
	2,000	1108	7,67	1536	1340	2038	0,754	8,61	998	64,99
	1,500	1134	5,50	1233	1325	1810	0,681	6,40	760	61,62
	1,000	1156	3,67	910	1274	1566	0,581	4,19	507	55,76
	0,200	1193	0,58	494	1337	1425	0,347	0,66	83	16,74
30	2,215	791	12,11	1284	904	1570	0,818	9,56	791	61,63
	2,000	802	10,89	1187	896	1487	0,798	8,61	723	60,88
	1,500	835	7,22	948	893	1302	0,728	6,40	559	59,01
	1,000	857	4,78	720	928	1175	0,613	4,19	376	52,25
	0,200	885	1,67	388	988	1061	0,366	0,66	61	15,81
20	2,215	493	17,83	911	507	1043	0,874	9,56	493	54,13
	2,000	498	17,00	833	512	978	0,852	8,61	449	53,87
	1,500	532	11,33	684	508	852	0,803	6,40	356	52,11
	1,000	562	6,33	519	553	758	0,684	4,19	247	47,53
	0,200	580	3,33	308	630	701	0,439	0,66	40	13,05

PLANILHA II - 4

STANDARD - GAIOLA

Freq.(Hz)	Pêso (KG)	Rpm	s (%)	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	F.P.	C (N . m)	Pm (W)	Rend. (%)
60	3,915	1673	7,06	2822	2579	3823	0,738	9,56	1674	59,30
	3,600	1695	5,83	2492	2381	3446	0,723	8,17	1449	58,15
	3,145	1715	4,72	1978	2027	2832	0,698	6,16	1105	55,89
	2,400	1745	3,06	1292	1502	1981	0,652	2,87	524	40,58
	1,900	1771	1,61	962	1211	1546	0,622	0,66	123	12,77
50	3,915	1370	8,67	2330	2277	3258	0,715	9,56	1370	58,81
	3,600	1390	7,33	2048	2094	2929	0,699	8,17	1188	58,01
	3,145	1412	5,87	1642	1794	2432	0,675	6,16	910	55,44
	2,400	1450	3,33	1107	1351	1746	0,634	2,87	435	39,34
	1,900	1471	1,93	749	1016	1262	0,594	0,66	102	13,61
40	3,915	1057	11,92	1992	2053	2860	0,696	9,56	1057	53,08
	3,600	1083	9,75	1687	1832	2490	0,677	8,17	926	54,88
	3,145	1111	7,42	1321	1529	2021	0,654	6,16	716	54,22
	2,400	1150	4,17	914	1171	1485	0,615	2,87	345	37,81
	1,900	1173	2,25	622	886	1082	0,575	0,66	81	13,08
30	3,915	736	18,22	1596	1763	2378	0,671	9,56	736	46,13
	3,600	766	14,89	1355	1577	2079	0,652	8,17	655	48,34
	3,145	808	10,22	1035	1296	1659	0,624	6,16	521	50,32
	2,400	845	6,11	724	1009	1242	0,583	2,87	254	35,06
	1,900	871	3,22	509	788	938	0,543	0,66	60	11,85
20	3,915	437	27,17	1211	1433	1877	0,645	9,56	437	36,09
	3,600	465	22,50	1013	1278	1631	0,621	8,17	397	39,23
	3,145	505	15,83	767	1040	1292	0,593	6,16	326	42,47
	2,400	545	9,17	502	763	913	0,550	2,87	164	32,62
	1,900	560	6,67	412	650	770	0,535	0,66	39	9,43

PLANILHA II - 5

VETORIAL - GAIOLA

Freq.(Hz)	Pêso (KG)	Rpm	s (%)	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	F.P.	C (N . m)	Pm (W)	Rend. (%)
60	3,915	1784	0,89	2988	2747	4058	0,736	9,56	1785	59,73
	3,600	1785	0,83	2660	2540	3678	0,723	8,17	1526	57,37
	3,145	1791	0,50	2091	2144	2995	0,698	6,16	1154	55,21
	2,400	1797	0,17	1375	1592	2103	0,654	2,87	540	39,26
	1,900	1803	-0,17	856	1109	1401	0,611	0,66	125	14,60
50	3,915	1489	0,73	2554	2463	3548	0,720	9,56	1490	58,33
	3,600	1491	0,60	2186	2171	3080	0,710	8,17	1274	58,32
	3,145	1494	0,40	1756	1884	2575	0,682	6,16	963	54,85
	2,400	1500	0,00	1128	1352	1761	0,641	2,87	450	39,94
	1,900	1504	-0,27	710	962	1196	0,594	0,66	104	14,68
40	3,915	1191	0,75	2134	2166	3040	0,702	9,56	1191	55,84
	3,600	1194	0,50	1841	1949	2680	0,687	8,17	1021	55,45
	3,145	1198	0,17	1439	1663	2199	0,654	6,16	772	53,65
	2,400	1200	0,00	968	1220	1557	0,622	2,87	360	37,25
	1,900	1203	-0,25	633	889	1091	0,580	0,66	83	13,17
30	3,915	891	1,00	1691	1835	2495	0,678	9,56	891	52,70
	3,600	892	0,89	1414	1608	2141	0,660	8,17	762	53,93
	3,145	895	0,56	1148	1382	1796	0,639	6,16	577	50,27
	2,400	900	0,00	740	1008	1251	0,592	2,87	270	36,51
	1,900	903	-0,33	475	722	864	0,550	0,66	63	13,18
20	3,915	581	3,17	1288	1505	1980	0,650	9,56	581	45,13
	3,600	587	2,17	1111	1343	1743	0,637	8,17	502	45,17
	3,145	593	1,17	856	1103	1396	0,613	6,16	382	44,67
	2,400	600	0,00	535	780	946	0,565	2,87	180	33,70
	1,900	603	-0,50	365	588	692	0,527	0,66	42	11,47

