

Filipe André Mendes Graça

ENSAIO DE MOTORES ELÉTRICOS

Fevereiro de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Ensaio de Motores Elétricos

Filipe André Mendes Graça

Membros do Júri:

Presidente: Sérgio Manuel Ângelo Cruz

Orientador: Aníbal Traça de Almeida

Fernando J. T. E. Ferreira

Vogal: Pedro Manuel Soares Moura

Fevereiro de 2014

Agradecimentos

Quero deixar um agradecimento especial às várias pessoas que tiveram um impacto direto e indireto na minha motivação para a realização desta dissertação.

Quero agradecer ao Prof. Doutor Aníbal Traça de Almeida, pelo incentivo e por todo o material necessário utilizado para a realização desta dissertação.

Ao Prof. Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira por toda a orientação durante este trabalho e ajuda.

Gostaria também de deixar uma palavra de agradecimento ao Eng. André Quintino por toda a ajuda e boa disposição, preciosa na realização do meu trabalho.

A todos meus amigos e colegas, por terem sido presentes, mesmo nos momentos mais complicados, tiveram sempre uma palavra amiga, de conforto e de motivação necessária para o sucesso no meu percurso académico.

Por fim quero agradecer a toda a minha família, em especial aos meus pais, irmão e madrinha por todas as palavras de incentivo e força para a realização deste trabalho.

Resumo

A motivação para a realização deste trabalho foi o ensaio de um motor que faz parte de uma tecnologia que tem um potencial de penetração na indústria bastante elevado. Assim pretende-se conhecer em pormenor o seu comportamento.

O principal objetivo desta dissertação é a análise/caracterização elétrica de um motor síncrono de relutância de baixa potência, neste caso de 2.2kW, com particular incidência no rendimento, ponto de funcionamento ótimo e limites de velocidade/binário.

No Capítulo 1 foi realizado um pequeno enquadramento teórico relativo aos motores elétricos e aos variadores eletrónicos de velocidade de um modo geral.

No Capítulo 2 foi apresentado detalhadamente a construção, os componentes do motor síncrono de relutância e o seu funcionamento para se ter uma noção do seu comportamento nos ensaios.

O Capítulo 3 pretende mostrar os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais e descrever os ensaios realizados durante este trabalho.

No Capítulo 4 foi descrita a simulação relativa à injeção de harmónicos na alimentação de um motor eléctrico, onde pode observar-se os valores teóricos.

Por sua vez, no Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais obtidos em todos os ensaios relativos ao motor de relutância e ainda a tentativa de validação dos resultados teóricos da injeção de harmónicos.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas e são descritos possíveis trabalhos futuros.

Palavras-chave: motor síncrono de relutância, variador eletrónico de velocidade, rendimento, harmónicos, IEC 60034-2-1

Abstract

The main goal of this thesis is the analyses of reluctance synchronous motor of 2.2kW, with main focus on efficiency, optimal work point, and torque/speed limits following IEC 60034-2-1 standard.

In Chapter 1 a theoretical introduction about electric motors and their efficiency classes and variable speed drive is presented.

Chapter 2 describes in detail the construction and components of a synchronous reluctance motor, in order to understand its behavior during trials.

Chapter 3 describes the testing equipment infrastructure, as well as the description of all the experimental trials.

The Chapter 4 deals with a simulation model dealing with the injection of harmonics and with the connection of an electric motor with a VSD, simulating the motor performance in the above conditions.

On the other hand, The Chapter 5 shows the experimental results obtained from the tested reluctance synchronous motor.

At the end in the Chapter 6 the main conclusions and the possible future work are presented.

Key words: reluctance synchronous motor, variable speed drive, efficiency, harmonics, IEC 60034-2-1

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Motivação.....	5
1.3 Organização da Tese.....	5
2. Motor Síncrono de Relutância	7
2.1 Constituição do Estator.....	7
2.2 Constituição do Rotor.....	8
2.3 Comparação entre tecnologias.....	11
3. Métodos de Ensaio.....	13
4. Simulação e Resultados.....	19
5. Resultados Experimentais	21
5.1 Resultados dos ensaios do rendimento do conjunto (Motor e VSD) em função do regime de carga e da frequência	21
5.2 Rendimento do conjunto motor e variador em função da tensão de alimentação.	33
5.3 Rendimento do conjunto motor e variador em função da frequência de comutação	34
5.4 Limites de velocidade/binário	35
5.5 Injeção de harmônicos na alimentação de um motor	39
6. Conclusões e Trabalho Futuro	43
Referências	45
Anexo A – Equipamentos constituintes da bancada de ensaios.....	47
A.1 Analisador de Potência Yokogawa WT1030M	47
A.2 Motor de indução trifásico WEG IE3 de 7.5kW	48
A.3 Motor de indução trifásico ABB IE3 de 11kW	49

