

U



C

Válter Miguel Monteiro Liberado

# Comportamento de motores eléctricos com accionamentos electrónicos e com perturbações da qualidade de energia

Julho 2013

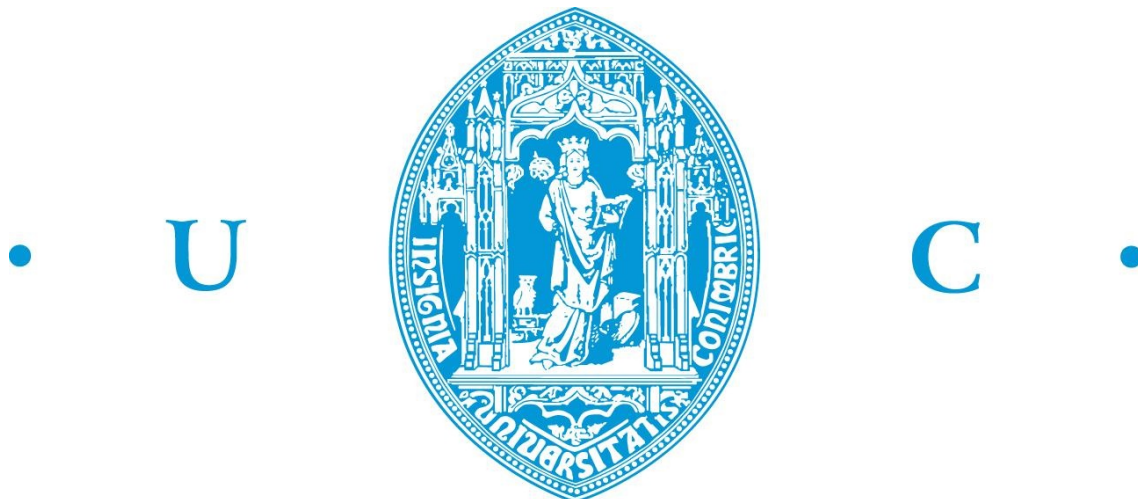
• U



C •

UNIVERSIDADE DE COIMBRA





Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

# **Comportamento de motores eléctricos com accionamentos electrónicos e com perturbações da qualidade de energia**

Válter Miguel Monteiro Liberado

Júri:

Professor Doutor Mário Gonçalo Mestre Veríssimo Silveirinha (Presidente)

Professor Doutor Aníbal Traça de Almeida (Orientador)

Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira (Co-orientador)

Professor Doutor António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra (Vogal)

Coimbra 2013



## Agradecimentos

*Ao longo destes 5 anos de curso e particularmente no desenvolvimento deste trabalho, bons momentos ficarão na memória. Apesar de todas as dificuldades, muitas foram as pessoas que contribuíram para o meu sucesso profissional e pessoal.*

*Primeiramente, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Aníbal Traça de Almeida, pela confiança transmitida e por me ter proporcionado excelentes condições para o desenvolvimento de todo o trabalho. Agradeço também pela participação no âmbito do projeto em parceria com a ABB, onde tive a oportunidade de desenvolver este trabalho e aprender bastante.*

*Ao Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira pela disponibilidade oferecida na orientação desta dissertação.*

*Ao Engenheiro André Quintino por toda a paciência na minha orientação, especialmente no software da bancada de ensaios bem como, na resolução de problemas detetados na aquisição de dados que contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.*

*Aos colegas do Laboratório de Robótica e Produção Automatizada pelo grande espírito de companheirismo e entreaajuda neste último semestre.*

*A todos os meus amigos de Cantanhede por todo o companheirismo e dedicação demonstraram ao longo de todos os anos de amizade, principalmente nos momentos mais difíceis da minha vida. Agradeço também aos meus colegas que conheci no DEEC, pois foram os meus companheiros nos últimos 5 anos. Com eles passei os momentos mais importantes e felizes da minha vida académica.*

*Com muito carinho agradeço à minha família, principalmente à minha irmã e aos meus pais, por toda a força e incentivo nesta importante etapa e por estarem presentes nos momentos mais felizes da minha vida.*



## Resumo

Os motores elétricos em aplicações industriais são responsáveis pelo consumo de 40% da energia elétrica produzida mundialmente. Na Europa, representam 70% do consumo da indústria. No setor terciário, os motores consomem 1/3 do consumo total de energia.

Os motores elétricos são responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica. O sistema não é composto apenas pelo motor elétrico. O sistema completo integra, normalmente, uma fonte de energia, um motor elétrico, a transmissão mecânica, a carga mecânica e por vezes um variador eletrônico de velocidade.

Os motores elétricos podem ser utilizados numa elevada gama de aplicações. O seu desenvolvimento e aumento de performance é um aspeto fundamental, pois o aumento de eficiência vai permitir uma redução quer no consumo de energia elétrica quer nas emissões de CO<sub>2</sub> que lhe estão associadas.

A introdução no mercado de motores de alta eficiência em muito se deve a normas IEC que divulgam a performance, classificação de eficiência e limites mínimos de outros parâmetros dos motores e credibilizam as características indicadas pelo fabricante.

A eficiência do motor de indução IE3 e do motor síncrono de relutância IE4 testados nesta dissertação de mestrado é medida usando o método direto e pela segregação das perdas de acordo com as normas IEC 60034-2-1 e 60034-2-3.

A introdução de dispositivos eletrónicos e a degradação da qualidade de energia afeta significativamente a eficiência e tempo de vida útil dos motores.

É apresentada uma análise comparativa entre o motor de indução e o motor síncrono de relutância para várias aplicações e a influência do VSD na vida útil dos motores.

**Palavras-chave:** Motor de indução, Motor síncrono de relutância, VSD, Eficiência, Segregação de Perdas, Normas IEC 60034-2-1/-2-3





## Abstract

Electric motors in industrial applications are responsible for the consumption of 40% of the electricity produced worldwide. In Europe, represent 70% of industrial consumption. In the tertiary sector, the engines consume 1/3 of the total energy consumption.

Electric motors are responsible for the conversion of electrical energy into mechanical energy. The system is not only composed by the electric motor. The complete system includes typically a power source, an electric motor, a mechanical transmission, the mechanical load and sometimes an variable-speed drive (VSD).

The electric motors may be used in a high range of applications. The development and performance improvement is the key, because the increased efficiency will allow a reduction in electricity consumption and CO<sub>2</sub> emissions.

The market introduction of high-efficiency motors is greatly due to the IEC that disclose the performance, efficiency rating and minimum limits of other motor parameters and give credibility to the characteristics specified by the manufacturer.

The efficiency of induction motor IE3 and IE4 reluctance synchronous motor tested on this MsC thesis are measured using the direct method and the segregation of losses from the standards IEC 60034-2-1 and 60034-2-3.

The introduction of electronic devices and degradation of quality of energy significantly affects the efficiency and useful life of the motors.

A comparative analysis between the induction motor and synchronous reluctance motor is presented for various applications and the influence of VSD in the life of motors.

**Keywords:** Induction motor, Synchronous reluctance motor, VSD, Efficiency, Segregation of Losses, IEC 60034-2-1/-2-3



# Índice

Lista de Figuras .....	v
Lista de tabelas.....	viii
Lista de Símbolos e Abreviaturas .....	ix
Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação e Objetivos da Tese .....	5
1.3 Organização da Tese.....	6
Capítulo 2 .....	7
Bancada de Ensaios .....	7
2.1 Alimentação da Bancada de ensaios .....	9
Capítulo 3 .....	10
Motores Elétricos e Conversor .....	10
3.1 Motor de Indução Trifásico .....	10
3.2 Motor síncrono de relutância.....	13
3.3 Conversor ACS850-04.....	17
Capítulo 4 .....	20
Norma IEC 60034.....	20
4.1 IEC 60034-30.....	20
4.1 Aplicação da Norma IEC 60034-2-1 ao Motor de Indução.....	21
4.2 Aplicação da Norma IEC 60034-2-1 ao Motor de Síncrono de Relutância.....	26
4.3 Aplicação da Norma IEC 60034-2-3 ao Motor de Indução.....	27
Capítulo 5 .....	31
Resultados experimentais .....	31
5.1 Ensaio de Rendimento ao motor de indução e ao motor síncrono de relutância segundo a Norma IEC 60034-2-1 .....	31

5.1.1	Aplicação do Método Direto ao Motor de Indução e ao Motor Síncrono de Relutância .....	31
5.1.2	Aplicação do Método Indireto ao Motor de Indução.....	31
5.2	Ensaio de Rendimento ao Motor de Indução segundo a Norma IEC 60034-2-3 .....	33
5.3	Ensaio de rendimento do Motor de Indução e do Motor Síncrono de relutância com o conversor em regime de velocidade variável.....	34
5.4	Análise da influência dos harmônicos .....	37
5.5	Sensibilidade do motor a diferentes níveis de tensão de alimentação no Motor de Indução ..	42
5.5.1	Rendimento e Fator de potência do Motor de indução com a tensão de alimentação 380V, 400V e 420V .....	42
5.5.2	Rendimento e Fator de potência do Motor de indução com a tensão de alimentação 200V e 220V.....	42
Capítulo 6	.....	43
Discussão de Resultados	.....	43
Capítulo 7	.....	49
Conclusão e Propostas de Trabalho Futuro	.....	49
7.1	Conclusões.....	49
7.2	Propostas de Trabalho Futuro .....	50
Bibliografia.....		51
Anexo A1 – Bancada de Ensaios.....		53
Anexo A2 – Estrutura metálica com os motores montados.....		54

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Descrição do sistema completo .....	1
Figura 1.2 - Categorias dos motores elétricos .....	2
Figura 1.3 - Esquema do sistema composto por um motor alimentado por um conversor de frequência .....	3
Figura 2.1 - Diagrama da Bancada de Ensaios.....	8
Figura 2.2 - Esquema do Sistema de alimentação (transformador e auto-transformador).....	9
Figura 3.1 - Rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado.....	11
Figura 3.2 - – Curvas de binário-velocidade para motores de indução com diferentes configurações no rotor .....	12
Figura 3.3 - Chapa de caraterísticas e foto do motor de indução da ABB .....	12
Figura 3.4 - Caraterística binário-velocidade do motor de indução standard, motor de indução de alta eficiência e motor síncrono .....	14
Figura 3.5 – a) Eixos d e q do rotor do motor síncrono de relutância; b) Princípio de funcionamento do rotor e da criação de binário no motor síncrono de relutância .....	15
Figura 3.6 - Chapa de caraterísticas e foto do motor síncrono de relutância .....	16
Figura 3.7 - Esquema do sistema composto por um motor alimentado por um conversor de frequência.....	17
Figura 3.8 - Característica da carga: a) carga variável; b) carga com binário constante; c) carga com potência constante .....	18
Figura 3.9 - Chapa de Características e foto do Conversor ACS850-04.....	19
Figura 4.1 - Limites mínimos de eficiência dos motores de indução IE1, IE2, IE3 e IE4 com potência nominal 0,12-250KW,50Hz e tetrapolares .....	20
Figura 4.2 - Método das perdas residuais segundo a Norma IEC 60034-2-1 .....	25
Figura 4.3 - Segregação de perdas de acordo com a potência nominal do motor de indução .....	26
Figura 4.4 - Perdas totais do motor de indução e do conjunto motor de indução com o conversor de acordo com a potência nominal do motor .....	27
Figura 5.1 - Eficiência do motor de acordo com a variação da carga: a) motor de indução; b) motor síncrono de relutância .....	31
Figura 5.2 - Dados experimentais da determinação das perdas: a) Perdas por atrito e ventilação à velocidade síncrona ( $P_{fw0}$ ); b) Perdas no ferro; c) Perdas Residuais; .....	32

Figura 5.3 - a) Rendimento do motor de indução pelo método indireto; b) Análise comparativa do rendimento do motor de indução com o método direto e indireto .....	32
Figura 5.4 - a) Segregação de perdas do motor de indução segundo o método 2-1-1B; b) Segregação de perdas no motor síncrono de relutância segundo o método 2-1-1B.....	33
Figura 5.5 - Eficiência para várias velocidades em função da variação de carga: a) Eficiência do sistema global; b) Eficiência do motor; c) Eficiência do VSD. ....	34
Figura 5.6 - Eficiência global, do motor síncrono de relutância e do variador em função da variação de carga.....	35
Figura 5.7 a) Eficiência global, do motor de indução e do variador quando a carga tem característica de ventilador; b) Eficiência global, do motor de síncrono de relutância e do variador quando a carga tem característica de ventilador; .....	36
Figura 5.8 Comparação do fator de potência antes e depois do VSD quando o motor utilizado é: a) motor de indução; b) motor síncrono de relutância .....	36
Figura 5.9 - Formas de onda de corrente com o motor de indução: a) À entrada do conversor; b) À saída do conversor. ....	37
Figura 5.10 - Formas de onda de corrente com o motor síncrono de relutância: a) À entrada do conversor; b) À saída do conversor.....	37
Figura 5.11 - Distorção harmónica antes do conversor e antes do motor de indução: a) Distorção harmónica da tensão; b) Distorção harmónica da corrente. ....	38
Figura 5.12 - Distorção harmónica antes do conversor e antes do motor síncrono de relutância: a) Distorção harmónica da tensão; b) Distorção harmónica da corrente.....	38
Figura 5.13 - Harmónicos de tensão com o motor de indução: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor. ....	39
Figura 5.14 - Harmónicos de corrente com o motor de indução: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.....	39
Figura 5.15 - Harmónicos de tensão com o motor de síncrono de relutância: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.....	40
Figura 5.16 - Harmónicos de corrente com o motor síncrono de relutância: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.....	40
Figura 5.17 - Perdas segregadas do motor quando é alimentado por fonte sinusoidal e quando é alimentado por um conversor.....	41
Figura 5.18 - Temperatura dos enrolamentos estáticos quando o motor de indução quando é alimentado por fonte sinusoidal e quando é alimentado por um conversor .....	41

Figura 5.19 - a) Eficiência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (380V, 400V e 420V) em função da variação da carga; b) Fator de Potência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (380V, 400V e 420V) em função da variação da carga.....42

Figura 5.20 - a) Eficiência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (200, 220V) em função da variação da carga; b) Fator de Potência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (200V, 220V) em função da variação da carga.....42

## Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Principais Normas IEC.....	4
Tabela 4.1 - Precisão de Instrumentação segundo a Norma IEC 60034-2-1.....	21
Tabela 4.2 - Ordem dos harmônicos, sentido de rotação e frequência.....	28
Tabela 5.1 - Dados mais relevantes segundo a norma IEC60043-2-3.....	33
Tabela 6.1 - Dados mais relevantes dos ensaios realizados.....	47



## Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\eta$	Rendimento (%)
$P_{ele}$	Potência Elétrica (W)
$P_{mec}$	Potência mecânica (W)
$n$	Velocidade (rpm)
$n_{sync}$	Velocidade de sincronismo (rpm)
$n_m$	Velocidade do motor a uma dada carga (rpm)
$n_n$	Velocidade do motor à carga nominal (rpm)
$p$	Número par de pólos do motor
$P_{fe}$	Perdas no ferro (W)
$P_{fw}$	Perdas por atrito e ventilação à frequência nominal (W)
$P_{fw0}$	Perdas por atrito e ventilação à velocidade síncrona (W)
$P_k$	Perdas constantes (W)
$P_{kC}$	Perdas constantes no teste com o conversor (W)
$P_o$	Potência em vazio (W)
$K_\theta$	Fator de correção
$P_s$	Perdas estatóricas por efeito de Joule (W)
$P_{s\theta}$	Perdas estatóricas por efeito de Joule corretas (W)
$P_{sC}$	Perdas estatóricas por efeito de Joule no teste com o conversor (W)
$P_r$	Perdas rotóricas por efeito de Joule (W)
$P_{r\theta}$	Perdas rotóricas por efeito de Joule corretas (W)
$P_{rC}$	Perdas rotóricas por efeito de Joule no teste com o conversor (W)

$P_{LL}$	Perdas adicionais (W)
$P_{LLC}$	Perdas adicionais no teste com o conversor (W)
$P_{HL}$	Perdas totais harmónicas (W)
$P_{HL\ No\ Load}$	Perdas constantes harmónicas (W)
$P_{HL\ load}$	Perdas harmónicas que variam com a carga (W)
$P_{Lr}$	Perdas residuais (W)
$P_{LrC}$	Perdas residuais no teste com o conversor (W)
$P$	Potência (W)
$P_n$	Potência nominal do motor (W)
$P_1$	Potência eléctrica de entrada do motor (W)
$P_{1\theta}$	Potência eléctrica de entrada do motor correta (W)
$P_T$	Perdas totais (W)
$P_{Tsin}$	Perdas totais no teste com a alimentação sinusoidal (W)
$P_{T\ test-converter}$	Perdas totais no teste com o conversor (W)
$U_n$	Tensão nominal do motor (V)
$I_n$	Corrente nominal do motor (A)
$R$	Resistência fase-fase do estator ( $\Omega$ )
$T$	Binário do motor (Nm)
$T_n$	Binário Nominal do motor (Nm)
VSD	Variable-Speed Drive
PWM	Pulse-width Modulation
$f$	Frequência (Hz)
$f_n$	Frequência nominal do motor (Hz)

$f_{sw}$	Frequência de comutação (Hz)
$f_{se}$	Frequência dos enrolamentos estatóricos (Hz)
$s$	Deslizamento do motor
THD	Distorção total harmónica (%)
THD <sub>v</sub>	Distorção total harmónica da tensão (%)
THD <sub>i</sub>	Distorção total harmónica da corrente (%)
$\Theta_w$	Temperatura dos enrolamentos estatóricos (°C)
$\Theta_{amb}$	Temperatura ambiente (°C)

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Os motores elétricos são responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica. O sistema completo integra, normalmente, uma fonte de energia, um motor elétrico, a transmissão mecânica, a carga mecânica e por vezes um VSD.

A eficiência de todo o sistema depende da eficiência do motor, da estratégia de controlo de velocidade, do dimensionamento do motor, da qualidade de energia elétrica usada para alimentar o sistema, das perdas na transmissão mecânica e da eficiência do VSD [1] [3].

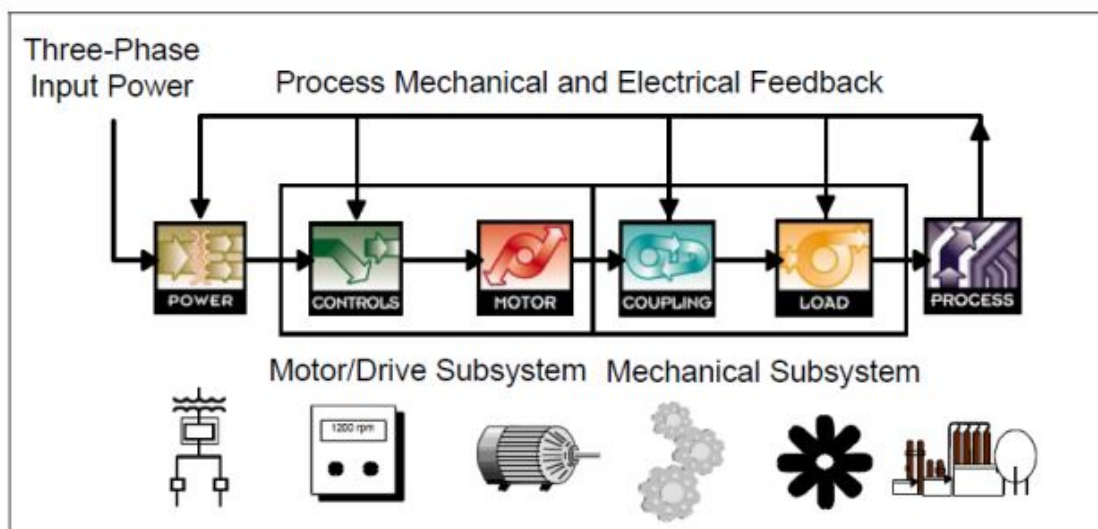


Figura 1.1 - Descrição do sistema completo [4]

A sua elevada gama de aplicações torna interessante o seu estudo e otimização. Motores de alta eficiência podem levar a grandes poupanças no consumo mundial de energia, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub>.