APÊNDICE III

III. PROGRAMAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ACIONAMENTOS SENOIDAL E PWM

III.1 Rotina de avaliação de desempenho para velocidade constante -- Rotina fc

```

echo off;
clear;
clc;

*****
% MATRIZES DE TRABALHO
*****

load mt

*****
% RELACAO DE ENTRADAS
*****

disp(' ')
disp('Senoidal ..... = s')
disp('PWM Standard ..... = st')
disp('PWM Vetorial ..... = vt')
disp(' ')
disp('COMPARACAO DE DESEMPENHOS - FREQUENCIA CONSTANTE/CONJUGADO  
VARIABEL')
disp(' ')
sis=input('Sistema de Acionamento n. 1 : ');
disp('VERSUS')
sis1=input('Sistema de Acionamento n. 2: ');
disp(' ')
v=input('Regime de Velocidade (RPM):');

if v < 600 | v > 1800
    v=input('Regime de Velocidade (RPM):');
else
    v=v;
end

*****
% ROTINA DE PREPARACAO
*****

c1 = 2.19:0.0336:11.08; % Intervalo do conjugado
c=c1(:); cp=c*100/11.08; f = (v*4)/(120);
vf=[60 50 40 30 20];

```



```

vcj=[11.08 8.61 6.40 4.19 2.19];
vcj1=[11.08 9.69 7.68 4.39 2.19];
if sis==s
    vc=[11.08 8.61 6.40 4.19 2.19];
else
    vc=[11.08 9.69 7.68 4.39 2.19];
end

if sis1==s
    vc1=[11.08 8.61 6.40 4.19 2.19];
else
    vc1=[11.08 9.69 7.68 4.39 2.19];
end

*****
% INTERPOLACAO DAS POTENCIAS ATIVAS
*****

p1=interp1(vf,sis(1:5,1),f,'spline');
p2=interp1(vf,sis(1:5,2),f,'spline');
p3=interp1(vf,sis(1:5,3),f,'spline');
p4=interp1(vf,sis(1:5,4),f,'spline');
p5=interp1(vf,sis(1:5,5),f,'spline');

vp=[p1 p2 p3 p4 p5];

p6=interp1(vf,sis1(1:5,1),f,'spline');
p7=interp1(vf,sis1(1:5,2),f,'spline');
p8=interp1(vf,sis1(1:5,3),f,'spline');
p9=interp1(vf,sis1(1:5,4),f,'spline');
p10=interp1(vf,sis1(1:5,5),f,'spline');

vp1=[p6 p7 p8 p9 p10];

Pa = interp1(vc,vp,c1,'spline');
P=Pa(:);
Pa1 = interp1(vc1,vp1,c1,'spline');
P1=Pa1(:);

*****
% INTERPOLACAO DOS ESCORREGAMENTOS
*****

s1=interp1(vf,sis(11:15,1),f,'spline');
s2=interp1(vf,sis(11:15,2),f,'spline');
s3=interp1(vf,sis(11:15,3),f,'spline');
s4=interp1(vf,sis(11:15,4),f,'spline');
s5=interp1(vf,sis(11:15,5),f,'spline');

vs=[s1 s2 s3 s4 s5];

s6=interp1(vf,sis1(11:15,1),f,'spline');
s7=interp1(vf,sis1(11:15,2),f,'spline');
s8=interp1(vf,sis1(11:15,3),f,'spline');