A.4 Variador eletrônico de velocidade ABB ACS850-04 de 25 kW	50
A.5 Analisador de Energia e Potência Chavin Aurnoux 8334B.....	50
A.6 Equipamentos de medida Fluke	51
Anexo B – Modelo de simulação	52
Anexo C – Dados relativos ao conteúdo harmônico	53

Índice de figuras

Fig. 1-Segmentação das tecnologias de motores elétricos	1
Fig. 2-Esquema fragmentado de um variador eletrônico de velocidade.....	4
Fig. 3-Rotor de um motor síncrono de relutância com polos em ponte fixos representados com o X.[10]	8
Fig. 4-Tipos de rotor de um SynRM: a) polo saliente simples b) axial laminado c) transversalmente laminado.[10]	9
Fig. 5-Junção do rotor tipo “ R” e “J” no rotor “Machaon”.[15].....	10
Fig. 6- Fragmentação das perdas nos motores para as diferentes classes de rendimento.[18]	11
Fig. 7- Grupo do motor & VSD/ dinamómetro.....	15
Fig. 8- Esquema da bancada de ensaios para os testes de rendimento do conjunto.....	15
Fig. 9-Esquema da bancada de ensaios para os testes de limite de velocidade/binário.	16
Fig. 10- Configuração da bancada de ensaios na injeção de harmónicos.	17
Fig. 11-Diagrama de blocos do modelo em <i>Simulink</i>	19
Fig. 12-(a) Gráficos de barras dos harmónicos da tensão composta de alimentação (b) gráficos de barras dos harmónicos da corrente de alimentação.	20
Fig. 13-(a) Gráfico de barras dos harmónicos da tensão composta de alimentação (b) gráfico de barras dos harmónicos da corrente de alimentação do motor de 7.5kW.....	20
Fig. 14-Evolução do rendimento do conjunto Motor e VSD em função da carga.....	21
Fig. 15-Evolução do fator de potência do conjunto em função do regime de carga.....	22
Fig. 16-Evolução da corrente medida na entrada do VSD com o regime de carga.	23
Fig. 17- Locais de medição da temperatura na carcaça.	23
Fig. 18-Evolução da temperatura na carcaça local 1 em função da carga.	24
Fig. 19-Evolução da temperatura na carcaça local 2 com regime de carga	25
Fig. 20-Evolução da temperatura ambiente com o regime de carga.	25
Fig. 21-Evolução do gradiente da temperatura na carcaça local 1.....	26
Fig. 22-Evolução do gradiente da temperatura na carcaça local 2 com o regime de carga.	26
Fig. 23-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador às condições nominais. 28	
Fig. 24-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador às condições nominais.	28
Fig. 25-Estrutura do rotor e do estator do SynRM de 2.2 kW da Kaiser.	29

Fig. 26-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador à 25% da carga nominal sendo alimentado a 400 V/50 Hz.....	30
Fig. 27-Segmentação dos harmônicos de corrente na entrada do variador a 25 % da carga nominal sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.....	30
Fig. 28-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador a 24% da carga nominal sendo alimentado a 400 V/ 24.2 Hz.....	31
Fig. 29-Segmentação dos harmônicos de correntes medidos na entrada do variador a 24% da carga nominal sendo alimentado a 400 V/24.2 Hz.....	32
Fig. 30-Otimização do ponto de funcionamento nominal do conjunto em função da tensão de alimentação.....	33
Fig. 31-Rendimento em função da frequência de comutação.	34
Fig. 32-Evolução do binário em função da frequência de alimentação.	35
Fig. 33-Evolução da potência mecânica em função da frequência de alimentação.	36
Fig. 34-Evolução do rendimento em função da frequência de alimentação.	36
Fig. 35-Evolução do fator de potência do motor em função da frequência de alimentação.	37
Fig. 36-Característica da curva V/f para a ligação em triângulo.....	37
Fig. 37- Evolução da tensão fundamental eficaz de alimentação do motor em função da frequência de alimentação.	38
Fig. 38- Relação entre a tensão fundamental e total em função da frequência.	38
Fig. 39-Harmônicos de tensão da alimentação de um motor de 7.5 kW em vazio.....	39
Fig. 40-Harmônicos de corrente da alimentação de um motor de 7.5 kW em vazio.	39
Fig. 41-Segmentação dos harmônicos de tensão na alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em vazio e variador.....	40
Fig. 42-Segmentação dos harmônicos de corrente na alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em vazio e variador.....	40
Fig. 43-Segmentação dos harmônicos de tensão na alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em carga e variador.....	41
Fig. 44-Segmentação dos harmônicos de corrente da alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em carga e variador.....	41
Fig. 45- Imagem do analisador de potência utilizado nos ensaios do rendimento e limite de velocidade/binário.	47
Fig. 46-Motor de teste da injeção de harmônicos.	48
Fig. 47-Motor de indução usado no paralelo.....	49
Fig. 48- Variador eletrónico de velocidade utilizado no paralelo com o motor de indução de 11 kW.	50