A adoção de motores de alta eficiência é limitada pelo custo inicial elevado e desconhecimento do seu potencial económico. A investigação em novas tecnologias, a otimização da qualidade de energia fornecida ao motor e os estudos académicos têm sido bastante importantes para simular o

funcionamento destes motores em regime permanente e tornar mais fácil a integração destes produtos no mercado, que apresentam um potencial energético enorme [4].

Neste momento, o motor de indução de rotor em gaiola de esquilo é um dos motores mais utilizados pela indústria pois apresenta grande robustez, baixo custo, elevado rendimento e custo de manutenção menor [5] [7].

Por vezes, é necessária a introdução de sistemas eletrónicos que possibilitam o uso do motor elétrico para uma variedade de aplicações maiores, como por exemplo, para ventiladores em que o binário é proporcional ao quadrado da velocidade, para elevadores em que o binário tem de ser constante, para aplicações com várias velocidades fixas ou para situações em que a carga é bastante inferior à carga nominal do motor e permite obter uma performance global bastante melhor.

Na maioria dos casos, o motor de indução é utilizado em aplicações de velocidade constante. As técnicas para alterar a velocidade, como por exemplo, comutadores de pólos e ajuste da tensão de alimentação do motor de indução, são pouco eficientes e permitem uma gama baixa de velocidades [3].

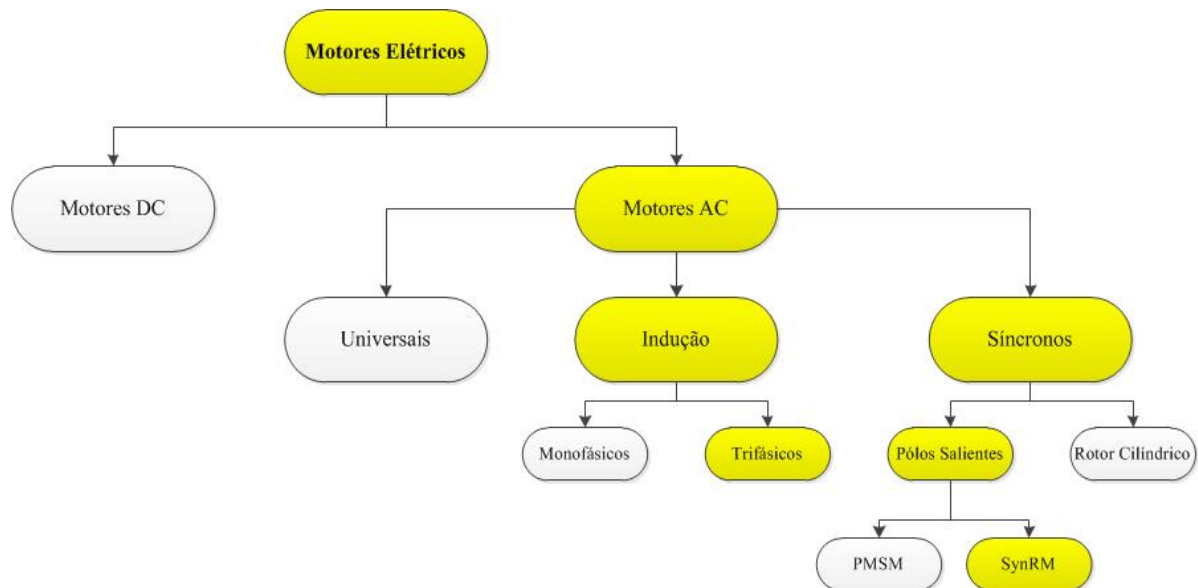


Figura 1.2 - Categorias dos motores elétricos [5]

O motor síncrono apresenta uma grande robustez, simplicidade construtiva e fiabilidade. Face ao desenvolvimento tecnológico, estes dois tipos de motores associados a VSD apresentam as mesmas facilidades de controlo de binário e velocidade apresentadas pelas máquinas DC muito usadas no passado.

Neste momento, os motores DC estão a ser substituídos por motores AC associados a VSD porque para a mesma gama de potência o custo inicial é bastante mais elevado e apresenta uma eficiência global menor [5].

A utilização do motor de indução em aplicações de velocidade variável não foi muito aceite até este momento, uma vez que é necessário um conversor de electrónica de velocidade para controlar a velocidade do motor. Este dispositivo aumenta bastante o custo inicial de todo o equipamento, mas ainda assim é menor do que os motores DC e têm um menor custo de manutenção.

A maior vantagem dos motores AC é a eliminação das escovas, que prejudicam bastante o rendimento global do sistema, agravam o custo de manutenção e enfraquecem a construção e robustez do equipamento [7].

Com o avançar do tempo e da evolução da tecnologia, os VSD (incorporando inversores por fonte de tensão PWM) tornam-se cada vez mais baratos e mais atractivos, pois permitem o uso do motor de indução para várias velocidades e apresentam elevado rendimento [3].

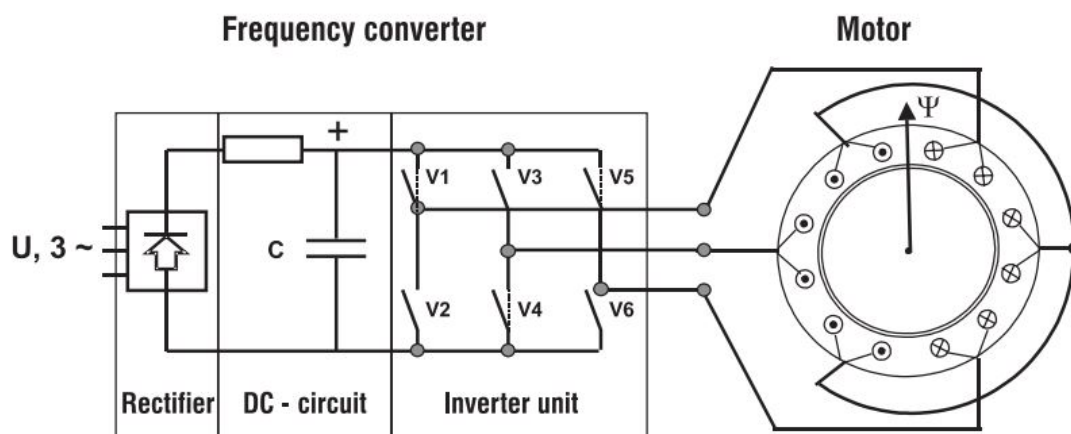


Figura 1.3 - Esquema do sistema composto por um motor alimentado por um conversor de frequência [7]

Na indústria, na maioria dos casos, o consumo anual de eletricidade do motor corresponde a cerca de 5-10 vezes o seu custo inicial. Tendo em conta que o período de vida útil do motor é de cerca de 12 a 20 anos, o consumo do motor no seu período de vida útil é de 60 a 200 vezes o seu custo inicial [4].

A penetração no mercado de motores de alta eficiência em muito se deve às normas IEC que divulgam a performance, classificação de eficiência e limites mínimos de outros parâmetros dos motores e credibilizam as características indicadas pelo fabricante [2].

Devido à necessidade de reduzir o consumo mundial de energia foram publicadas normas IEC que divulgam a eficiência e performance dos motores elétricos, como podemos ver na tabela 1 [8] [9] [10] [11].

**Tabela 1.1 - Principais Normas IEC**

<b>Norma IEC</b>	<b>Aplicação</b>
IEC 60034-1, Rating and Performance, Ed.12 2010	Guia técnico geral de Máquinas Elétricas
IEC 60034-2-1, Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), Ed.1 2007  Estabelece métodos de determinação de eficiência e de perdas específicas	Máquinas DC e máquinas AC síncronas e de indução abrangidas pela norma IEC 60034-1
IEC 60034-2-3, Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors, Ed.1 2011	Motores alimentados por conversores
IEC 60034-30, Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage induction motors, Ed.1 2008	Motores de indução com potência 0.75-375 kW, 2,4 e 6 pólos, 50 e 60 Hz
IEC 60034-31, Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guide, Ed.1 2010  Fornece um guia técnico da escolha mais adequada dos componentes do sistema para determinada aplicação	Motores abrangidos pela Norma IEC 60034-30 e conversores

Quando o motor é alimentado por um conversor de frequência é necessário realizar testes de determinação das perdas do motor baseados na norma 60034-2-1B e testes de determinação das perdas adicionais com base na norma 60034-2-3 que irão ser explicados em detalhe mais à frente.

A maioria dos sistemas electromecânicos na indústria opera com carga variável. Em situações em que o motor está sobredimensionado o VSD melhora bastante a eficiência global do sistema, pois possibilita que o motor funcione em condições ideais para determinada velocidade ou binário de carga [4].

Apesar de todas as vantagens apresentadas associadas à utilização de VSD é necessário fazer o estudo do impacto deste dispositivo na vida útil do motor e no rendimento global do sistema.

## **1.2 Motivação e Objetivos da Tese**

O principal objetivo da tese é fazer a análise comparativa da influência de dispositivos eletrônicos e perturbações na qualidade de energia num motor de indução IE3 de 11 kW e num motor síncrono de relutância IE4, também de 11 kW. Estes motores desenrolam um papel bastante importante na indústria pois apresentam um custo inicial elevado, o seu tempo de funcionamento é bastante elevado e a sua análise detalhada pode ser sinónimo de grandes poupanças em toda a indústria. São motores relativamente recentes, sendo necessário fazer o estudo detalhado para que sejam integrados no mercado mais facilmente e sejam aceites e reconhecidos pela indústria.

Os aspetos mais relevantes neste estudo são o rendimento, fator de potência, distorção harmónica dos dois motores e do sistema global para melhorar a eficiência e fiabilidade em estado permanente.



### 1.3 Organização da Tese

A tese é dividida em 6 capítulos. No capítulo 1 é feito o enquadramento teórico da dissertação. No segundo capítulo é feita a apresentação da bancada de ensaios e metodologias de aquisição de dados. No capítulo 3 é feita a análise em detalhe de todos os componentes do sistema elétrico. No capítulo 4 são explicadas as normas IEC 60034-2-1 e 60034-2-3 e apresentados os resultados práticos dos ensaios feitos ao motor de indução e ao motor síncrono de relutância. No capítulo 5 são apresentados os resultados práticos dos testes ao motor de indução, ao motor síncrono de relutância e ao conversor em regime permanente à carga nominal e para várias velocidades e vários pontos de carga. Além disso é analisada a distorção harmónica nos testes anteriormente referidos e a sensibilidade do motor de indução a diferentes níveis de tensão de alimentação. No capítulo 6 são discutidos os resultados práticos. O motor síncrono de relutância apresenta algumas limitações de aplicações pois apenas funciona quando é alimentado por um VSD. Além disso, o conversor tem muitos parâmetros que não são acessíveis e que não permitem a realização de todos os testes desejados.

## Capítulo 2

### Bancada de Ensaios

Para ter um profundo conhecimento do comportamento dos motores elétricos é necessária uma bancada de ensaios de elevada precisão.

O arranjo laboratorial usado nos ensaios obedece aos requisitos impostos pela norma IEC 60034-2-1. As medições da tensão, corrente, fator de potência, potência ativa, potência reativa, potência mecânica, harmônicos, distorção total harmônica, frequência, velocidade e binário são realizadas por um analisador de potência de elevada precisão (YOKOGAWA WT 1806) com seis módulos de tensão e corrente. A carga do sistema é imposta por um conversor SIEMENS que permite controlar o motor SEW, impondo um binário controlado no PC via LabView e um sistema de aquisição de dados em tempo real, NI cRIO 9074. Este integra um encoder ótico (OMRON E6A2-CW3C) com 200 pulsos por revolução para medir a velocidade e um sensor de binário até 150 N.m (Datum M420-S2) para medir o binário. A existência de um autotransformador e um transformador elevador, permite ainda uma tensão variável entre 0 V e 480 V de tensão composta na bancada de ensaios. Foi testado o motor de indução com o rotor em gaiola de esquilo da marca ABB, 4 pólos, com potência nominal de 11 kW (400 V) e o motor síncrono de relutância da marca ABB, 4 pólos, com potência nominal de 11 kW (370 V). Foi ainda utilizado o variador eletrónico de velocidade com inversor por fonte de tensão PWM, também da marca ABB (ACS850-04), com potência nominal de 22 kW, seleccionado para funcionar com a frequência de comutação 4 kHz para ambos os motores.

A bancada de ensaios tem o seguinte equipamento:

- Motor de indução SEW de 15 kW (carga);
- Conversor Siemens Sinamics Power Module de 18.5 kW;
- Motor de indução ABB de 11 kW IE3;
- Motor síncrono de relutância ABB de 11 kW IE4;
- Variador Eletrónico de Velocidade ABB ACS850-04 de 22 kW;
- Sensor de binário Datum M420 S2 ( $\pm 150$ N.m);

- Encoder ótico OMRON E6A2-CW3C (200 pulsos por revolução);
- NI cRIO-9074;
- Módulo de entradas analógicas NI-9215;
- Módulo de saídas analógicas NI-9263;
- Módulo de entradas e saídas digitais NI-9401;
- Auto-transformador (Smile slidac, 380V, 30A, 19,7 kVA);
- Transformador trifásico SEB elevador (400V).

A estrutura em alumínio desenvolvida permite que os dois motores se acoplem. É robusta e permite colocar qualquer motor até 15 kW na extremidade com um *frame size* até 160L. Entre os dois motores está o sensor de binário e atrás do motor de carga um encoder ótico para determinar a velocidade do sistema.

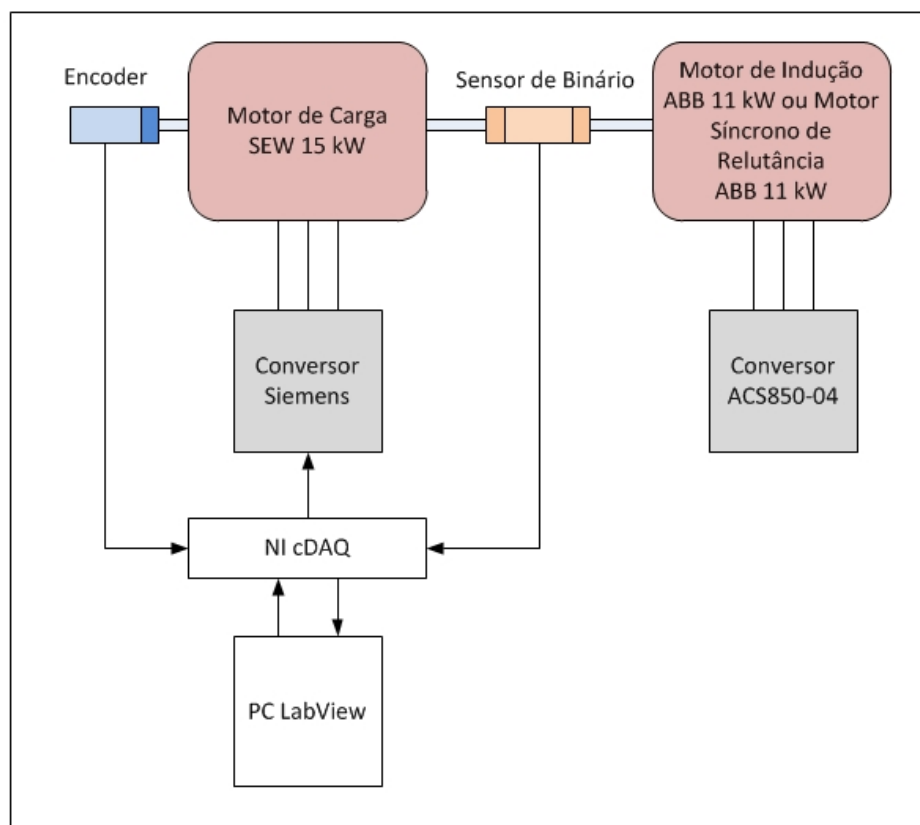


Figura 2.1 - Diagrama da Bancada de Ensaio

## 2.1 Alimentação da Bancada de ensaios

Foi utilizado um auto-transformador Slidac com a tensão de saída a variar entre 0 e 380V e um transformador de elevação com a tensão de saída de 100V, como podemos ver no esquema abaixo:

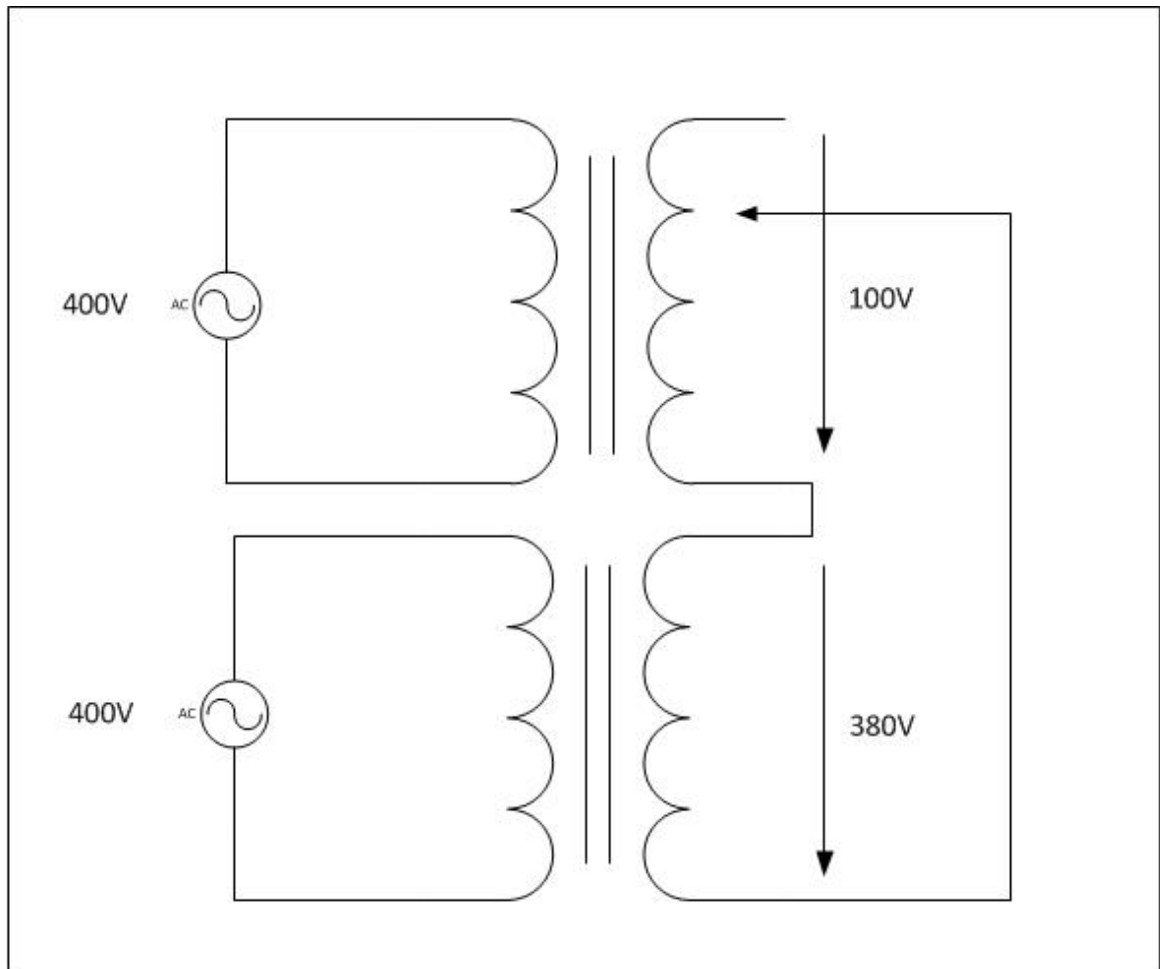


Figura 2.2 - Esquema do Sistema de alimentação (transformador e auto-transformador)

## Capítulo 3

### Motores Elétricos e Conversor

#### 3.1 Motor de Indução Trifásico

O motor de indução é dos motores mais utilizados na indústria pela sua simplicidade, grande aceitação no mercado, fiabilidade e eficiência.