```



```

s9=interp1(vf,sis1(11:15,4),f,'spline');
s10=interp1(vf,sis1(11:15,5),f,'spline');

vs1=[s6 s7 s8 s9 s10];

*****
% ESCORREGAMENTO
*****
d = interp1(vc,vs,c1,'spline');

d1 = interp1(vcl,vs1,c1,'spline');

*****
% ROTACAO EFETIVA
*****
Re = v-(d*v)/100;R=Re(:);

Re1 = v-(d1*v)/100;R1=Re1(:);

*****
% POTENCIA MECANICA
*****
c=c1(:);
M=(2*pi*R.*c)/60;
M1=(2*pi*R1.*c)/60;

*****
% RENDIMENTO (%)
*****
Ma = 100*M;

Ma1 = 100*M1;

for i=1:265;
    r(i,1)=Ma(i,1)/P(i,1);
    r1(i,1)=Ma1(i,1)/P1(i,1);
end
rfc;
clc;

```


III.2 Rotina de avaliação de desempenho para carga constante -- Rotina cc

```

echo off;
clear;
clc;

*****
% MATRIZES DE TRABALHO
*****

load mt

*****
% RELACAO DE ENTRADAS
*****

disp(' ')
disp('Senoidal ..... = s')
disp('PWM Standard ..... = st')
disp('PWM Vetorial ..... = vt')
disp(' ')
disp('COMPARACAO DE DESEMPENHOS - CARGA CONSTANTE/VELOCIDADE VARIAVEL')
disp(' ')
sis=input('Sistema de Acionamento n. 1 : ');
disp('VERSUS')
sis1=input('Sistema de Acionamento n. 2: ');
disp(' ')
c1=input('Regime de Carga (%):');

if c1 < 19.765 | c1 > 100
    c1=input('Regime de Carga (%):');
else
    c1=c1;
end

*****
% ROTINA DE PREPARACAO
*****

f1 = 20:0.1:60;

c = (c1/100)*11.08;

vf = [60 50 40 30 20];

if sis==s
    vc=[11.08 8.61 6.40 4.19 2.19];
else
    vc=[11.08 9.69 7.68 4.39 2.19];
end

if sis1==s
    vc1=[11.08 8.61 6.40 4.19 2.19];

```



```

else
    vc1=[11.08 9.69 7.68 4.39 2.19];
end
*****
% INTERPOLACAO DAS POTENCIAS ATIVAS
*****
p1=interp1(vc, sis(1,:), c, 'spline');
p2=interp1(vc, sis(2,:), c, 'spline');
p3=interp1(vc, sis(3,:), c, 'spline');
p4=interp1(vc, sis(4,:), c, 'spline');
p5=interp1(vc, sis(5,:), c, 'spline');

vp=[p1 p2 p3 p4 p5];

p6=interp1(vc1, sis1(1,:), c, 'spline');
p7=interp1(vc1, sis1(2,:), c, 'spline');
p8=interp1(vc1, sis1(3,:), c, 'spline');
p9=interp1(vc1, sis1(4,:), c, 'spline');
p10=interp1(vc1, sis1(5,:), c, 'spline');

vp1=[p6 p7 p8 p9 p10];

Pa = interp1(vf, vp, fl, 'spline');
P=Pa(:);
Pa1 = interp1(vf, vp1, fl, 'spline');
P1=Pa1(:);

*****
% INTERPOLACAO DOS ESCORREGAMENTOS
% *****
s1=interp1(vc, sis(11,:), c, 'spline');
s2=interp1(vc, sis(12,:), c, 'spline');
s3=interp1(vc, sis(13,:), c, 'spline');
s4=interp1(vc, sis(14,:), c, 'spline');
s5=interp1(vc, sis(15,:), c, 'spline');

vs=[s1 s2 s3 s4 s5];

s6=interp1(vc1, sis1(11,:), c, 'spline');
s7=interp1(vc1, sis1(12,:), c, 'spline');

s8=interp1(vc1, sis1(13,:), c, 'spline');
s9=interp1(vc1, sis1(14,:), c, 'spline');
s10=interp1(vc1, sis1(15,:), c, 'spline');

vs1=[s6 s7 s8 s9 s10];

*****
% ESCORREGAMENTO
*****
d = interp1(vf, vs, fl, 'spline');
d1 = interp1(vf, vs1, fl, 'spline');

```



```
*****
```

```
% ROTACAO EFETIVA
```

```
*****
```

```
f=f1(:);
```

```
da=d(:);
```

```
da1=d1(:);
```

```
Re = (f1*30)-(d.*f1)*0.3; Rel = (f1*30)-(d1.*f1)*0.3;
```

```
*****
```

```
% POTENCIA MECANICA
```

```
*****
```

```
R=Re(:);
```

```
R1=Rel(:);
```

```
M=(2*pi*R*c)/60;
```

```
M1=(2*pi*R1*c)/60;
```

```
Ma =M*100;
```

```
M1a = M1*100;
```

```
*****
```

```
% RENDIMENTO (%)
```

```
*****
```

```
for i=1:401;
```

```
    r2(i,1)=Ma(i,1)/P(i,1);
```

```
    r3(i,1)=M1a(i,1)/P1(i,1);
```

```
end
```

```
rcc
```