Fig. 49-Analisador de potência utilizado para analisar harmônicos da alimentação do motor de indução.	50
Fig. 50-Equipamentos de medida utilizados.	51
Fig. 51-Esquema de blocos do variador eletrônico de velocidade.....	52
Fig. 52-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador a 75 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.....	53
Fig. 53-Segmentação dos harmônicos de corrente na entrada do variador a 75 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.....	53
Fig. 54-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador a 50 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.....	54
Fig. 55-Segmentação dos harmônicos de corrente na entrada do variador a 50 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.....	54
Fig. 56-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador a 49 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 24,2 Hz.....	55
Fig. 57-Segmentação dos harmônicos de corrente na entrada do variador a 49 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 24,2 Hz.....	55
Fig. 58-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador a 26 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 10,8 Hz.....	56
Fig. 59-Segmentação dos harmônicos de corrente na entrada do variador a 26 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 10,8 Hz.....	56

Lista de tabelas

Tabela 1-Evolução das classes de rendimento segundo a norma IEC 60034-30 [4].	2
Tabela 2-Rendimento das classes de rendimento em função da potência e do número de pólos.[4]	3
Tabela 3- Características nominais do motor síncrono de relutância.....	14
Tabela 4- Características máximas do dinamómetro de histerese.....	14
Tabela 5- Características do variador eletrónico de velocidade.....	14
Tabela 6- Harmónicos de correntes mais relevantes.	Erro! Marcador não definido.
Tabela 7- Harmónicos de corrente e tensão em função do harmónico fundamental e THD de cada fase no funcionamento às condições nominais do motor.	27
Tabela 8- Harmónicos de corrente e tensão e THD de cada fase no funcionamento a 25% de carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.....	29
Tabela 9- Harmónicos de corrente e tensão e THD de cada fase no funcionamento a 24% de carga sendo alimentado a 400/24.2 Hz.	31
Tabela 10- Características do motor de indução trifásico de teste.....	48
Tabela 11- Características do motor do paralelo.....	49
Tabela 12- Limites mínimos de precisão dos equipamentos de medida da norma 60034-2-1.	51

Lista de símbolos

η	Rendimento	%
P_{ele}	Potência elétrica	W
P_{mec}	Potência mecânica	W

Índices e expoentes

dq Relativo a grandezas expressas em eixos dq

Abreviaturas

AC	<i>Alternated Current</i> - Corrente Alternada
CEMEP	<i>European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power systems</i> – Comissão Europeia de Máquinas Elétricas e Sistemas de Potência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> – Comissão Internacional Eletrotécnica
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar de Porta Isolada
MIT	<i>Three Phase Induction Motor</i> – Motor de Indução Trifásico
PMSM	<i>Permament Magnet Synchronous Motor</i> – Motor Síncrono de Ímanes Permanentes
SynRM	<i>Reluctance Synchronous Motor</i> – Motor Síncrono de Relutância
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> - Distorção Harmónica Total
VSD	<i>Variable Speed Driver</i> – Variador Eletrónico de Velocidade

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Devido aos problemas que o mundo contemporâneo enfrenta com o aumento do consumo de energia elétrica e uso de combustíveis fósseis, devemos tomar medidas e decisões para atenuar este impacto.