O motor de indução é constituído por duas partes: estator e rotor. O estator é a parte fixa e o rotor a parte móvel do motor. O espaço entre o estator e rotor denomina-se entreferro. O estator é formado por chapas finas de aço silício para reduzir ao mínimo as perdas por correntes Foucault e histerese. Estas chapas vão ser introduzidas nos enrolamentos estatóricos para que criem um campo magnético no estator. O rotor tem uma configuração semelhante, mas os enrolamentos são dispostos longitudinalmente [5] [7].

Quando o estator é ligado a uma tensão trifásica, geram-se correntes nos seus enrolamentos que provocam o aparecimento de um campo magnético girante. Na interacção do rotor com o campo magnético girante do estator resulta numa tensão alternada trifásica no rotor. Como os anéis do rotor estão inicialmente curto-circuitados, essa tensão induzida provoca o aparecimento de correntes pelo enrolamento rotórico e, deste modo, produz fluxo magnético no rotor. O fluxo magnético do rotor tenderá a alinhar com o campo magnético girante do estator para produzir binário induzido no rotor. Os motores de indução têm a seguinte classificação quanto ao tipo de rotor: rotor bobinado e rotor em gaiola de esquilo [5].

O motor de indução de rotor em gaiola de esquilo possui barras rotóricas com os anéis terminais curto-circuitados. O motor de indução de rotor bobinado possui enrolamentos trifásicos disponíveis no exterior do rotor através de anéis terminais e escovas. O motor de indução de rotor bobinado é pouco utilizado pois tem mais custos de manutenção, é mais caro, mais pesado. Apenas é utilizado em situações especiais, quando o acesso ao rotor é uma vantagem, como por exemplo em geradores eólicos ou turbinas hidroelétricas. Aumentando a resistência do rotor, o binário máximo mantém-se, a velocidade é menor para o binário máximo, o binário de arranque é mais elevado e a corrente de arranque mais baixa. No motor de indução de rotor em gaiola de esquilo, o rotor tem baixa impedância para velocidades baixas e alta impedância para

velocidades altas para que haja uma boa regulação do binário de arranque e da velocidade.

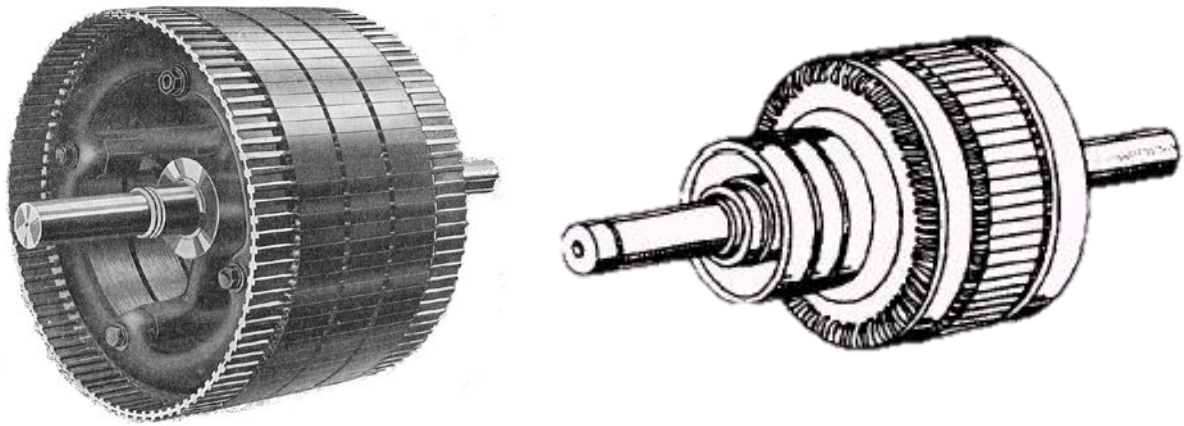


Figura 3.1 - Rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado [5]

O motor de indução opera normalmente próximo da velocidade de sincronismo, funcionando apenas na velocidade de sincronismo quando a carga é nula.

A velocidade de sincronismo é dada pela seguinte expressão:

$$n_{sync} = \frac{60 \times f_{se}}{2p} \quad (1)$$

O deslizamento do motor é dado pela expressão:

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \quad (2)$$

O deslizamento é negativo quando a máquina de indução funciona como gerador e positivo quando a máquina de indução funciona como motor.

Os motores de indução são classificados pela sua característica binário-velocidade quanto à configuração do rotor nas classes de design NEMA da figura 3.2.

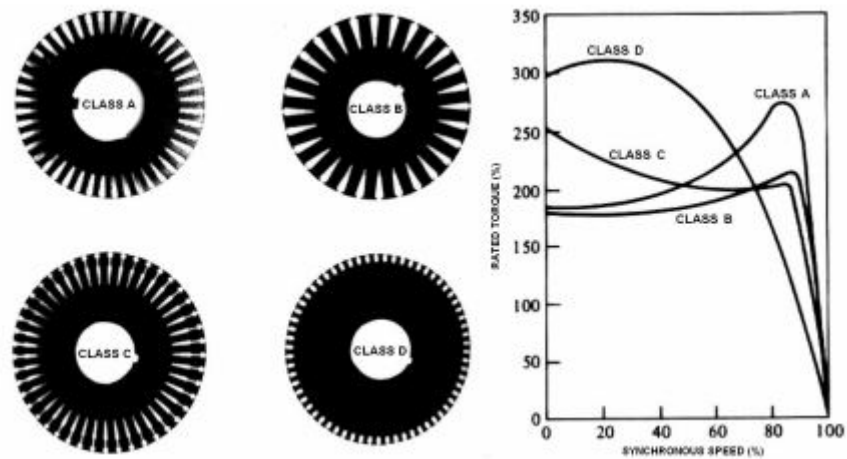


Figura 3.2 - Curvas de binário-velocidade para motores de indução com diferentes configurações no rotor [5]

Foi testado o motor de indução com o rotor em gaiola de esquilo da marca ABB, 4 pólos, com potência nominal de 11 kW (400 V), IE3 com a chapa de caraterísticas da figura 3.3.

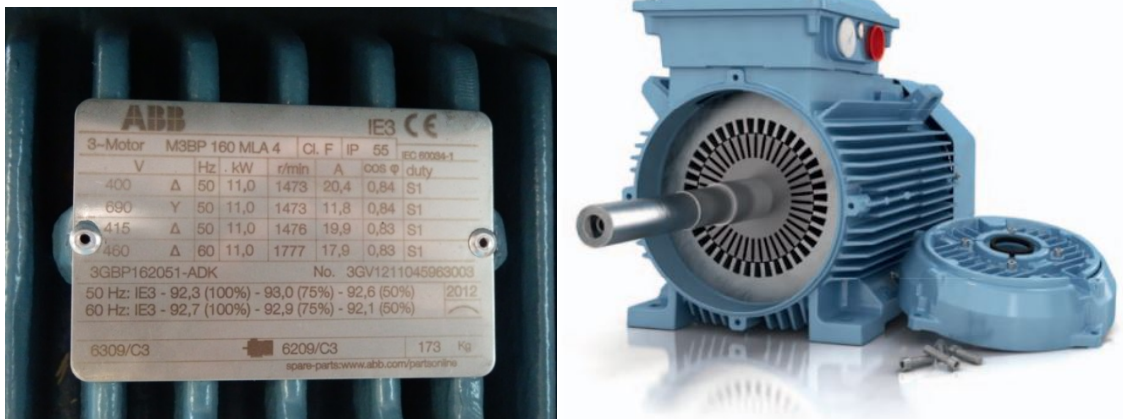


Figura 3.3 - Chapa de caraterísticas e foto do motor de indução da ABB

Os parâmetros mais importantes a retirar são:

- |                     |                            |
|---------------------|----------------------------|
| a) Tipo de motor    | Motor de Indução Trifásico |
| b) Potência Nominal | 11 kW;                     |
| c) Tipo de Ligação  | Triângulo;                 |
| d) Tensão Nominal   | 400 V;                     |
| e) Corrente Nominal | 20,4 A;                    |

- f) Velocidade Nominal 1473 rpm;
- g) Frequência Nominal 50 Hz;
- h) Fator de potência nominal 0,84;
- i) Classe de serviço S1;
- j) Classe de eficiência IE3;
- k) Classe de isolamento térmico F;
- l) IP 55;
- m) Eficiência do motor a 50 Hz para diferentes níveis de carga;
- n) Posição de instalação do motor;
- o) Três sondas de temperatura PT100 em cada um dos enrolamentos do motor;
- p) Uma sonda de temperatura PT100 no rolamento frontal e uma no rolamento traseiro do motor;
- q) Rolamentos *regreasable*.

### 3.2 Motor síncrono de relutância

O motor síncrono em regime permanente síncrono é um motor de corrente alternada cuja velocidade é proporcional à frequência da corrente da sua armadura. O rotor juntamente com o campo magnético criado pela corrente contínua no campo rotórico gira em sincronismo com o campo girante.

Tal como nos motores de indução, os motores síncronos são classificados quanto ao tipo de rotor: rotor cilíndrico e rotor de pólos salientes. Ao contrário do que acontece no motor de indução, o rotor tem enrolamento de excitação ou um circuito de auto-excitação como por exemplo nos LSPM (*Line Start Permanent Magnet*) ou no motor síncrono de relutância. Quando o rotor não tem enrolamento de excitação, as perdas por efeito de joule são menores e já não são necessárias as escovas e anéis coletores [6] [7].



A configuração do rotor em gaiola de esquilo do motor síncrono tem enrolamentos (enrolamentos amortecedores) com barras rotóricas com os anéis terminais curto-circuitados tal como a gaiola rotórica do motor de indução. No motor de indução não é necessária a criação de um campo DC no rotor para que a máquina arranque.

A principal função dos enrolamentos amortecedores é garantir o arranque e estabilidade do motor. Quando o rotor roda a uma velocidade inferior à velocidade de sincronismo, há um movimento relativo entre o rotor e o campo magnético do estator e há tensão induzida nos enrolamentos. A interação entre os dois campos magnéticos produz binário que vai compensar os fenómenos transitórios causados pela variação de carga. Quando o rotor roda a velocidade superior à velocidade de sincronismo vai ser produzido binário que tenta diminuir a velocidade do rotor. A velocidade do rotor irá ser igual à velocidade de sincronismo desde o arranque até às condições nominais de funcionamento. Quando o binário máximo é ultrapassado, o motor síncrono pode perder o sincronismo.

A relação velocidade/ frequência é fixa independente do regime de carga e pode funcionar como compensador de fator de potência em instalações industriais.

A velocidade de rotação do rotor é dada pela seguinte expressão:

$$n_{sync} = \frac{60 \times f_{se}}{2p} \quad (3)$$

A velocidade de funcionamento dos motores síncronos é fixa como podemos ver na figura abaixo:

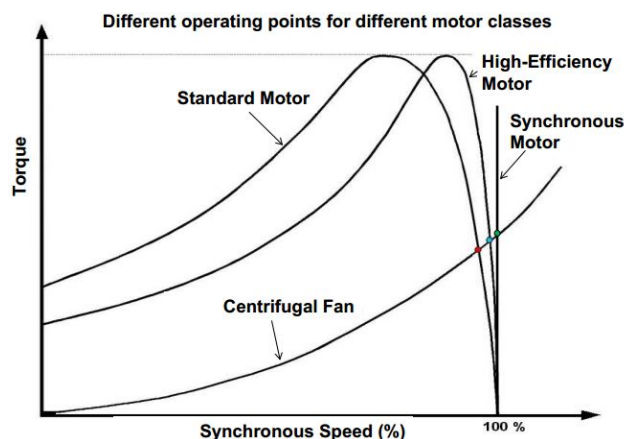


Figura 3.4 - Característica binário-velocidade do motor de indução standard, motor de indução de alta eficiência e motor síncrono [5]

Com o avançar da tecnologia, surgiram novos motores, como por exemplo, o motor de relutância comutável e o motor síncrono de relutância. O mais importante nesta tese será o motor síncrono de relutância. O desenvolvimento deste motor só foi possível com o avançar da tecnologia VEV. O motor síncrono de relutância necessita de um controlador eletrônico para o arranque pois não possui gaiola auxiliar.

O funcionamento deste motor é bastante parecido ao motor de passo. O sistema de relutância baseia-se na variação de relutância com a coordenada de posição do rotor. Embora o conceito seja conhecido há bastante tempo e a sua construção bastante simples, o sistema de controlo é bastante complexo. O baixo custo e o desenvolvimento de controladores eletrónicos tornou o motor síncrono de relutância mais competitivo em relação a outro tipo de motores [12].

Quando se aplica correntes de excitação nos enrolamentos estáticos, é produzido campo magnético no entreferro. O rotor tenta alinhar o eixo d com o campo magnético para reduzir a relutância do circuito magnético. Deste modo, podemos dizer que é produzido binário quando o eixo d do rotor não está alinhado com o campo magnético do entreferro. No eixo d existe alta permeabilidade e, conseqüentemente, alta condutividade magnética e baixa relutância. Enquanto no eixo q existe baixa permeabilidade, baixa condutividade e relutância elevada. A magnitude do campo magnético do entreferro e a velocidade do rotor é controlada pelo conversor. A alta relutância do rotor contribui para que a sua posição seja facilmente detetada [12].

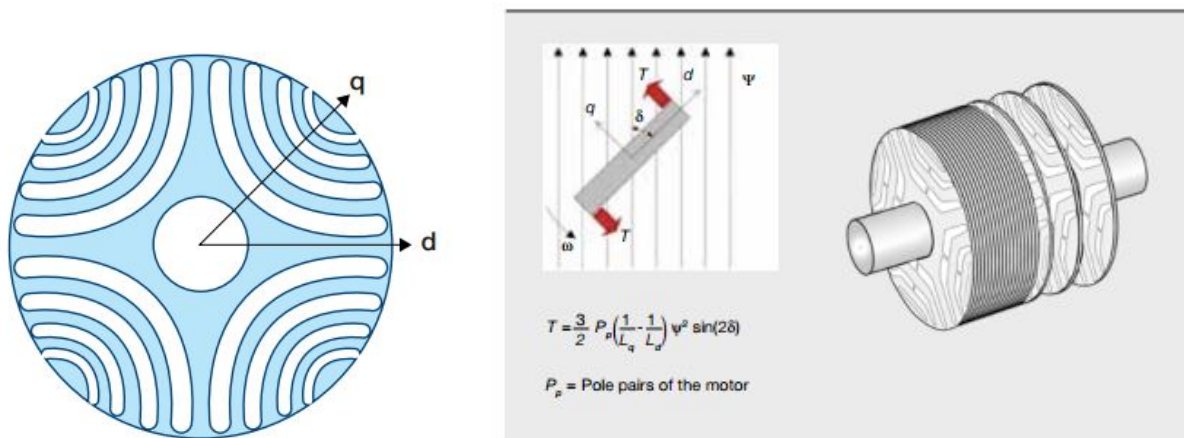


Figura 3.5 - a) Eixos d e q do rotor do motor síncrono de relutância; b) Princípio de funcionamento do rotor e da criação de binário no motor síncrono de relutância [12]

Os motores de passo combinam a geometria de relutância variável com ímãs permanentes para produzirem binário e terem precisão do posicionamento do rotor.

O motor síncrono de relutância não tem ímãs permanentes, máquina auxiliar e também não possui enrolamentos rotóricos. Esta é uma característica especialmente importante no funcionamento em velocidades baixas, pois não possui perdas no rotor. Além disso, torna o motor mais compacto e com boa eficiência. Como a maioria das perdas ocorre no estator, região facilmente refrigerada, há menor necessidade de aumentar o tamanho do motor. Além disso, a ausência de ímãs permanentes diminui o custo inicial [7].

Foi testado o motor síncrono de relutância da marca ABB, 4 pólos, com potência nominal de 11 kW (400 V), IE4 com a chapa de características da figura 3.6.

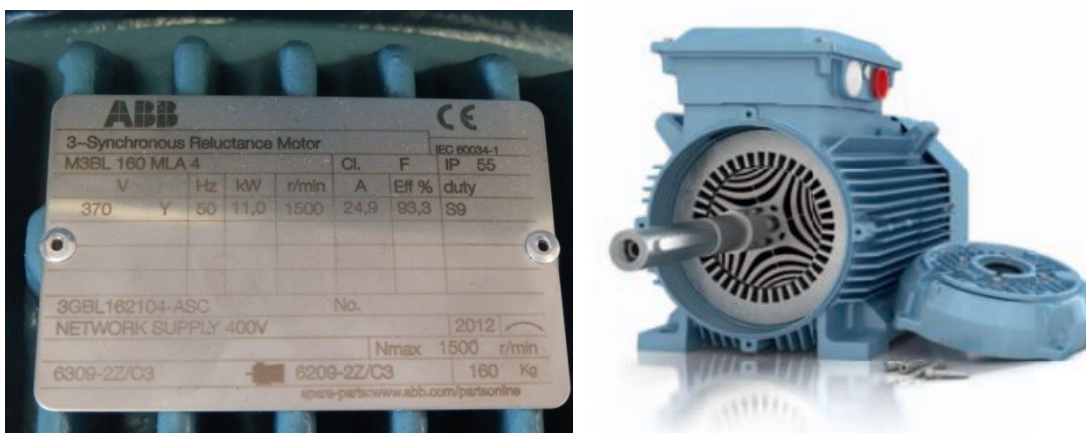


Figura 3.6 - Chapa de características e foto do motor síncrono de relutância

Os parâmetros mais importantes a retirar são:

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| a) Tipo de motor           | Motor Síncrono de Relutância Trifásico |
| b) Potência Nominal        | 11 kW;                                 |
| c) Tipo de Ligação         | Estrela;                               |
| d) Tensão Nominal do Motor | 370 V;                                 |
| e) Corrente Nominal        | 24,9 A;                                |
| f) Velocidade Nominal      | 1500 rpm;                              |
| g) Frequência Nominal      | 50 Hz;                                 |
| h) Classe de serviço       | S9;                                    |

- i) Eficiência nominal 93,3 %;
- j) Classe de temperatura F;
- k) IP 55;
- l) Tensão nominal do conversor 400 V;
- m) Posição de instalação do motor;
- n) Três sondas de temperatura PT100 em cada um dos enrolamentos do motor;
- o) Uma sonda de temperatura PT100 no rolamento frontal e uma no rolamento traseiro do motor;
- p) Rolamentos *sealed and regreled-for-life*.