III.3 Rotina de cálculo de parâmetros dos acionamentos no ponto de operação especificado

Rotina po

```

echo off;
clear;
clc;
format compact;

*****
% MATRIZES DE TRABALHO
*****

load mt

% *****
% RELACAO DE ENTRADAS
% *****

disp(' ')
disp('Senoidal ..... = s')
disp('PWM Standard ..... = st')
disp('PWM Vetorial ..... = vt')
disp(' ')
disp('IDENTIFICACAO DE PARAMETROS NO PONTO DE OPERACAO')
disp(' ')
sis=input('Sistema de Acionamento : ');
disp(' ')
v=input('Regime de Velocidade (RPM):');

if v < 600 | v > 1800
    v=input('Regime de Velocidade (RPM):');
else
    v=v;
end

disp(' ')
cx=input('Regime de Carga (%):');

if cx < 19.765 | cx > 100
    cx=input('Regime de Carga (%):');
else
    cx=cx;
end

*****
% ROTINA DE PREPARACAO
*****

fpu=(v*4)/(120*60); cpu=cx/100; vfHz=[60 50 40 30 20];
vfpu=vfHz/60;

if sis==s
    vcnm=[11.08 8.61 6.40 4.19 2.19];

```



```

else
    vcnm=[11.08 9.69 7.68 4.39 2.19];
end
vcpu=vcnm/11.08;

*****
% INTERPOLACAO DAS POTENCIAS ATIVAS
*****

p1=interp1(vfpu, sis(1:5,1), fpu, 'cubic');
p2=interp1(vfpu, sis(1:5,2), fpu, 'cubic');
p3=interp1(vfpu, sis(1:5,3), fpu, 'cubic');
p4=interp1(vfpu, sis(1:5,4), fpu, 'cubic');
p5=interp1(vfpu, sis(1:5,5), fpu, 'cubic');

vp=[p1 p2 p3 p4 p5];
*****
% INTERPOLACAO DOS FATORES DE POTENCIA
*****

fp1=interp1(vfpu, sis(6:10,1), fpu, 'cubic');
fp2=interp1(vfpu, sis(6:10,2), fpu, 'cubic');
fp3=interp1(vfpu, sis(6:10,3), fpu, 'cubic');
fp4=interp1(vfpu, sis(6:10,4), fpu, 'cubic');
fp5=interp1(vfpu, sis(6:10,5), fpu, 'cubic');

vfp=[fp1 fp2 fp3 fp4 fp5];
*****
% INTERPOLACAO DOS ESCORREGAMENTOS
*****

s1=interp1(vfpu, sis(11:15,1), fpu, 'cubic');
s2=interp1(vfpu, sis(11:15,2), fpu, 'cubic');
s3=interp1(vfpu, sis(11:15,3), fpu, 'cubic');
s4=interp1(vfpu, sis(11:15,4), fpu, 'cubic');
s5=interp1(vfpu, sis(11:15,5), fpu, 'cubic');

vs=[s1 s2 s3 s4 s5];
*****
% POTENCIA ATIVA
*****

Pa = interp1(vcpu, vp, cpu, 'cubic');
P=round(Pa);
*****
% FATOR DE POTENCIA
*****

fp = interp1(vcpu, vfp, cpu, 'cubic');
*****
% POTENCIA APARENTE
*****

Sa=P
S = round(Sa);
*****
% ESCORREGAMENTO

```



```

d = interp1(vcpu,vs,cpu,'cubic');
*****
% ROTACAO EFETIVA
*****
R = v-(d*v)/100;
Re = round(R);
% *****
% POTENCIA MECANICA
*****
M =(2*pi*Re*cpu*11.08)/60;

*****
% RENDIMENTO
*****
ra = (M/P)*100;
r=round(ra);
% *****
% APRESENTACAO DOS RESULTADOS
*****
disp(' ')
disp(' ')

disp ('Potencia Ativa (W) = '),P

disp ('Potencia Aparente (VA) = '),S

disp ('Rotacao Efetiva (RPM) = '),Re

disp ('Fator de Potencia (%) = '),fp

disp ('Rendimento (%) = '),r

```


APÊNDICE IV

Dados de Placa

Motor de Indução Trifásico de Rotor Bobinado

Potência	=	1,86 (KW)
Tensão	=	380 / 220 (V)
Corrente	=	4,3 / 7,5 (A)
Frequência	=	50 (Hz)

Motor de Indução Trifásico de Rotor em Gaiola

Potência	=	3 (CV)
Tensão	=	380 / 220 (V)
Corrente	=	5,27 / 10 (A)
Frequência	=	60 (Hz)

Motor de Corrente Contínua

Potência	=	35 (HP)
Rotação	=	1500 (RPM)
Tensão	=	220 (V)
Excitação	=	3,05 (A)