### 3.3 Conversor ACS850-04

Conversores são dispositivos eletrônicos que convertem potência AC com tensão e frequência fixa em potência elétrica com tensão e frequência variável.

O conversor ACS850-04 tem um inversor por fonte de tensão PWM com frequência de comutação variável como a maioria dos conversores usados na indústria.

Na entrada do conversor existe uma ponte trifásica retificadora que converte potência AC com tensão e frequência fixa e potência DC fixa. De seguida a potência DC é filtrada na bobina, que funciona como fonte de corrente no barramento, e, finalmente, o inversor converte a potência DC em potência AC com tensão e frequência variável [7].

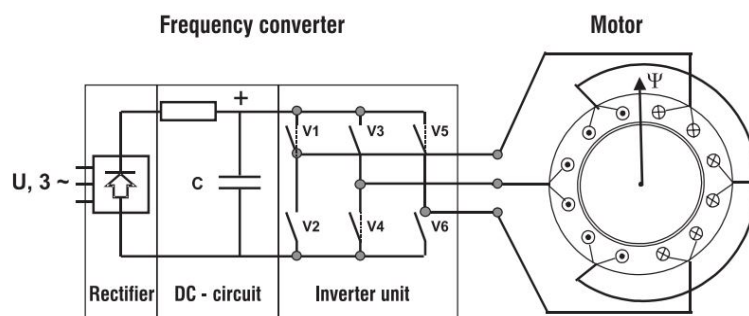


Figura 3.7 - Esquema do sistema composto por um motor alimentado por um conversor de frequência [7]

O VSD torna mais ampla a gama de aplicações do motor de indução e do motor síncrono e apresenta grandes benefícios energéticos. O motor de indução de rotor em gaiola de esquilo e o motor síncrono oferecem excelente fiabilidade, eficiência e são mundialmente aceites, contudo apresentam uma gama muito baixa de velocidades [7].

O conversor permite que o motor funcione a várias velocidades e ajusta da melhor forma a potência entregue à carga de acordo com as necessidades. Ao contrário do que acontece quando a alimentação é feita pela rede, o VSD permite que os motores tenham um arranque suave. Isto evita o aparecimento de correntes de arranque elevadas e reduz o stress do motor e dos componentes do sistema. Apesar de todas as vantagens apresentadas, o conversor adiciona ao sistema harmónicos que vão aumentar as perdas nos cabos por efeito de Joule, ruído e vibração [3].

O controlo de velocidade dos motores oferece potenciais benefícios energéticos na indústria. A maioria dos motores funciona a velocidade fixa. Ajustando a velocidade de acordo com a carga, que geralmente varia no tempo, melhora bastante a eficiência global do sistema. Os potenciais benefícios encontram-se não só no menor consumo de energia, mas também na dispensa de equipamentos de controlo, como por exemplo válvulas que provocam perdas no sistema [13].

Com o avançar da tecnologia, os VSD são um produto dominante nesta área. Os benefícios da sua utilização dependem da característica da carga imposta ao motor, do número de horas de funcionamento, do seu tempo útil de vida, preço, fiabilidade, sistemas de protecção e do preço da energia eléctrica.

A característica da carga pode ser classificada de acordo com a relação binário-velocidade da seguinte maneira: carga variável, carga com binário constante e carga com potência constante.

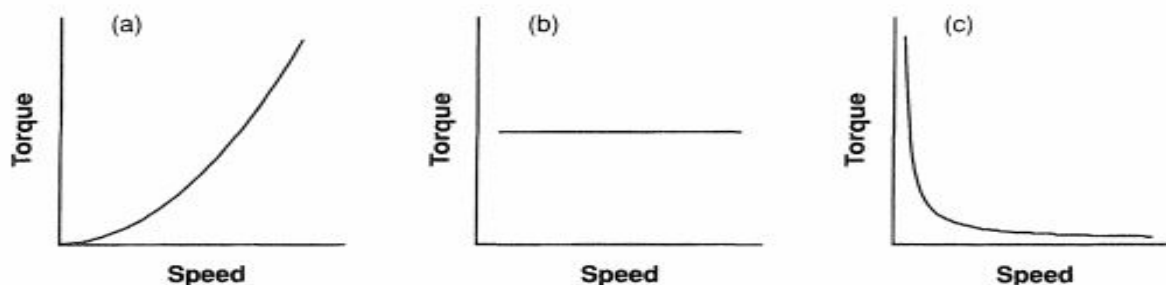


Figura 3.8 - Característica da carga: a) carga variável; b) carga com binário constante; c) carga com potência constante [14]

Nos sistemas com carga variável em que o binário é proporcional ao quadrado da velocidade, a potência elétrica varia com o cubo da velocidade dependendo do fluxo de água existente. O VSD permite ajustar de forma mais suave a potência elétrica para o fluxo desejado e as perdas são menores (ventiladores).

Quando o binário é independente da velocidade o VSD ajusta a velocidade de forma mais suave e permite minimizar a potência necessária. Nas escadas rolantes, a carga é constante e o motor pode produzir o binário máximo a qualquer velocidade.

Há sistemas em que a velocidade e a carga têm pouca variação mas podem beneficiar do VSD para garantir o arranque suave e parar o sistema em segurança. Um arrancador suave tem custos de aquisição menores mas não apresenta os benefícios energéticos do VSD (velocidade fixa).

Foi testado o variador eletrônico de velocidade com inversor por fonte de tensão PWM, da marca ABB (ACS850-04), com potência nominal de 22 kW, seleccionado para funcionar com a frequência de comutação 4kHz, com a chapa de características da figura 3.9.



Figura 3.9 - Chapa de Características e foto do Conversor ACS850-04

## Capítulo 4

### Norma IEC 60034

#### 4.1 IEC 60034-30

A norma IEC60034-30 foi publicada em 2008 para promover os novos motores de alta eficiência. Este standard estabelece os limites mínimos de eficiência baseados na frequência nominal, número de pólos e potência nominal do motor.

Na primeira parte, este standard inclui a classificação de todos os tipos de motores que possam ser alimentados pela rede como por exemplo, os motores de indução monofásicos e trifásicos e motores LSPMSM (*Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*) à sua tensão, velocidade e frequência nominal. Na segunda parte, inclui a classificação dos motores em que é necessário um controlador eletrônico, como por exemplo, a maior parte dos motores síncronos a tensão e frequência variável e à sua velocidade nominal. A primeira parte não abrange os motores que necessitam de um conversor para o seu funcionamento normal. As perdas totais aumentam e, conseqüentemente, eficiência do motor é menor devido aos harmônicos produzidos pelo conversor.

São definidas três classes: *Standard Efficiency* (IE1), *High-Efficiency* (IE2) equivalente à classe *EPAct* e *Premium Efficiency* (IE3) equivalente à classe *NEMA Premium*. Em 2010, foi publicada a segunda edição que já inclui as classes: *Super Premium Efficiency* (IE4) e uma pequena referência à classe *Ultra-Premium Efficiency* (IE5). A classe IE5 irá ser desenvolvida em mais detalhe na próxima edição. O objetivo é reduzir as perdas do IE5 em 20% em relação ao IE4. A tecnologia IE5 ainda não está disponível no mercado.

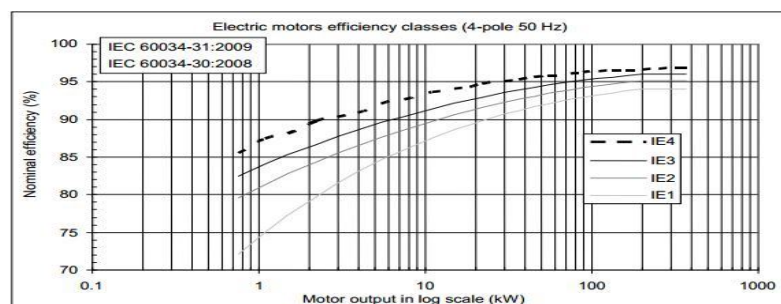


Figura 4.1 - Limites mínimos de eficiência dos motores de indução IE1, IE2, IE3 e IE4 com potência nominal 0,12-250KW,50Hz e tetrapolares [9]

## 4.1 Aplicação da Norma IEC 60034-2-1 ao Motor de Indução

O Standard 60034-2-1 permite determinar a eficiência destes motores com vários métodos e tem também métodos para determinar perdas específicas. Este *standard* aplica-se a todos os motores elétricos abrangidos pela Norma 60034-1.

A precisão de instrumentação é essencial na validação dos resultados experimentais. A norma estabelece limites mínimos de precisão da medição das várias grandezas elétricas e mecânicas, como podemos verificar na tabela abaixo:

Tabela 4.1 - Precisão de Instrumentação segundo a Norma IEC 60034-2-1

Grandezas	Limite mínimo de precisão
Tensão (V)	0.2
Corrente (A)	0.2
Potência (W)	0.2
Binário (N.m)	0.2
Velocidade (rpm)	1
Frequência (Hz)	0.1
Resistência ( $\Omega$ )	0.2
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	1

Contudo, usando equipamentos de medida com a mesma precisão em diferentes laboratórios não pressupõem resultados experimentais iguais. A diferença reside na diferente metodologia de medição e de procedimentos de teste segundo as várias normas existentes e no erro humano.

Irão ser testados o motor de indução e o motor síncrono de relutância segundo a Norma IEC 60034-2-1. O motor síncrono de relutância apresenta algumas limitações e não torna possível a realização de todos os ensaios desejados.



Para o motor de indução trifásico existem dois métodos de determinação de eficiência:

- i. Método 2-1-1A (Método Direto Input-Output)
- ii. Método 2-1-1B (Método Indireto com a segregação das perdas)

No Método Direto, a eficiência é o quociente da potência mecânica disponível útil no veio e da potência elétrica consumida pelo motor. A potência mecânica é determinada pelo sensor de binário e pelo encoder ótico. A potência elétrica do estator é determinada pelo analisador de potência analisador de potência de elevada precisão.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{mec}}{P_{ele}} \quad (4)$$

Este é o método mais simples de determinação de eficiência pois apenas são necessárias duas grandezas. Contudo, é um método menos rigoroso e mais incerto. Isto deve-se ao fato do sensor de binário ter um decréscimo de precisão com a diminuição do binário lido, sendo também facilmente influenciado por vibrações resultantes do sistema de ensaios.

Nesta situação, o motor é testado com vários níveis de carga e deve-se garantir a estabilidade térmica em cada ponto. Quando a temperatura dos enrolamentos do motor varia menos de 2°C por hora o equilíbrio térmico é alcançado. O aumento de temperatura que ocorre durante a operação do motor é devido às perdas que são geradas durante o processo de transformação da energia elétrica em energia mecânica. Estas perdas ocorrem no ferro, no atrito e nos enrolamentos do estator e rotor. Todas estas perdas são convertidas em calor que aquecem o motor de forma desigual. Se a temperatura não fosse dissipada para o meio ambiente a temperatura do motor iria aumentar para valores que poderiam danificar de forma irreversível o mesmo. Após algum tempo de funcionamento, quando a temperatura máxima para um certo valor de carga é atingida e todo o calor gerado pelas perdas é dissipado para o meio ambiente, o motor encontra-se em estabilidade térmica.

O método indireto é o mais preciso e bastante utilizado na indústria. Neste método é necessário calcular todas as perdas separadas: perdas no ferro; perdas por atrito e ventilação; perdas por efeito de joule no estator e rotor, assim como as perdas extraviadas.

Para a determinação de perdas no estator, é necessária a leitura da temperatura dos enrolamentos estáticos através de termopares introduzidos no interior do motor. É feita a leitura da

resistência fase-fase do estator antes de colocar o motor à carga é máxima e depois do teste ao motor em que a carga é mínima.

Através da temperatura é possível fazer uma estimativa da variação da resistência do estator nos vários pontos de carga [2]. Deste modo, a precisão da resistência estatórica é muito maior.

$$R_2 = R_1 \times \frac{\theta_{w2} + 235}{\theta_{w1} + 235} \quad (5)$$

O método indireto é definido pelas seguintes etapas:

1. Medição das resistências e da temperatura dos enrolamentos estatóricos.
2. Teste à carga nominal até o equilíbrio térmico ser alcançado.
3. Teste com vários pontos de carga com ordem descendente (125% a 25% da carga nominal). Este teste deve ser feito o mais rapidamente possível para minimizar a variação de temperatura do motor.
4. Teste em vazio com a tensão de alimentação do motor a variar entre 110% e 20% da tensão nominal do motor. Medição das resistências antes e depois do teste em vazio.

As perdas estatóricas variam com o quadrado da corrente e com a resistência estimada através da variação da temperatura dos enrolamentos. Também poderia fazer-se a leitura das resistências em todos os pontos de carga através do multímetro mas resultaria na diminuição de precisão das medições efetuadas.

$$P_s = 1,5 \times R \times I \quad (6)$$

As perdas constantes são determinadas no ensaio em vazio. As perdas constantes são a soma das perdas no ferro com as perdas por atrito em ventilação. Por norma consideram-se constantes, mas apresentam uma pequena variação no ensaio em carga. As perdas mecânicas diminuem um pouco com o aumento de carga e as perdas por atrito e ventilação aumentam, considerando-se, desta maneira, a soma das duas constante [4].

$$P_k = P_o - P_s = P_{fv} + P_{fe} \quad (7)$$

As perdas por atrito e ventilação são calculadas a partir dos pontos do ensaio em vazio em que a tensão de alimentação do motor varia entre 30% a 60% da tensão nominal. As perdas constantes para cada ponto são a diferença da potência elétrica em vazio com as perdas estatóricas em vazio que é possível obter neste ensaio.

Na figura 4.2, fazendo uma curva das perdas constantes em função da tensão de alimentação ao quadrado e com a extrapolação das perdas constantes para a tensão de alimentação do motor igual a zero obtém-se as perdas por atrito e ventilação à velocidade de sincronismo.

As perdas por atrito e ventilação à carga nominal obtêm-se com a seguinte equação:

$$P_{fw} = P_{fw0} \times (1 - s_n)^{2,5} \quad (8)$$

O deslizamento é dado pela seguinte fórmula:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (9)$$

As perdas no ferro obtém-se a partir dos dados do ensaio em vazio em que a tensão de alimentação varia de 90% a 110% da tensão nominal. Com os dados anteriores, consegue-se obter o valor das perdas no ferro para cada valor de tensão de alimentação do motor. Desprezando a queda de tensão dos enrolamentos estatóricos, o valor da tensão à carga nominal obtém-se a partir da seguinte fórmula

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cos \theta\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \sin \theta\right)^2} \quad (10)$$

onde U, I, R,  $\cos \theta$  e  $\sin \theta$  são os valores obtidos no teste à carga nominal.

Na curva perdas no ferro em função da tensão de alimentação, no ponto  $x = U_r$ , da curva mencionada obtém-se as perdas no ferro à carga nominal.

As perdas no rotor para cada ponto de carga são dadas pela seguinte expressão:

$$P_r = (P_{ele} - P_s - P_{fe}) \times s \quad (11)$$

Em todos os testes efetuados de acordo com o método 2-1-1B é feita a leitura da temperatura ambiente que influencia o valor das resistências estatóricas. A partir deste dado é possível aplicar o fator de correcção no valor das perdas por efeito de joule no rotor e estator anteriormente calculadas, apresentado na seguinte expressão:

$$K_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_{amb}}{235 + \theta_{amb}} \quad (12)$$

Para a determinação das perdas adicionais usa-se o método das perdas residuais. Nos vários pontos de carga, as perdas residuais são dadas pela seguinte expressão:

$$P_{Lr} = P_{ele} - P_{mec} - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fvr} \quad (13)$$

Com a curva das perdas residuais em função do quadrado do binário medido no ensaio em carga é possível obter uma recta que nos indica os coeficientes A e B da seguinte expressão:

$$P_{Lr} = A \times T^2 + B \quad (14)$$

Subtraindo o coeficiente B, obtemos a recta das perdas adicionais, como podemos ver no gráfico abaixo:

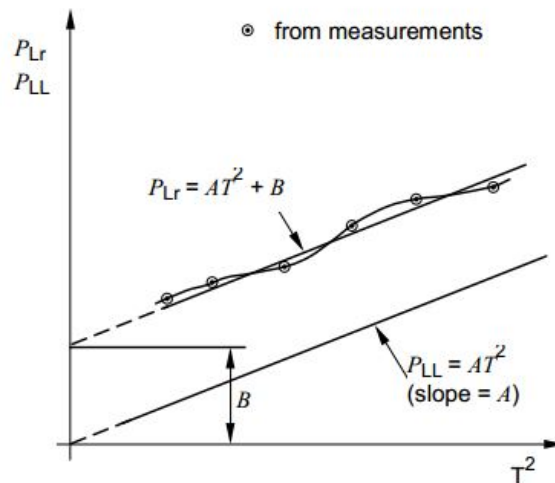


Figura 4.2 - Método das perdas residuais segundo a Norma IEC 60034-2-1

De acordo com as perdas mencionadas acima conseguimos calcular as perdas totais e o rendimento do motor a partir das seguintes equações:

$$P_T = P_{fe} + P_{fvr} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL} \quad (15)$$

$$\eta = \frac{P_{1\theta} - P_T}{P_{1\theta}} \quad (16)$$

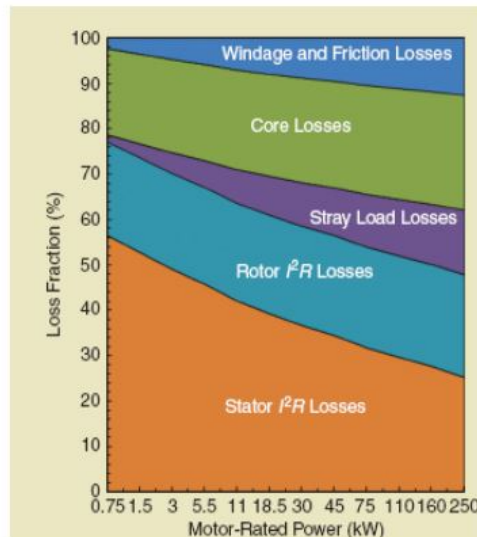


Figura 4.3 - Segregação de perdas de acordo com a potência nominal do motor de indução [5]

## 4.2 Aplicação da Norma IEC 60034-2-1 ao Motor de Síncrono de Relutância

De acordo com a norma IEC60034-2-1, o cálculo do rendimento do motor síncrono de relutância apenas é possível de realizar pelo método 2-1-2A, uma vez que o sistema de excitação não é regulável. Para o motor síncrono de relutância apenas se pode aplicar o Método Direto, pois este motor não pode ser alimentado diretamente da rede e não é possível efectuar o teste em curto-circuito pois o rotor não é acessível.

Uma vez que o motor síncrono de relutância é alimentado pelo conversor supunha-se que era possível regular a tensão de alimentação do motor mas o sistema de controlo do conversor não o permite devido às configurações restritas de fábrica que se aplicam quando este tipo de motor é configurado no conversor. No entanto, é possível determinar as perdas por efeito de joule no estator e fazer uma estimação de perdas adicionais. As perdas por atrito e ventilação poderão ter o mesmo valor calculado no ensaio em vazio para o motor de indução, uma vez que têm a mesma potência nominal e aproximadamente o mesmo tamanho.

Tal como no método 2-1-1A, o motor encontra-se em regime permanente nos vários pontos de carga.

É importante salientar que este motor não pode ser alimentado por fonte sinusoidal, estando por isso sujeito a perdas harmônicas causadas pelo conversor e é bastante influenciado pelo sistema de controlo do conversor.

O sistema de controlo do conversor é DTC e é indicado pelo fabricante como o sistema de controlo mais eficiente para esta máquina.

De seguida é feita uma análise mais detalhada ao conversor e um estudo mais profundo da influência do conversor no motor de indução, uma vez que o motor de indução pode ser alimentado diretamente da rede ou pelo conversor.

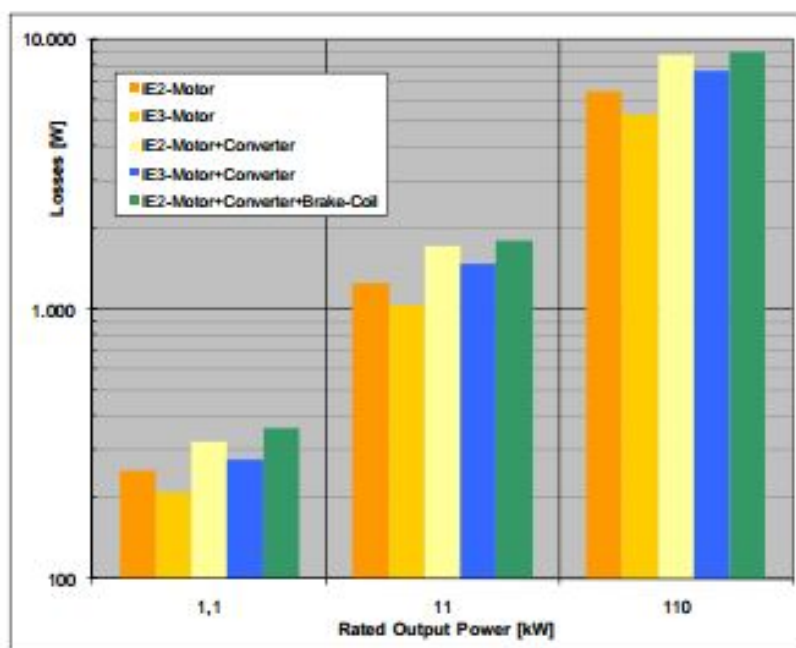


Figura 4.4 - Perdas totais do motor de indução e do conjunto motor de indução com o conversor de acordo com a potência nominal do motor [10]

### 4.3 Aplicação da Norma IEC 60034-2-3 ao Motor de Indução

A norma IEC 60034-2-3 propõe métodos para determinar as perdas e eficiência do motor de indução quando é alimentado pelo conversor, complementando os métodos apresentados na norma IEC 60034-2-1 quando o motor é alimentado por uma fonte sinusoidal. Essas perdas servem como referência para classificar os vários tipos de motores quando são alimentados por um variador de velocidade com inversor por fonte de tensão PWM. Quando o motor é alimentado pelo VSD as perdas irão ser maiores devido essencialmente aos harmónicos

injectados no motor pelo conversor. O objetivo desta norma é avaliar as perdas adicionais no motor resultantes do uso do conversor e calcular o rendimento do motor quando é alimentado pelo VSD [15].

Num sistema de potência em que a corrente de carga tem uma relação linear com a tensão de alimentação, a carga é linear, como por exemplo, resistências e aquecedores.

A distorção harmônica ocorre quando existem equipamentos não lineares na rede, que quando alimentados por uma fonte de tensão sinusoidal, produzem uma corrente com forma de onda não sinusoidal, distorcendo assim a relação linear entre a tensão e a corrente, como por exemplo o VSD. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, é cada vez mais usual o uso de dispositivos eletrônicos no controle de motores elétricos. Estes equipamentos têm semicondutores que produzem harmônicos e prejudicam a qualidade de energia do motor [16].

A distorção harmônica aplica-se no cálculo de ondas distorcidas de corrente e tensão, e é definido pelo quociente entre o valor eficaz dos harmônicos e o valor eficaz da componente fundamental.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \times 100\% \quad (17)$$

Os harmônicos são componentes sinusoidais de uma forma de onda, que tem como frequência um múltiplo inteiro da frequência fundamental.

A tabela 4.2 define as características dos harmônicos causados por um conversor de 6 pulsos, quando é ligado aos terminais do motor. Cada harmônico de corrente produz um harmônico correspondente no estator do motor. Cada harmônico constitui um componente direto ou inverso da corrente total [16] [17] [18] [15].

**Tabela 4.2 - Ordem dos harmônicos, sentido de rotação e frequência**

<b>Harmônico</b>	1	5	7	11	13	17
<b>Rotação</b>	d	i	d	i	d	i
<b>Frequência (Hz)</b>	50	250	350	550	650	850

Os harmónicos de corrente positivos vão contribuir para o aumento de binário produzido, os harmónicos de corrente negativos rodam em sentido contrário causando oscilações de binário e os harmónicos homopolares provocam perdas estacionárias no rotor, causando aquecimento, pois não têm sentido de rotação [16].

Esta norma não é indicada para realizar testes apenas ao VSD mas ao sistema composto pelo VSD e pelo motor. Apenas foi testado o motor de indução pois o motor síncrono de relutância apenas funciona com o conversor e não permite comparar as perdas fundamentais com as perdas com o conversor.

A configuração do variador influencia as perdas do motor, como por exemplo, a corrente de magnetização, a frequência de comutação, o modo de otimização de energia activado, a amplitude de modulação, a relação V/f (no caso de ser utilizado o controlo escalar), entre outros.

O variador deve ser configurado com as seguintes condições: VSD com inversor por fonte de tensão de dois níveis; controlo de realimentação da corrente do motor desactivada; não são permitidos componentes adicionais entre o variador e o motor; tensão fundamental de saída do VSD igual à tensão nominal do motor, mas a tensão de alimentação do VSD tem que ser bastante superior à tensão nominal do motor para evitar supermodulação; frequência de comutação igual a 4 kHz e frequência de saída do VSD igual à frequência nominal do motor [11].

Tal como na norma IEC 60034-2-1 as perdas podem se classificadas como: perdas no ferro, perdas por atrito e ventilação, perdas por joule no estator e rotor e perdas adicionais.

A norma IEC 60034-2-3 é definida pelas seguintes etapas:

1. Teste em vazio do motor com alimentação sinusoidal e determinação das perdas constantes de acordo com a norma IEC 60034-2-1
2. Teste em vazio do motor alimentado pelo conversor e determinação das perdas constantes tal como na etapa anterior
3. Teste com a variação de carga descendente (125% a 25%) do com a alimentação sinusoidal
4. Teste com a variação de carga descendente (125% a 25%) com o motor a ser alimentado pelo conversor

As perdas harmónicas é a diferença das perdas totais quando a alimentação do motor é o conversor com as perdas totais do motor com a alimentação sinusoidal.



As perdas adicionais harmônicas, que variam com a carga, é a diferença entre as perdas adicionais dos dois testes em carga (alimentação sinusoidal e alimentação com o conversor do motor):

$$P_{HLload} = (P_{rC} - P_r) + (P_{sC} - P_s) + (P_{LLC} - P_{LL}) \quad (18)$$

As perdas adicionais harmônicas constantes resultam da diferença entre as perdas constantes nos dois testes e dada pela expressão:

$$P_{HLno-load} = (P_{kC} - P_k) \quad (19)$$

$$P_{HL} = P_{HLload} + P_{HLno-load} \quad (20)$$

As perdas totais do motor quando o motor é alimentado pelo conversor é a soma das perdas totais sinusoidais com as perdas harmônicas totais.

$$P_{Ttest-converter} = P_{Tsin} + P_{HL} \quad (20)$$

A eficiência do motor quando é alimentado pelo conversor é dada pela expressão:

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{Ttest-converter}}{P_{in}} \quad (21)$$

A percentagem das perdas harmônicas das perdas totais é dada pela equação:

$$r_{HL} = \frac{P_{HL}}{P_{Tsin}} \times 100\% \quad (22)$$

A potência consumida pelo motor tem duas componentes: ativa e reativa. A potência ativa é responsável pelo trabalho e binário produzido no motor. A potência reativa é responsável pela criação do campo magnético rotativo e é, normalmente constante desde a carga nula até a carga nominal. O quociente entre a potência ativa e reativa denomina-se fator de potência [13] [19].

Quando o fator potência é baixo existem maiores perdas por efeito de joule, pois é necessária maior corrente para garantir uma dada potência ativa desejada e os dispositivos encontram-se sobredimensionados pois a potência ativa produzida é bastante baixa em relação à capacidade instalada.

## Capítulo 5

### Resultados experimentais

#### 5.1 Ensaio de Rendimento ao motor de indução e ao motor síncrono de relutância segundo a Norma IEC 60034-2-1

##### 5.1.1 Aplicação do Método Direto ao Motor de Indução e ao Motor Síncrono de Relutância

Na figura 5.1 podemos visualizar os resultados experimentais de rendimento do motor de indução e do motor síncrono de relutância segundo o Método 2-1-1A:

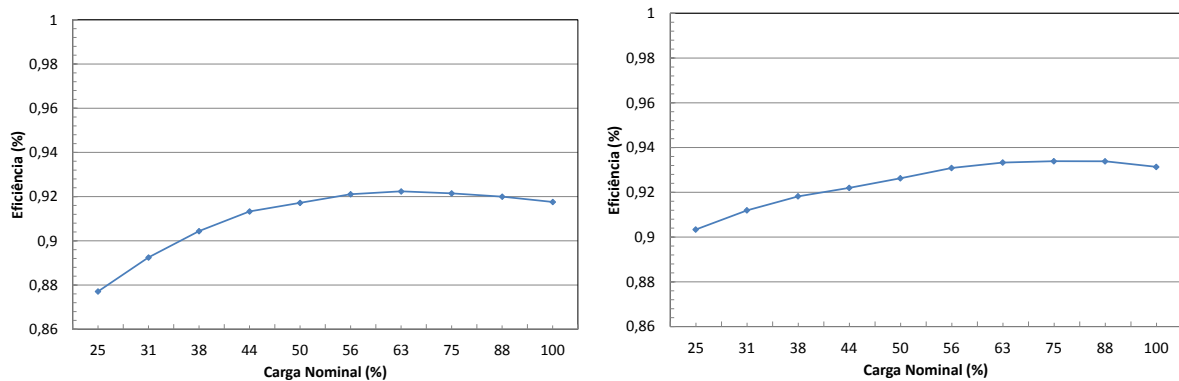
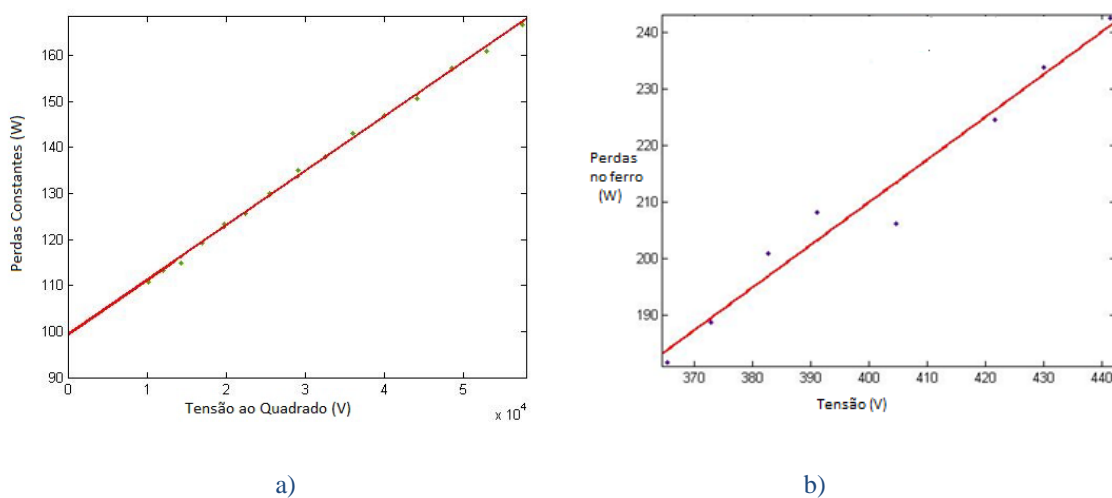


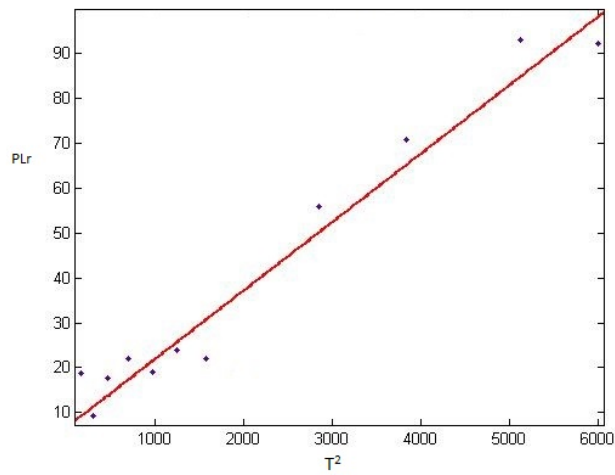
Figura 5.1 - Eficiência do motor de acordo com a variação da carga: a) motor de indução; b) motor síncrono de relutância

##### 5.1.2 Aplicação do Método Indireto ao Motor de Indução



a)

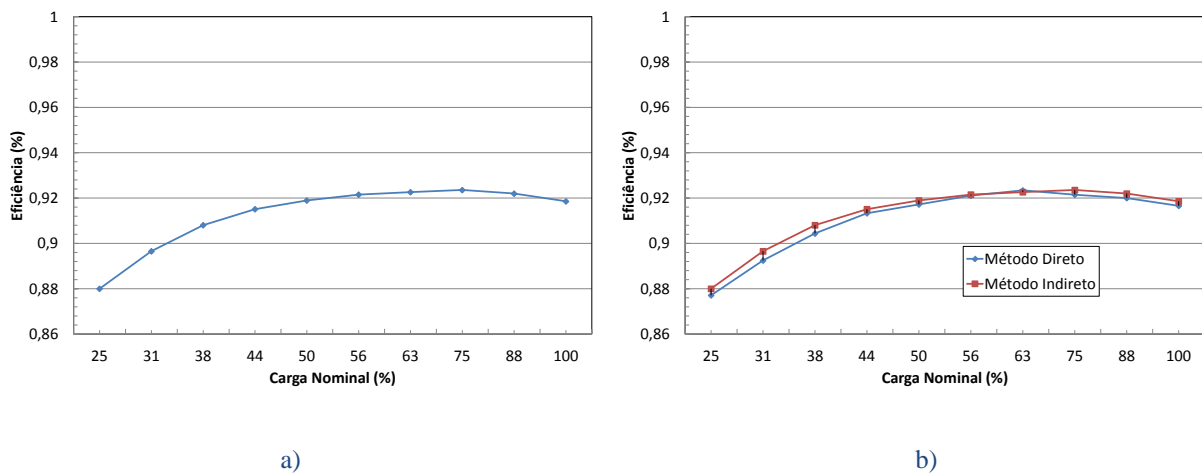
b)



c)

Figura 5.2 - Dados experimentais da determinação das perdas: a) Perdas por atrito e ventilação à velocidade síncrona (Pfw0); b) Perdas no ferro; c) Perdas Residuais;

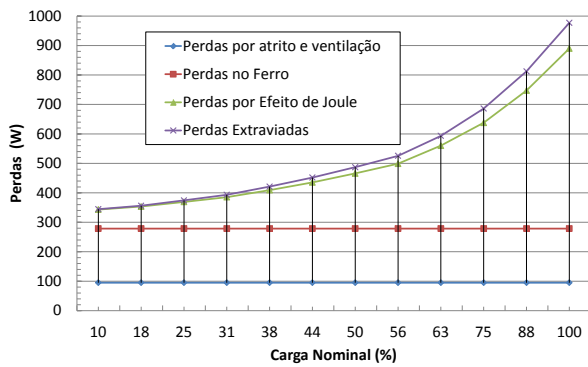
Na figura 5.3 e 5.4 podemos visualizar os resultados experimentais das perdas segregadas, do rendimento do motor de indução segundo o Método 2-1-1B e do fator de potência.



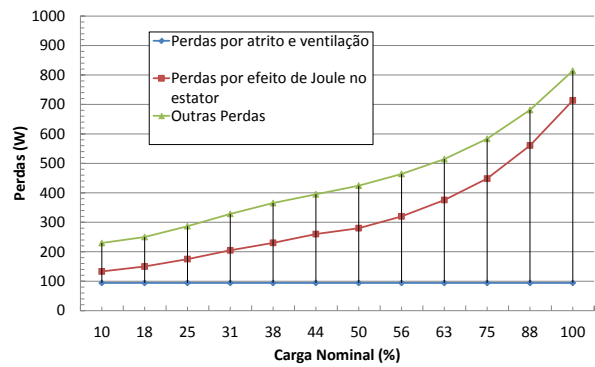
a)

b)

Figura 5.3 - a) Rendimento do motor de indução pelo método indireto; b) Análise comparativa do rendimento do motor de indução com o método direto e indireto



a)



b)

Figura 5.4 - a) Segregação de perdas do motor de indução segundo o método 2-1-1B; b) Segregação de perdas no motor síncrono de relutância segundo o método 2-1-1B

## 5.2 Ensaio de Rendimento ao Motor de Indução segundo a Norma IEC 60034-2-3

Na tabela 5.1 estão os resultados experimentais das perdas totais harmônicas ( $P_{HL}$ ), das perdas totais do motor de indução ( $P_{T \text{ test-converter}}$ ) quando é alimentado por um conversor e o rendimento do motor de indução segundo o Método 2-1-1B para a norma IEC 60034-2-3.