Máquina Síncrona

Potência	=	35 (KVA)
Rotação	=	1500 (RPM)
Excitação	=	6,7 (A)
Corrente	=	91,8 (A)

APÊNDICE V

V. APRESENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

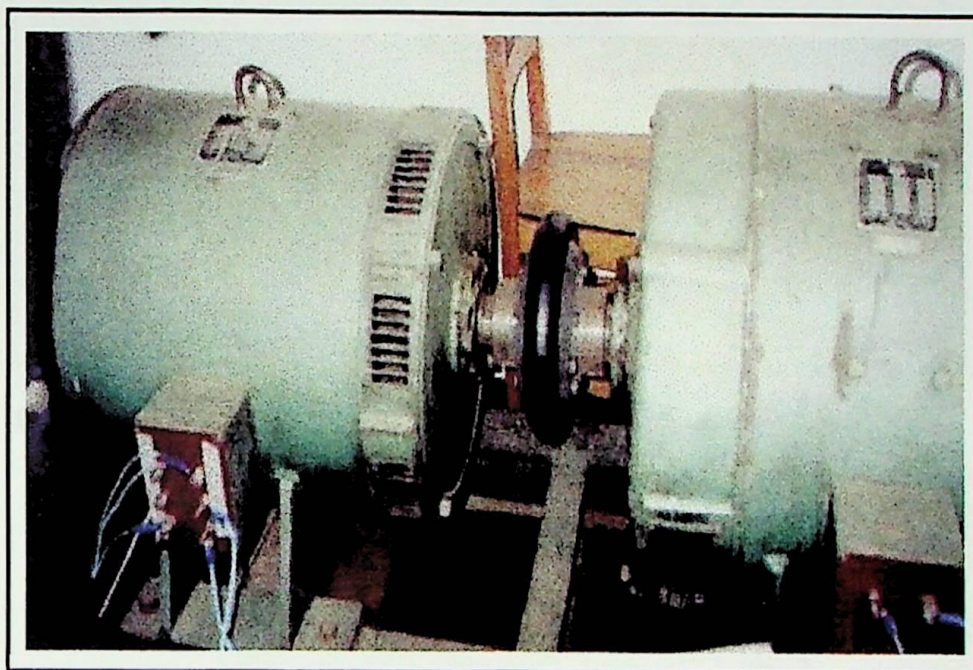


Foto 1: MCC/MS