Tabela 5.1 – Dados mais relevantes segundo a norma IEC60043-2-3

<b>IEC 60034-2-3</b>	
<b><math>P_{HL \text{ load}}</math> (W)</b>	68,94
<b><math>P_{HL \text{ no-load}}</math> (W)</b>	28,42
<b><math>P_{T \text{ test-converter}}</math> (W)</b>	1084,25
<b>Eficiência do motor quando é alimentado pelo conversor</b>	0,9093
<b>Porcentagem das Perdas Harmônicas das Perdas Totais (%)</b>	10

### 5.3 Ensaio de rendimento do Motor de Indução e do Motor Síncron de relutância com o conversor em regime de velocidade variável

Na figura 5.5 podemos visualizar a variação do rendimento global, do motor de indução e do conversor para várias velocidades. Nestes ensaios, o motor encontra-se em regime permanente nos vários pontos de binário.

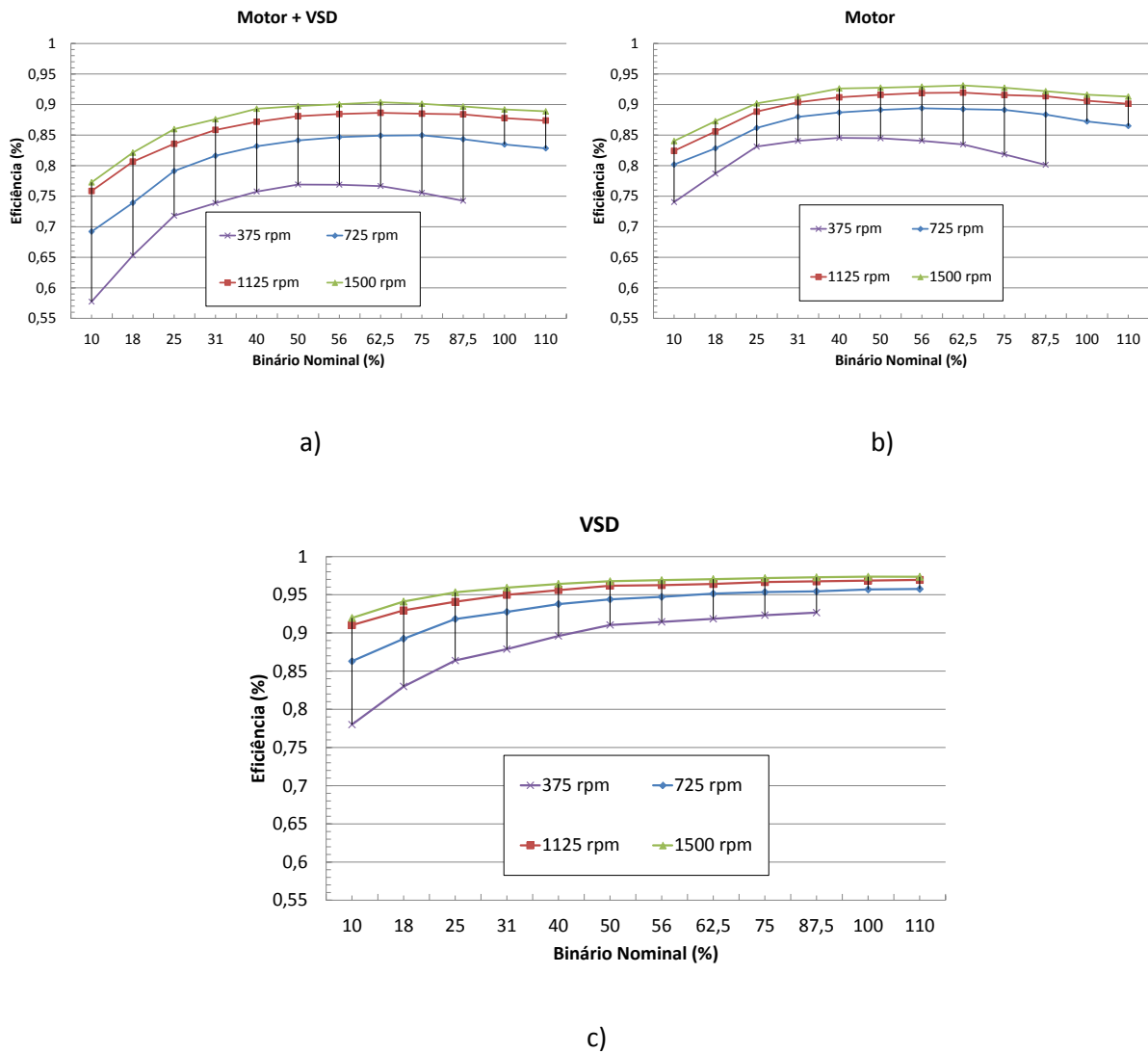


Figura 5.5 - Eficiência para várias velocidades em função da variação de carga: a) Eficiência do sistema global; b) Eficiência do motor; c) Eficiência do VSD.

Na figura 5.6 podemos visualizar a variação do rendimento global, do motor síncrono de relutância e do conversor para várias velocidades.

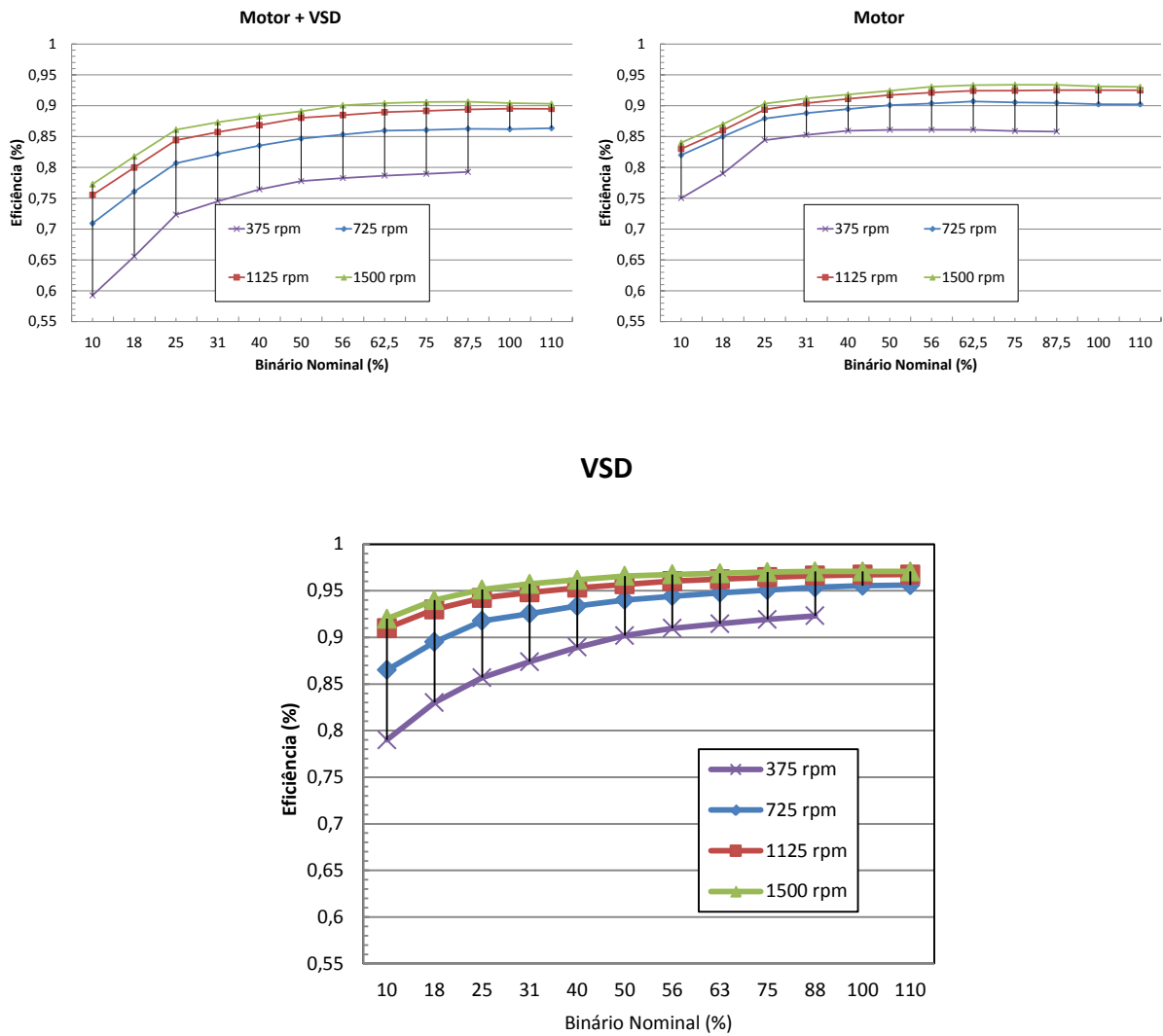
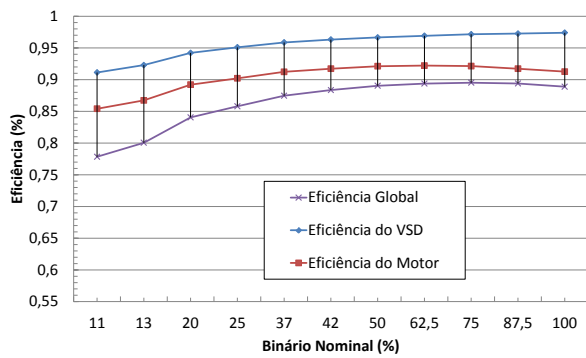
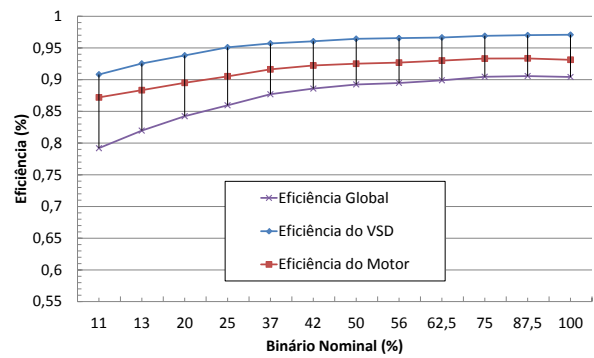


Figura 5.6 - Eficiência global, do motor síncrono de relutância e do variador em função da variação de carga

Na figura 5.7 é feita a análise comparativa da eficiência do motor de indução, do motor síncrono de relutância e do sistema global e do conversor nas duas situações.



a)



b)

Figura 5.7 a) Eficiência global, do motor de indução e do variador quando a carga tem característica de ventilador; b) Eficiência global, do motor de síncrono de relutância e do variador quando a carga tem característica de ventilador;

Na figura 5.8 podemos analisar a variação do fator de potência com a variação da carga.

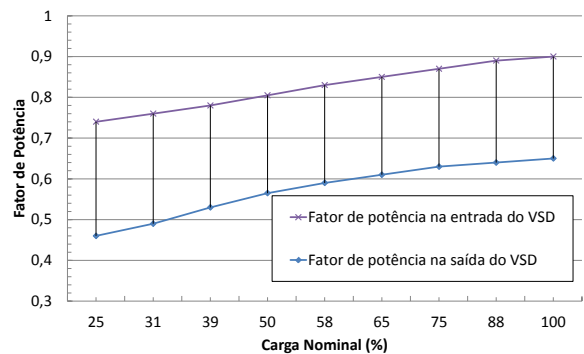
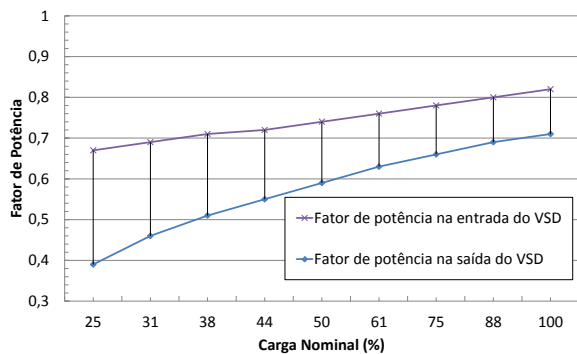


Figura 5.8 Comparação do fator de potência antes e depois do VSD quando o motor utilizado é: a) motor de indução; b) motor síncrono de relutância

## 5.4 Análise da influência dos harmônicos

Na figura 5.9 e 5.10 podemos visualizar as formas de onda da corrente e tensão à entrada e saída do conversor para o motor de indução e para o motor síncrono de relutância.

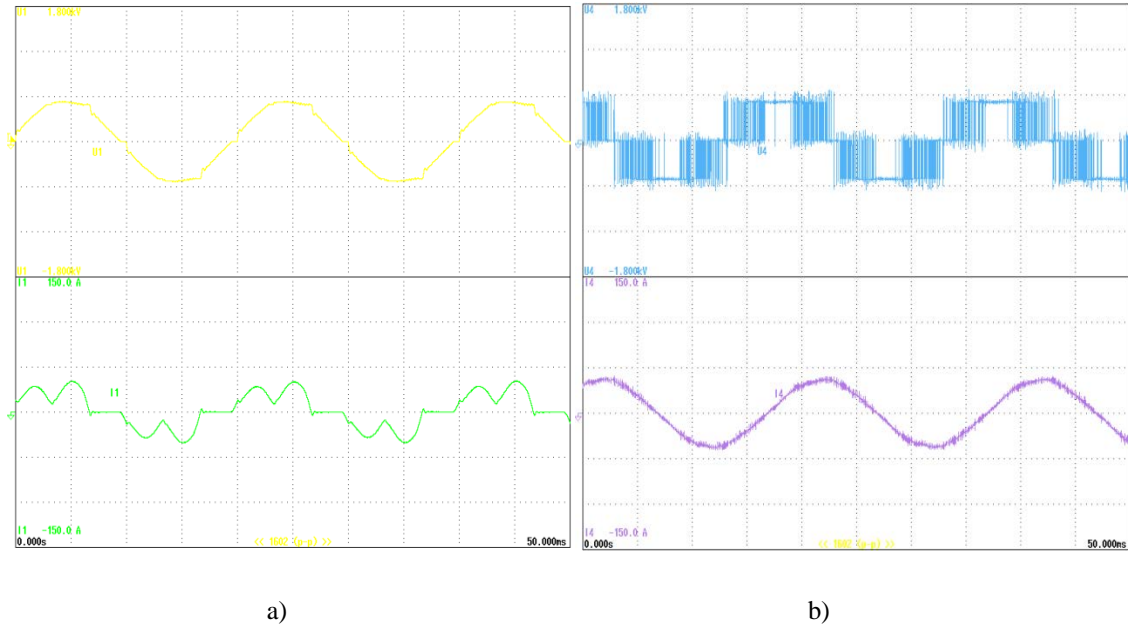


Figura 5.9 - Formas de onda de corrente e tensão com o motor de indução: a) À entrada do conversor; b) À saída do conversor.

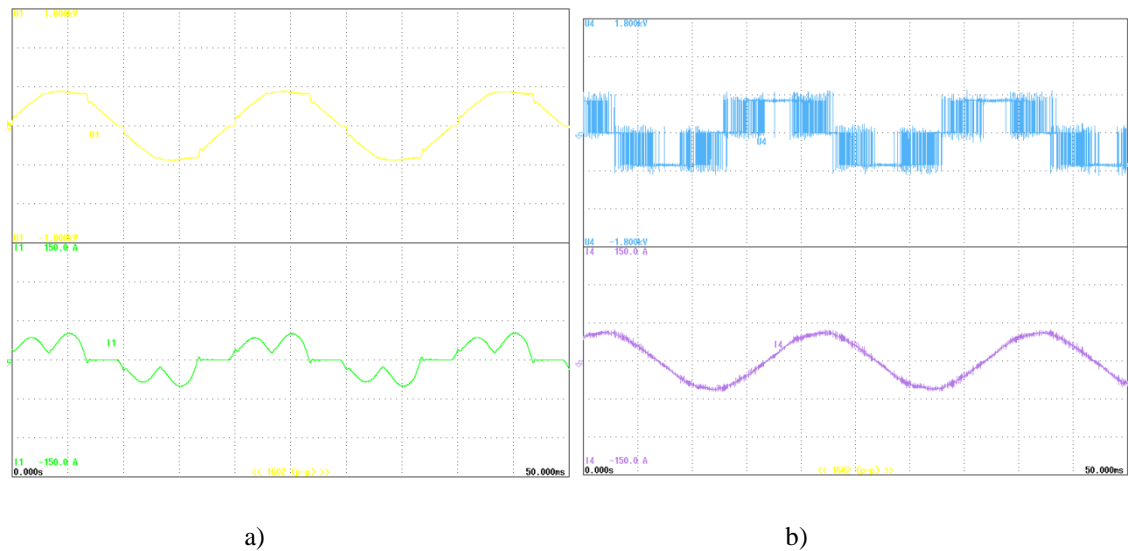


Figura 5.10 - Formas de onda de corrente e tensão com o motor síncrono de relutância: a) À entrada do conversor; b) À saída do conversor.



Na figura 5.11 e 5.12 podemos visualizar a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão à entrada e saída do conversor para o motor de indução e para o motor síncrono de relutância.

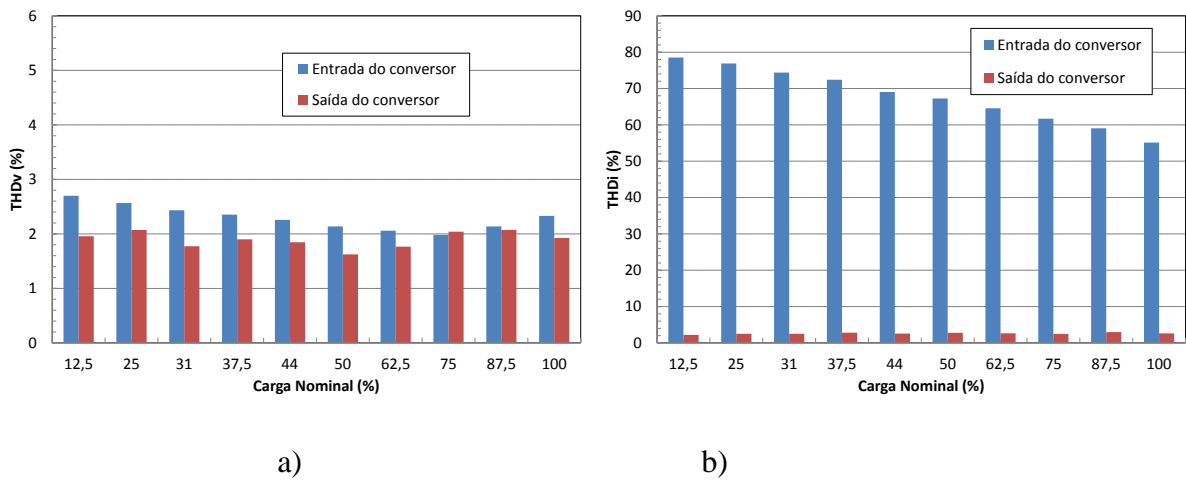


Figura 5.11 - Distorção harmônica antes do conversor e antes do motor de indução: a) Distorção harmônica da tensão; b) Distorção harmônica da corrente.