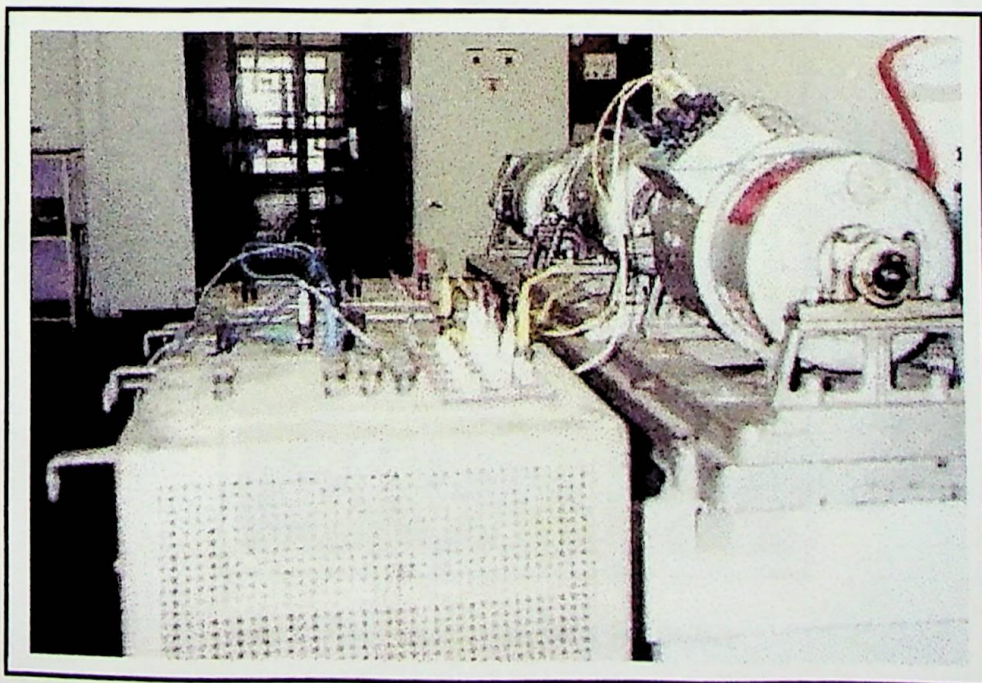


Foto 2: Interligação do GCC - Cargas resistivas



Foto 3: Visão da instrumentação do ensaio do MIT com rotor bobinado

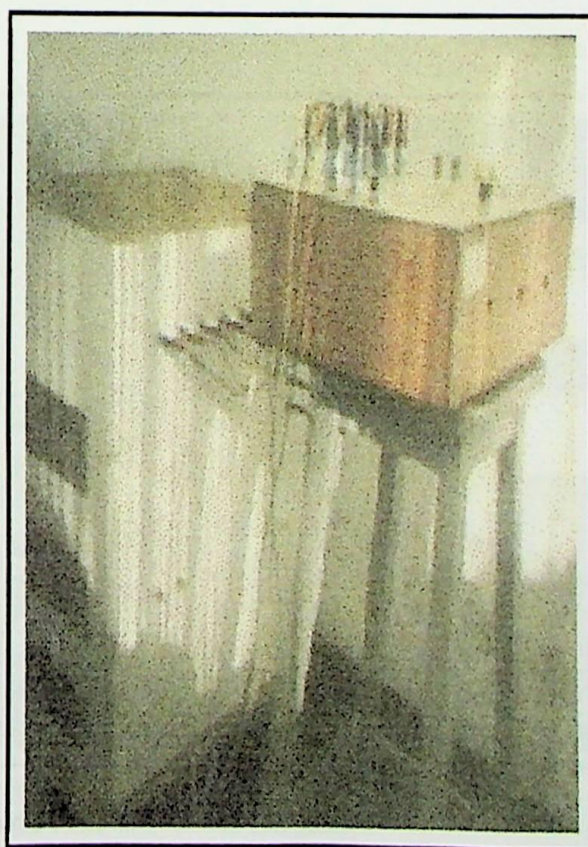


Foto 4: Conversor controlado de 6 pulsos