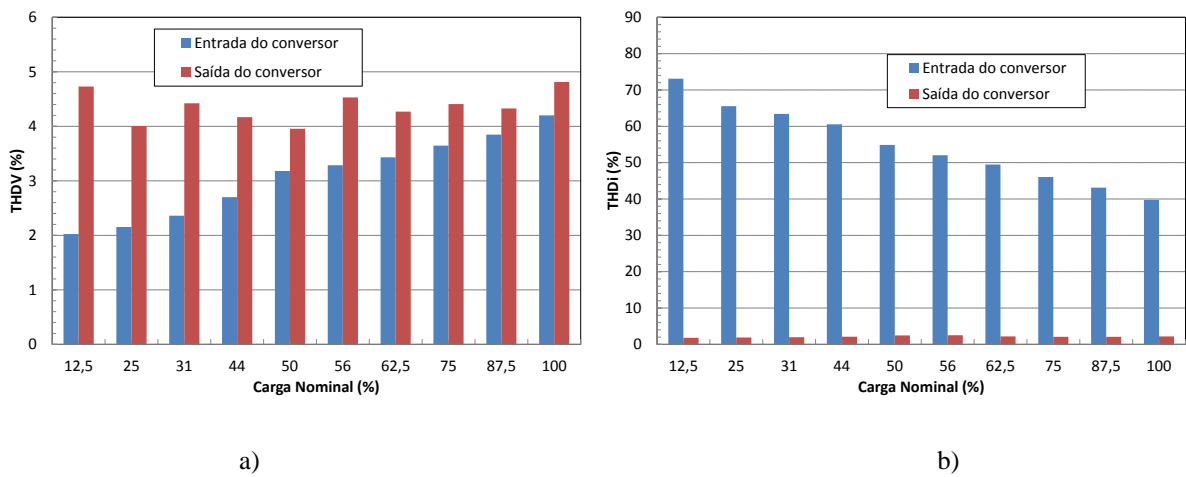


Figura 5.12 - Distorção harmônica antes do conversor e antes do motor síncrono de relutância: a) Distorção harmônica da tensão; b) Distorção harmônica da corrente.

Na figura 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 podemos ver as contribuições dos harmônicos de tensão e corrente mais importantes com o motor de indução e com o motor síncrono de relutância à entrada e saída do conversor com a variação de carga.

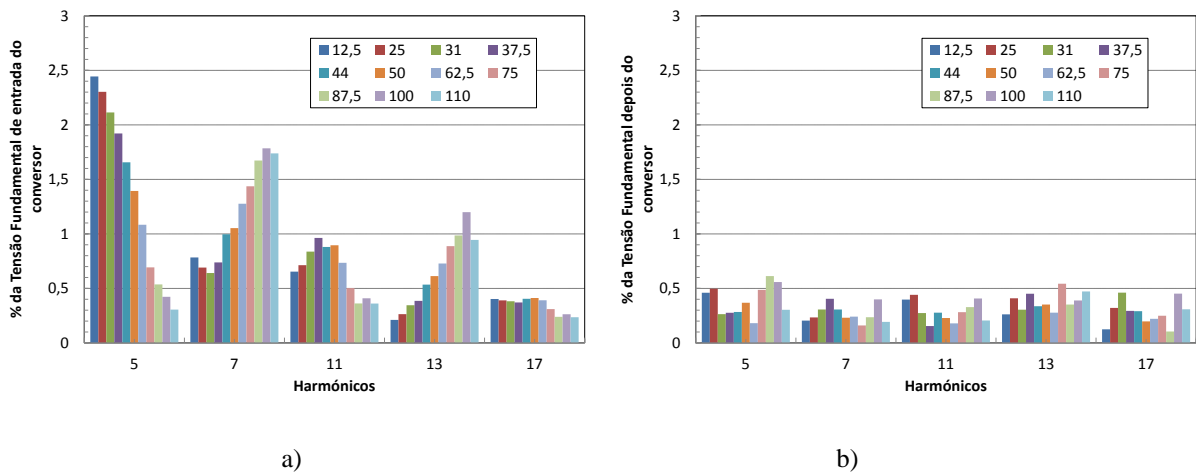


Figura 5.13 - Harmônicos de tensão com o motor de indução: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.

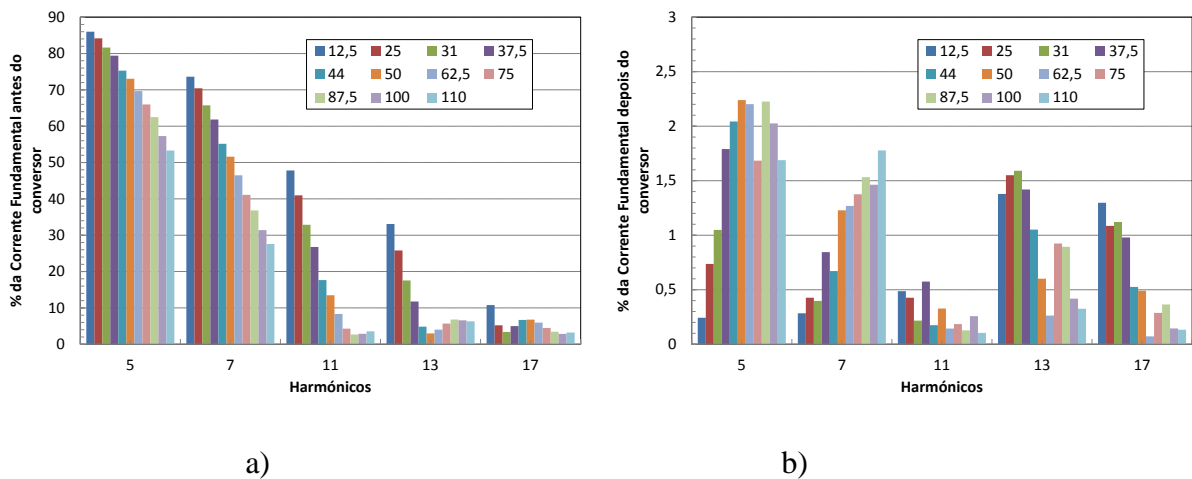
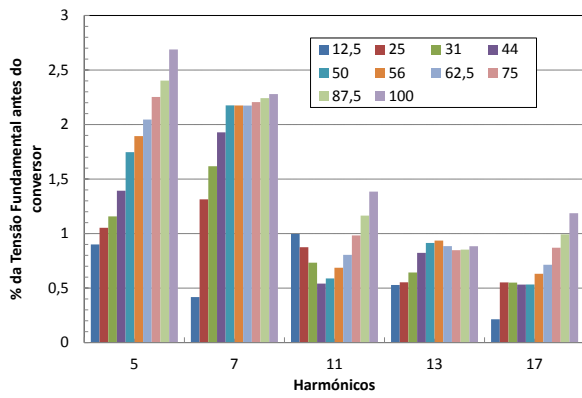
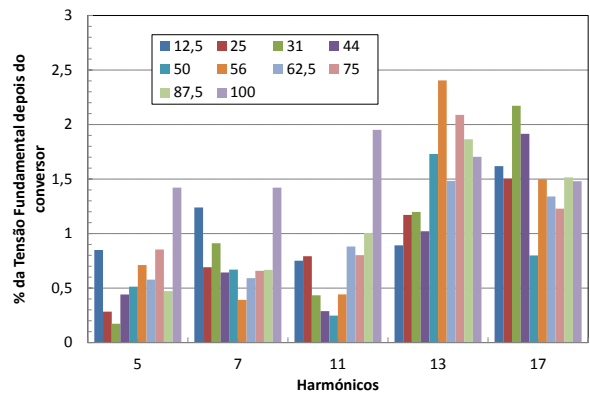


Figura 5.14 - Harmônicos de corrente com o motor de indução: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.

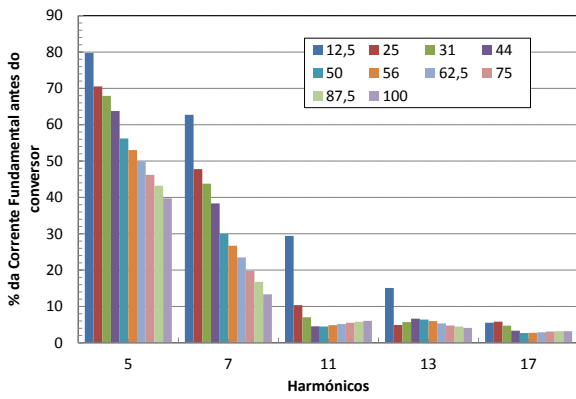


b)

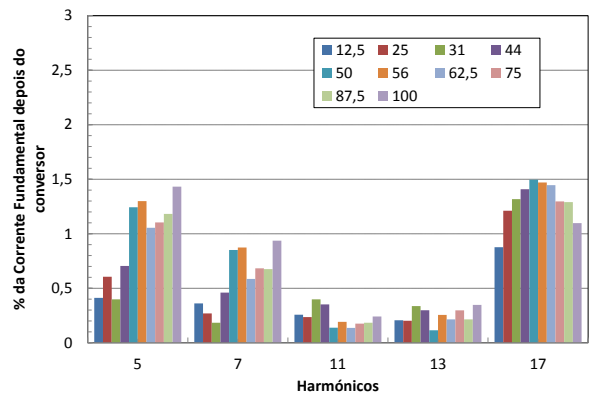


b)

Figura 5.15 - Harmônicos de tensão com o motor de síncrono de relutância: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.



b)



b)

Figura 5.16 - Harmônicos de corrente com o motor síncrono de relutância: a) Antes do conversor; b) Depois do conversor.

Na figura 5.17 podemos visualizar a variação das perdas com alimentação do motor sinusoidal em comparação ao teste é que o motor é alimentado pelo conversor.

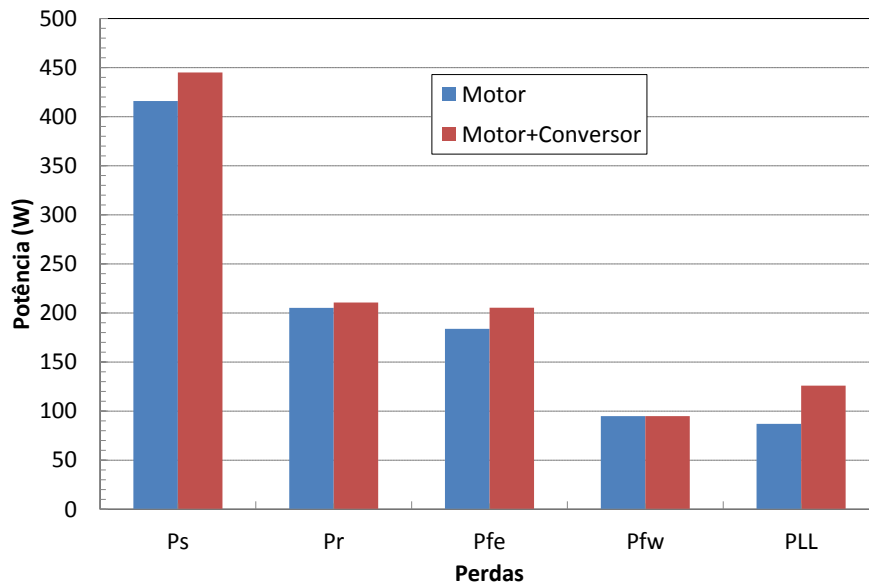


Figura 5.17 - Perdas segregadas do motor quando é alimentado por fonte sinusoidal e quando é alimentado por um conversor

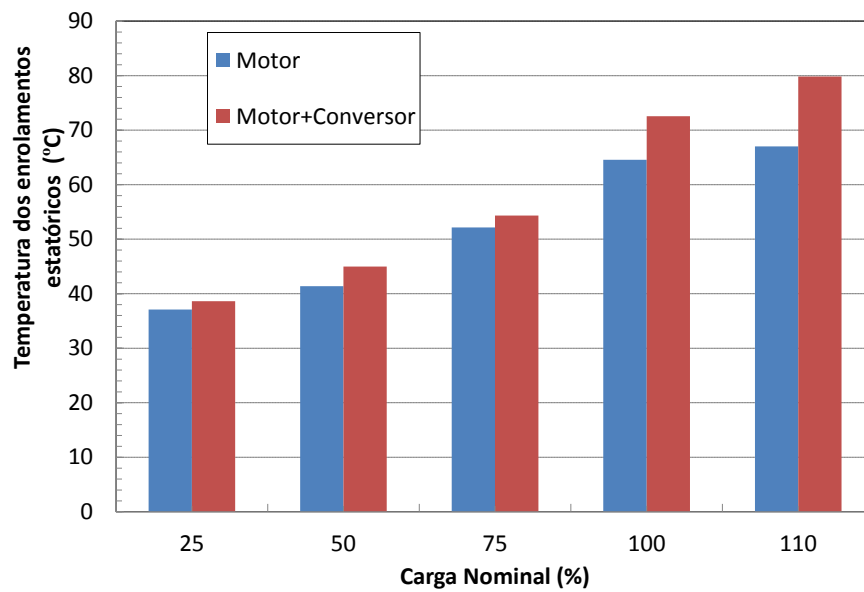


Figura 5.18 - Temperatura dos enrolamentos estatóricos quando o motor de indução quando é alimentado por fonte sinusoidal e quando é alimentado por um conversor

## 5.5 Sensibilidade do motor a diferentes níveis de tensão de alimentação no Motor de Indução

### 5.5.1 Rendimento e Fator de potência do Motor de indução com a tensão de alimentação 380V, 400V e 420V

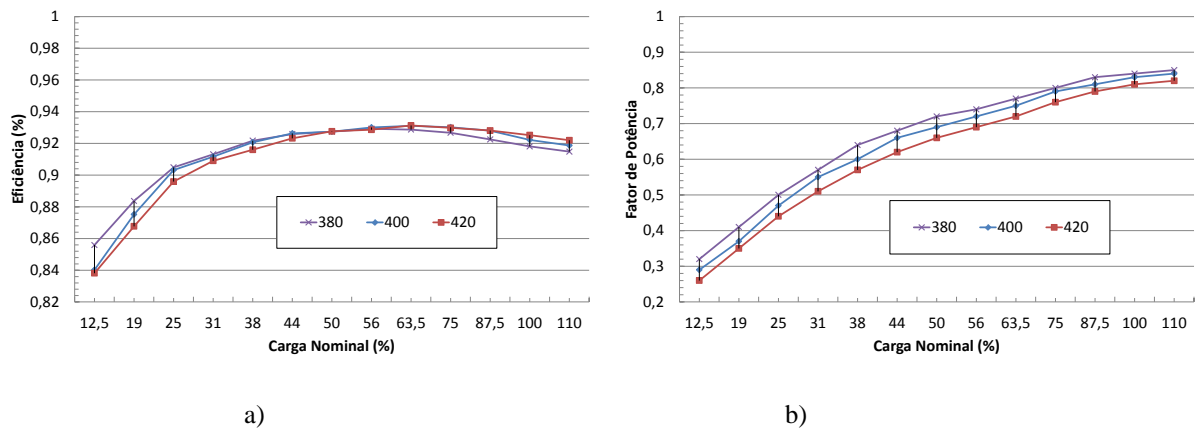


Figura 5.19 - a) Eficiência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (380V, 400V e 420V) em função da variação da carga; b) Fator de Potência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (380V, 400V e 420V) em função da variação da carga.

### 5.5.2 Rendimento e Fator de potência do Motor de indução com a tensão de alimentação 200V e 220V

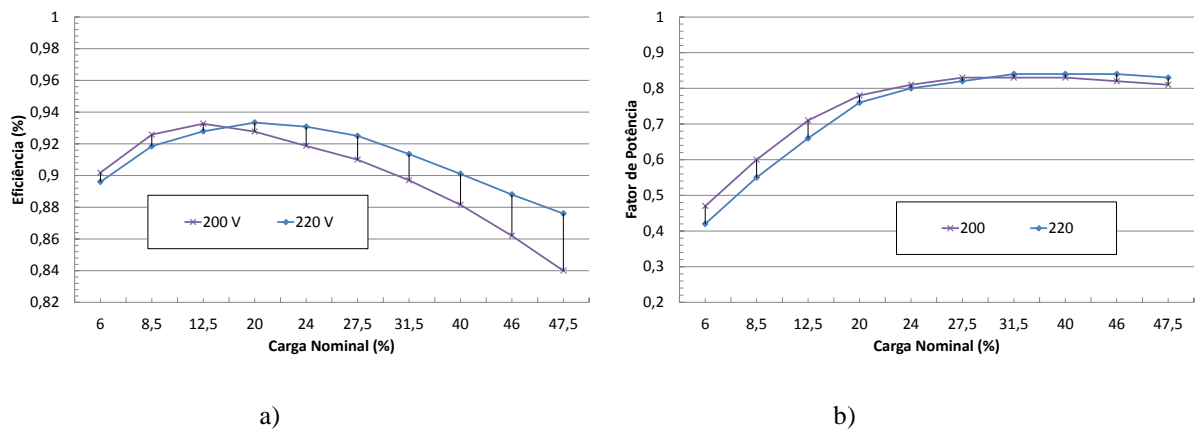


Figura 5.20 - a) Eficiência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (200, 220V) em função da variação da carga; b) Fator de Potência do Motor de Indução para diferentes níveis de tensão (200V, 220V) em função da variação da carga.

## Capítulo 6

### Discussão de Resultados

O rendimento do motor de indução é cerca de 88% para 25% da carga nominal e a partir de 50% da carga nominal tem um rendimento bastante elevado e linear, na ordem dos 92%. Com este método, obteve-se resultados que estão de acordo com os valores apresentados nas chapas de características das máquinas testadas.

O motor síncrono de relutância apresenta um rendimento muito elevado e sempre superior ao de indução. A partir de 25% da carga nominal tem um rendimento superior a 90% atingindo o seu máximo de rendimento (93,3%) a 75% de carga. Estes valores são impressionantes e o único valor de rendimento apresentado na chapa de características (93,3% à carga nominal) é um pouco superior ao valor verificado nos ensaios experimentais (93%), contudo ainda assim admissíveis segundo a norma.

Estes resultados são muito semelhantes aos dados obtidos no método 2-1-1A, o que comprova os dois métodos e o valida o excelente comportamento do motor, sobretudo, para situações em que a carga nominal é superior a 50%.

Na figura 5.4 está indicada a variação das perdas com a variação da carga do motor de indução e do motor síncrono de relutância. No motor de indução as perdas no ferro e por atrito e ventilação são constantes. As perdas por efeito de joule no estator e rotor e as perdas adicionais variam com a carga, sendo as perdas por efeito de joule dominantes no processo de determinação da eficiência nominal do motor. Os resultados apresentados encontram-se de acordo com as várias fontes consultadas e sublinham a precisão dos equipamentos utilizados na medição destas componentes. No motor síncrono de relutância considera-se que as perdas por atrito em ventilação têm o mesmo valor do motor de indução, visto que os dois motores são do mesmo fabricante, possuem a mesma potência nominal e idêntico tamanho. As perdas por efeito de joule são as perdas mais importantes e significativas na performance do motor. Não existem perdas no rotor, uma vez que a velocidade do motor é igual à velocidade de sincronismo. As perdas no ferro não são possíveis de calcular, mas fazem partes das restantes perdas, assumindo um valor muito pequeno.