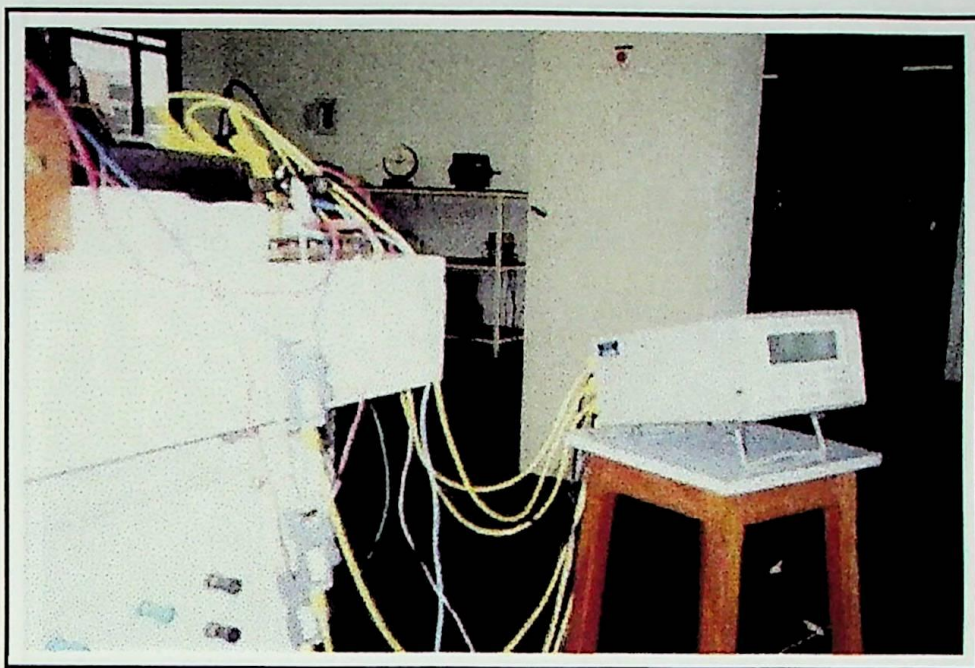


Foto 5: Visão do VOLTECH 300

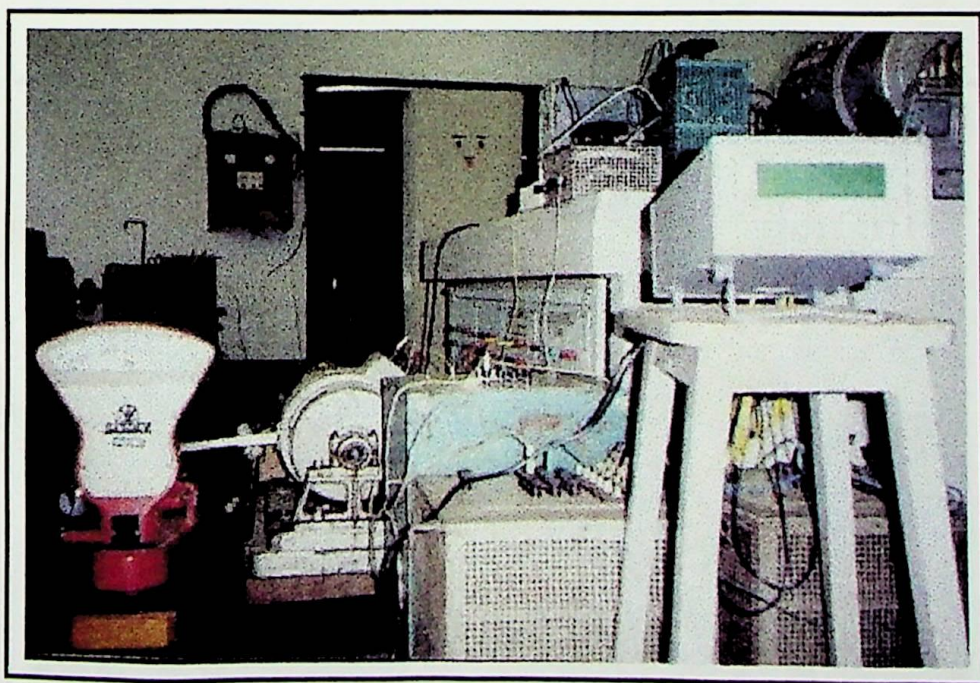


Foto 6: Ensaio do MIT com rotor em gaiola

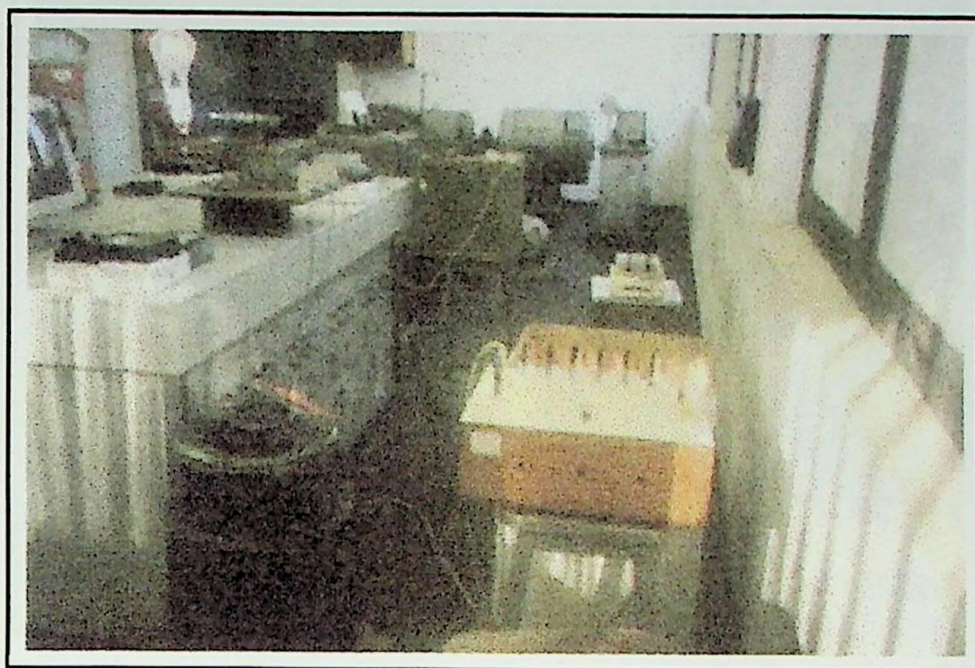


Foto 7: Visão das máquinas e equipamentos envolvidos nos ensaios

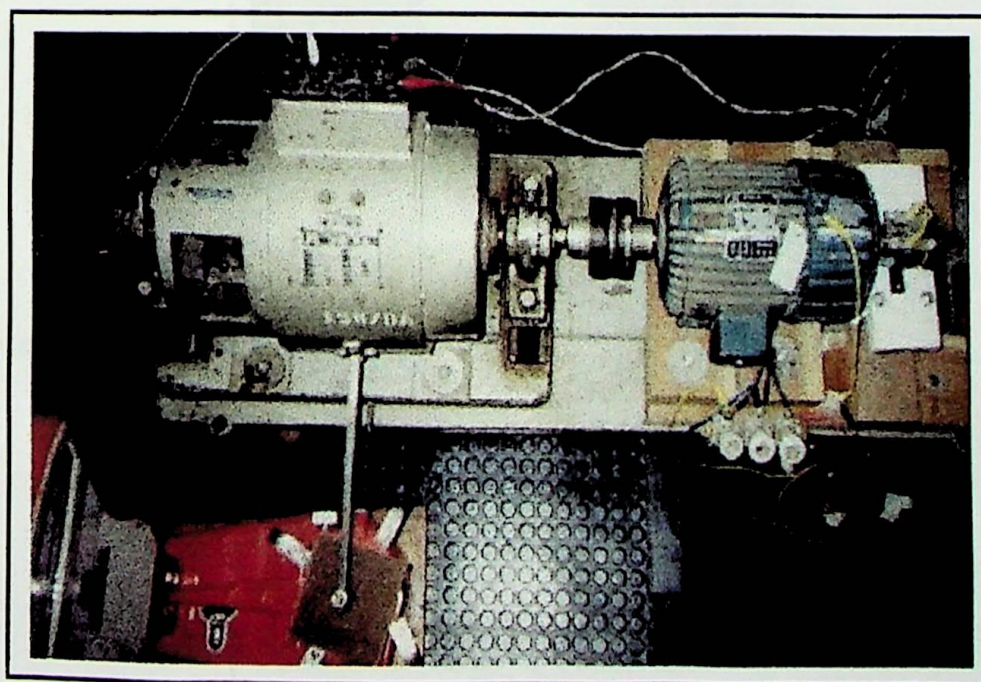


Foto 8: GCC/MIT com rotor em gaiola

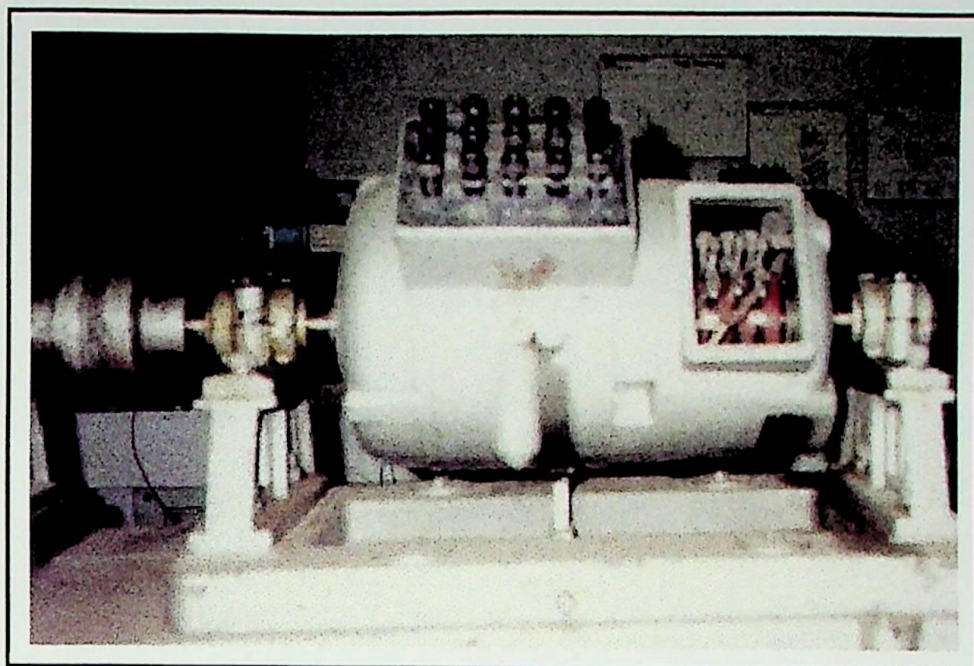


Foto 9: Visão do MIT com rotor bobinado

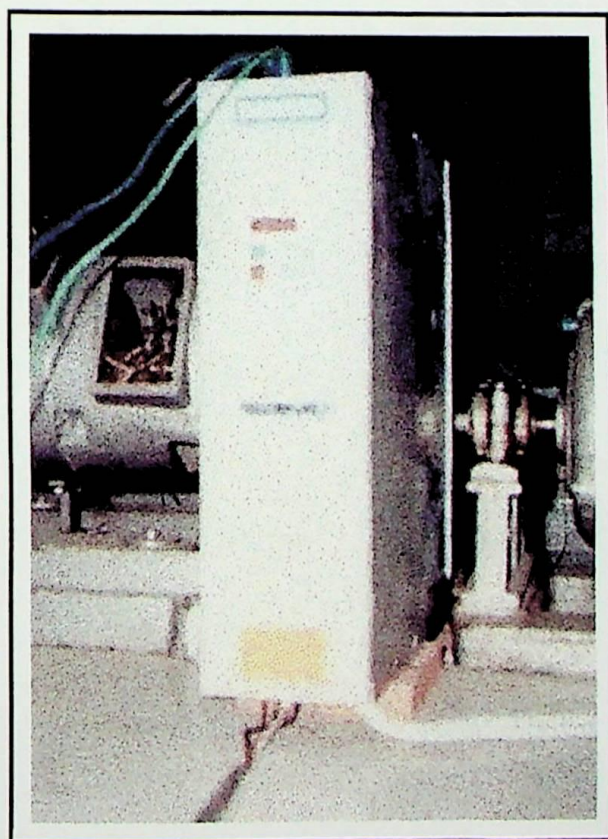


Foto 10: Inversor PWM