Segundo os cálculos efetuados pela Norma IEC 60034-2-1, no motor de indução, as perdas harmônicas representam 10% das perdas totais à carga nominal e diminuem a eficiência do motor de indução (cerca de 1%). Uma vez que o motor de indução apresenta um rendimento superior ao estabelecido pela Norma IEC0034-30, as perdas harmônicas não consideradas como um entrave na utilização do conversor no motor a longo prazo.

De acordo com a figura 5.5, 5.6 e 5.7, podemos analisar a eficiência global do sistema e a eficiência de cada um dos dispositivos. A eficiência global é o produto da eficiência motor e do conversor. Esta experiência foi possível pois o analisador de potência YOKOGAWA tem 6 canais e analisa as grandezas elétricas à entrada e saída do VSD. Como era de esperar, o VSD apresenta eficiência bastante elevada (0,92-0,98), mas não apresenta variações significativas quando o motor utilizado é o motor de indução ou o motor síncrono de relutância.

Para a velocidade 1125 rpm, o rendimento é bastante semelhante ao rendimento para a velocidade 1500 rpm em todos os pontos de carga. Para as velocidades 375 rpm e 725 rpm a diferença é bem mais acentuada, sendo o rendimento para a velocidade 375 rpm, muito baixo. Nesta velocidade, não foi possível testar o motor com o binário de carga nominal superior 87,5%. Para velocidades baixas, o rendimento global é mais influenciado pela diminuição de rendimento do conversor. Mesmo assim, é de salientar a grande semelhança nas velocidades 1500 rpm (próximo da velocidade nominal) e 1125 rpm. Para velocidades mais baixas, a potência elétrica é bastante menor e isso pode trazer grandes benefícios energéticos.

O rendimento global é bastante semelhante aos dados analisados anteriormente, verificando-se maior diferença entre as velocidades 1500 rpm e 1125 rpm, devido ao rendimento superior do motor síncrono de relutância para 62,5% e 75% do binário de carga nominal.

O motor síncrono de relutância apresenta melhor performance, quando a carga nominal é superior a 62,5% e a velocidades diferentes da nominal porque não existem perdas no rotor. O rendimento do conversor é muito semelhante nos dois casos.

O fator de potência na entrada do conversor é muito superior ao fator de potência na saída do conversor. O fator de potência é bastante inferior ao fator de potência nominal do motor. Com isto, a corrente de alimentação do motor é bastante superior, a temperatura do motor superior, as perdas por efeito de joule aumentam e o ciclo de vida útil do motor diminui. O fator de potência na entrada e saída do conversor é bastante superior quando é usado o motor síncrono de relutância.

De acordo com as figuras 5.9 e 5.10, não são notórias as diferenças nas formas de onda de corrente e tensão no motor de indução e no motor síncrono de relutância.

No ensaio ao motor de indução, a distorção harmónica de tensão na entrada do conversor é superior à distorção harmónica na entrada do motor de indução. Na entrada do conversor, a distorção harmónica é causada pela impedância e contaminação da rede, uma vez que existem muitos dispositivos eletrónicos (PCs e lâmpadas fluorescentes) no edifício que degradam a qualidade da energia eléctrica.

No motor síncrono de relutância, a distorção harmónica de tensão na saída do conversor muito mais elevada (cerca de 2%).

A distorção harmónica da corrente na entrada do conversor é muito elevada, na ordem 75%, enquanto na saída do conversor é cerca de 2%. A relação entre a entrada e saída do conversor é semelhante nos dois testes, no entanto é superior no motor de indução. Por outro lado, a distorção harmónica da corrente na entrada do conversor, quando é utilizado o motor de indução é mais elevado (5%).

Os maiores impactos da distorção harmónica verificam-se no aumento de ruído do motor devido à distorção harmónica da corrente e no aumento de temperatura do motor causadas pelo aumento de perdas no ferro e perdas por efeito de joule, ambas dependentes da frequência e na diminuição do fator de potência devido ao aumento da potência reativa no motor. A indução de fluxo no entreferro aumenta a temperatura do rotor e cria campos pulsantes que afectam de forma significativa a velocidade de rotação do rotor, uma vez que há indução de correntes de altas frequências no rotor e a frequência de rotação é diferente da frequência síncrona do rotor.

De acordo com a figura 5.13 e 5.14, a percentagem do 5º, 11º e 17º harmónico de tensão e de corrente da componente fundamental à entrada do conversor diminui com o aumento de carga, no 7º e 13º harmónico acontece o contrário. Isto é, os harmónicos de sentido de rotação inverso têm menor influência com o aumento de carga e os harmónicos de sentido de rotação direto têm maior influência. A percentagem dos harmónicos de tensão e corrente é muito maior nos primeiros harmónicos indicados. À saída do conversor, este cenário altera-se significativamente. A percentagem dos harmónicos de tensão é bastante semelhante nos harmónicos apresentados, havendo maior influência nas cargas mais elevadas. Na saída do conversor, os harmónicos de corrente 5 e 7 crescem com o aumento de carga. Os harmónicos restantes relevantes têm um



comportamento oposto. Os harmônicos analisados na entrada do conversor não apresentam grande relevância na análise de performance do motor.

Com o motor síncrono de relutância, a percentagem dos harmônicos de tensão da componente fundamental à entrada do conversor são superiores com o aumento de carga. Os harmônicos de corrente diminuem com o aumento de carga. O 5º harmônico de corrente tem valores inferiores quando é utilizado o motor síncrono (cerca de 5%). À saída do conversor, os harmônicos de tensão 13 e 17 são superiores aos restantes harmônicos, ao contrário do que acontece no teste anterior. O harmônico de corrente 17 é muito elevado e com a mesma influência do 5º harmônico de corrente no teste com o motor de indução. Os harmônicos de corrente são muito importantes na análise da performance do motor, sendo os harmônicos 5º e 7º com grande amplitude e influência no motor de indução, e os harmônicos 13º e 17º mais relevantes no motor síncrono de relutância. Como podemos verificar na figura 5.9, 5.10 e 5.12, quando é utilizado o motor síncrono, a distorção harmônica da corrente é menor. Essa análise permite compreender a melhor performance do motor síncrono de relutância e menor influência do VSD na vida útil do motor.

As perdas no ferro podem ser separadas em duas componentes: perdas por histerese e perdas Foucault.

As perdas por histerese são provocadas pela não linearidade da densidade de fluxo e da curva de magnetização. As perdas por histerese são proporcionais à frequência e proporcionais ao quadrado do fluxo magnético.

As correntes Foucault que circulam no ferro, nos enrolamentos e noutras partes do motor são induzidas por campos magnéticos extraviados em torno dos enrolamentos. As perdas Foucault são proporcionais ao quadrado da frequência e proporcionais ao fluxo magnético.

A passagem de correntes de forma distorcida nos enrolamentos estatóricos e rotóricos aumenta a impedância, pois a distribuição da corrente nos enrolamentos não é uniforme e aumenta, desta forma, as perdas por efeito de joule.

O aquecimento do motor provocado pela existência de harmônicos de magnitude elevada pode reduzir o tempo de vida útil do motor.

A temperatura ambiente é a temperatura de referência para o ponto mais baixo dos enrolamentos estatóricos do motor. A curva de aquecimento do motor é definido pela diferença de temperatura

entre o ponto mais baixo de temperatura do motor e a temperatura dos enrolamentos estatóricos à carga nominal. Quando a temperatura do motor à carga nominal é inferior à temperatura da classe de isolamento (nestes motores a classe de isolamento é F e a temperatura máxima 155 °C) a capacidade térmica do motor aumenta.

De acordo com as figuras 5.19, quando o motor tem maior rendimento para carga baixas quando a tensão de alimentação do motor é inferior à tensão nominal do motor. Quando a tensão de alimentação é 420 V acontece o oposto. Para a tensão de 200 V e 220 V, apenas é possível testar o motor para carga inferior a 50%, uma vez que neste nível de carga a corrente do motor é superior à corrente nominal. No entanto apresentam um rendimento superior para carga inferior a 50%. Com estas condições de alimentação, o tempo de vida útil do motor é inferior, pois a corrente de alimentação do motor é muito superior e ocorrem perdas por efeito de joule superiores. A variação do fator de potência é linear com a variação de carga (nas tensões 380 V, 400 V e 420 V) e apresenta um valor mais elevado a 380 V quando a carga é próxima da carga nominal e a 200 V para carga inferior a 50%.

**Tabela 6.1 - Dados mais relevantes dos ensaios realizados**

	Motor de Indução	Motor de Indução + VSD	Motor Síncrono de Relutância + VSD
Velocidade Nominal (rpm)	1473,08	1474,15	1500
Potência Mecânica Nominal (W)	11040,1	11032,2	11020,4
Potência Elétrica Total à carga nominal (W)	12045	12447	12221
Potência Elétrica do Motor à carga nominal (W)	12045	12121	11864
Corrente Nominal do Motor (A)	20,73	20,93	24,91
Tensão Nominal do Motor (V)	400,49	399,59	372,03
Binário Nominal do Motor (Nm)	71,57	71,46	70,35
Fator de Potência do Motor à carga Nominal	0,84	0,75	0,65
Rendimento Nominal global (%)		88,21	90,42

Rendimento Nominal do Motor (%)		91,66	90,58	93,14
Rendimento Nominal do VSD (%)			97,37	97,08
Rendimento Global ao Binário Nominal para a velocidade	725 rpm		83,47	86,2
	1125 rpm		87,78	89,52
	1500 rpm		88,21	90,42
Rendimento do Motor ao Binário Nominal para a velocidade	725 rpm		87,23	90,24
	1125 rpm		90,13	92,52
	1500 rpm		90,58	93,14
Rendimento do VSD ao Binário Nominal para a velocidade	725 rpm		95,69	95,53
	1125rpm		96,85	96,72
	1500 rpm		97,37	97,08
Distorção Harmónica da Tensão à carga Nominal (%)	À entrada do conversor		2,33	4,2
	À saída do conversor		1,92	4,8
Distorção Harmónica da Corrente à carga Nominal (%)	À entrada do conversor		55,13	39,74
	À saída do conversor		2,61	2,18

## Capítulo 7

### Conclusão e Propostas de Trabalho Futuro

#### 7.1 Conclusões

Os motores elétricos são responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica. O sistema completo integra, normalmente, uma fonte de alimentação, um motor elétrico, a transmissão mecânica e por vezes um variador eletrónico de velocidade.

A eficiência de todo o sistema depende da eficiência do motor, da estratégia de controlo de velocidade, do sobredimensionamento do motor, da qualidade de energia usada para alimentar o sistema, das perdas na transmissão mecânica e da eficiência do VSD.

Com o avançar do tempo e da evolução da tecnologia, os VSD tornam-se cada vez mais baratos e mais atractivos, pois permitem a utilização de motores AC para várias velocidades e apresentam elevado rendimento.

A penetração no mercado de motores de alta eficiência em muito se deve às normas IEC que divulgam a performance, classificação de eficiência e limites mínimos de outros parâmetros dos motores e credibilizam as características indicadas pelo fabricante.

Foram testados o motor de indução ABB de 11 kW IE3, o motor síncrono de relutância ABB de 11 kW IE4 e o conversor ABB ACS850-04 de 22 kW de acordo pelas normas IEC 60034-2-1/-2-3. A eficiência dos motores e do conversor em regime permanente e a possibilidade de funcionarem em regime de velocidade variável trás grandes benefícios energéticos.

Em suma, este trabalho permitiu validar os excelentes valores de eficiência em regime permanente à carga nominal indicados pelo fabricante e analisar os benefícios energéticos que obtemos com a utilização do VSD em regime de carga variável. As normas IEC 60034-2-1/-2-3 possibilitam a correta análise de performance dos motores, uma vez que respeitam os limites mínimos de eficiência e comprovam os valores indicados pelo fabricante.

O motor síncrono de relutância apresenta valores de eficiência mais elevados do que o motor de indução em todos os testes realizados e menor influência do VSD no seu ciclo de vida útil, sendo por isso a escolha mais acertada.

A utilização do VSD apresenta grandes benefícios energéticos, pois possibilita que o motor funcione em condições ideais para determinada velocidade ou binário de carga, apesar da poluição harmónica que introduz no sistema de potência.

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a ABB. No dia 4 de Julho de 2013, recebemos a visita de várias personalidades do grupo ABB: Joan Soler Abelló; Jukka Hannuksela e Freddy Gyllensten. Os dados foram analisados e validados com grande satisfação e concordância, pois encontram-se de acordo com os dados dos testes realizados pelo fabricante.

## **7.2 Propostas de Trabalho Futuro**

Na sequência desta dissertação, são sugeridos os seguintes temas de investigação:

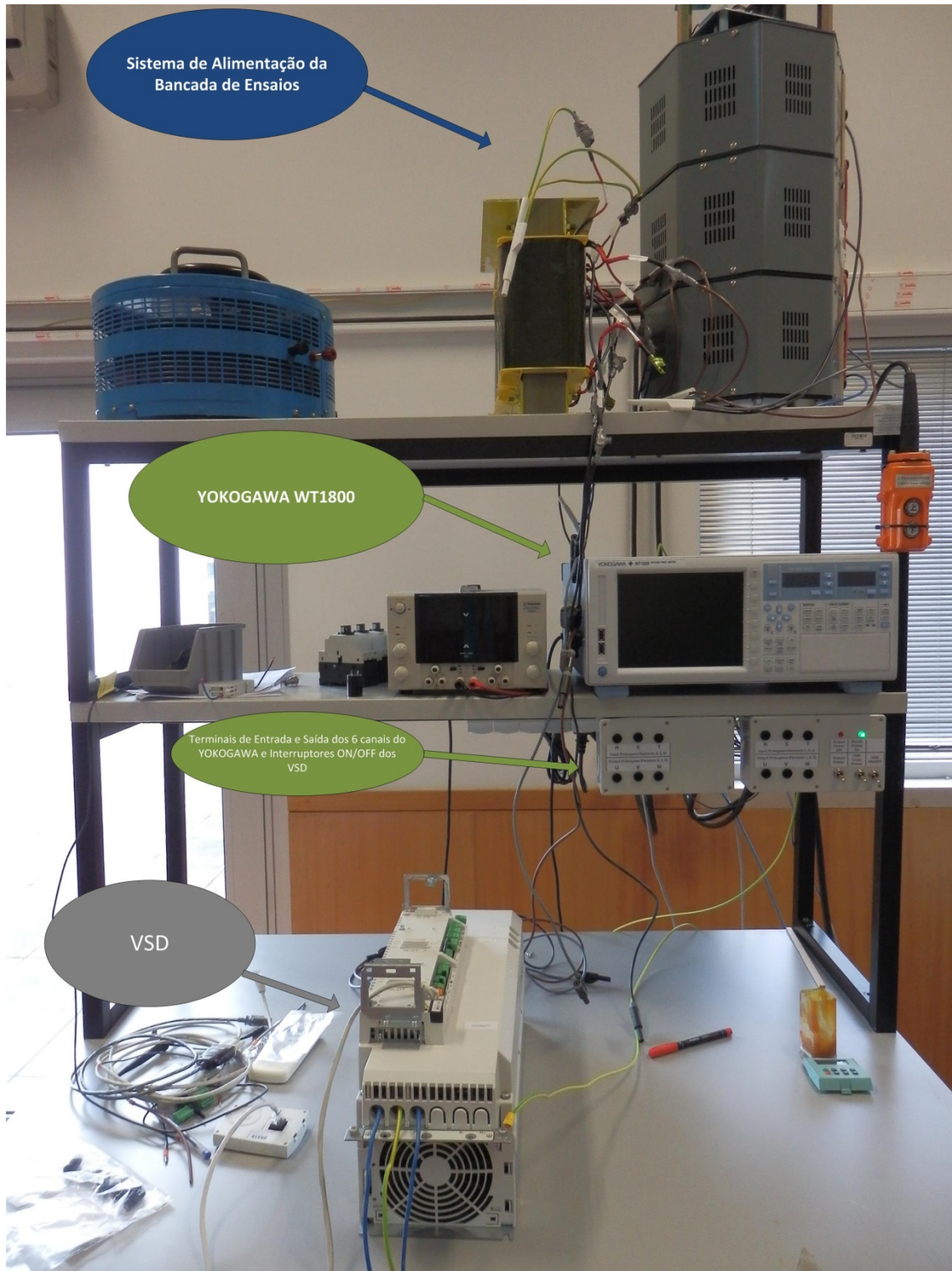
- Análise comparativa de eficiência do conversor nos sistemas de controlo V/f , DTC e em diferentes frequências de comutação;
- Análise da viabilidade da segregação de perdas do motor síncrono de relutância de acordo com a norma IEC 60034-2-1
- Aperfeiçoamento dos métodos de diagnóstico a fim de reduzir os tempos de resposta.

## Bibliografia

- [1] A. T. Almeida, F. E. Ferreira, P. Fonseca, B. Chretien, H. Falkner, J. Reichert, M. West, S. Nielsen e D. Both, "Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives," em *SAVE II Programme 2000*, ISR-University of Coimbra, 2001.
- [2] "IEC 60034-1, Ed.12:Rating and Performance," 2010.
- [3] A. T. Almeida, F. E. Ferreira, P. Fonseca, B. Chretien, H. Falkner, J. Reichert, M. West, S. Nielsen e D. Both, "VSDs for Electric Motor Systems," em *SAVE II Programme 2000*, ISR-University of Coimbra, 2001.
- [4] S. Nadel, R. Elliot, M. Shepard, S. Greenberg e A. T. d. Almeida, *Energy-Efficient Motor Systems: A Handbook on Technology, Program, and Policy Opportunities*, ACE3, 2002.
- [5] P. Waide e C. U. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems," 2011.
- [6] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Mc Graw Hill, 2012.
- [7] A. E. Fitzgerald, J. Charles Kingsley e S. Umans, *Máquinas Elétricas*, Bookman, 6ª Edição.
- [8] "IEC 60034-2-1, Ed. 1: Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard method for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)," 2007.
- [9] "IEC 60034-30, Ed. 1: Rotating electrical machines - Part 30:Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motor," 2008.
- [10] "IEC/TS 60034-31, Ed. 1: Rotating electrical machines - Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications - Application guide," 2010.
- [11] "IEC 60034-2-3, Ed.1, Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors," 2011.
- [12] ABB, "ABB Motors and Generators: Synchronous reluctance motor technology," 2012.
- [13] ABB, "The Motor Guide - basic technical information about low voltage standard motors," 2005.
- [14] A. De Almeida, F. Ferreira, J. Fong e B. Conrad, "Electric Motor Ecodesign and Global Market Transformation," *IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conf., Conf. Proc., Clearwater Beach Florida, USA*, 2008.
- [15] P. Cummings, "Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1986.

- [16] "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std. 519*, 1992.
- [17] W. Stevenson e J. Grainger, *Power System Analysis*, McGraw-Hill International Edition, 1994.
- [18] N. S. P. C. MG, *Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards*, National Electrical Manufacturers Association, 2007.
- [19] G. A. McCoy, T. Litman, J. G. Douglass, W. S. E. Office e W. Olympia, *Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook*, United States of America: Department of Energy, 1993.

## Anexo A1 – Bancada de Ensaios





# Anexo A2 – Estrutura metálica com os motores montados