Para se mitigar estes efeitos, deve-se reduzir o consumo de energia, através da construção e uso de motores elétricos mais eficientes, visto que estes contribuem com um consumo de 43% a 46% de toda a eletricidade consumida a nível mundial [1]. Dado que a indústria é o sector que utiliza a grande parcela da energia elétrica, as suas principais aplicações são em bombas, ventiladores, prensas, elevadores entre outras. Estas aplicações têm todo o interesse em utilizar motores elétricos que apresentem um rendimento elevado com o intuito de se reduzir o consumo de energia e assim exista uma poupança financeira significativa [2].

Na Fig. 1 é apresentada a segmentação dos motores elétricos, sendo que o mais utilizado na indústria é o motor de indução trifásico, contudo existem algumas tecnologias emergentes que prometem revolucionar o mercado dos motores elétricos.

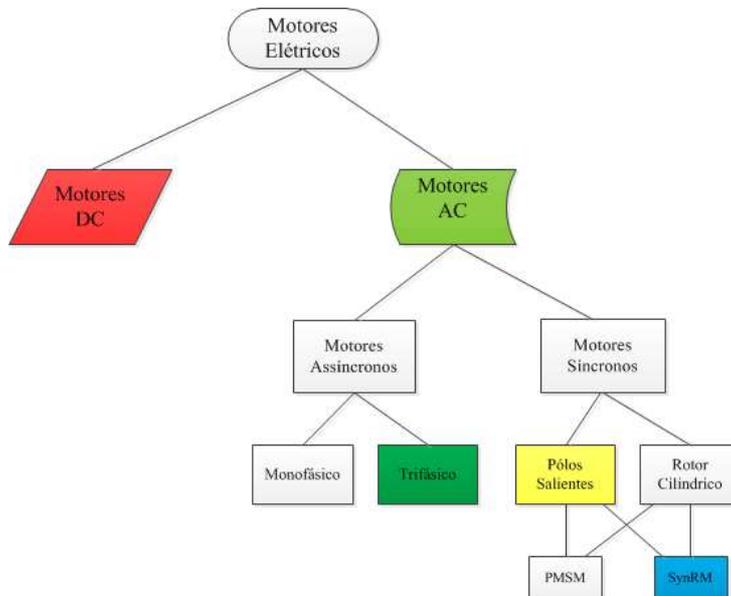


Fig. 1-Segmentação das tecnologias de motores elétricos

A indústria tinha como principal carga o motor elétrico, por isso sentiu necessidade de definir um padrão internacional que tem como base a norma IEC 60034-30 [3], que engloba todas as classes de rendimento de motores de uso geral, alimentados da rede, trifásicos e motores de indução. Nesta norma foi definida e foram testadas as classes de rendimento dos motores de indução com velocidade única, resultando nas classes da Tabela 1.

Tabela 1-Evolução das classes de rendimento segundo a norma IEC 60034-30 [4].

Classes de Rendimento	CEMEP	IEC 60034-30
<i>Super Premium</i>		IE4
<i>Premium</i>		IE3
Elevado	EFF1	IE2
<i>Standart</i>	EFF2	IE1
Abaixo do <i>Standart</i>	EFF3	

A ordem numérica das classes de rendimento dos motores elétricos é ascendente começando numa classe de rendimento mais baixa IE1 até à classe com uma maior rendimento IE4. As classes IE anteriormente mencionadas estão associadas a um determinado rendimento consoante o número de polos, no caso da União Europeia 2, 4 e 6 polos, tensão nominal até 1000 V, potência nominal entre 0,75 kW e 375 kW e funcionamento, com as classes de serviço, em regime contínuo S1 ou em regime S3 com um fator cíclico de duração igual ou superior a 80% do tempo de funcionamento [4] , como pode ser observado na

Tabela 2.

Tabela 2-Rendimento das classes de rendimento em função da potência e do número de pólos.[4]

Potência	IE1- Rendimento <i>Standart</i>			IE2- Alto Rendimento			IE3- Rendimento <i>Premium</i>			IE4- Rendimento <i>Super Premium</i>		
	Pólos			Pólos			Pólos			Pólos		
kW	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9	83,5	85,7	82,7
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0	85,2	87,2	84,5
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5	86,5	88,2	85,9
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3	88,0	89,5	86,8
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6	89,1	90,4	87,9
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8	90,0	91,1	89,1
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0	90,9	91,9	90,1
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1	91,7	92,6	91,3
11	87,0	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3	92,6	93,3	92,3
15	88,7	88,6	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2	93,3	93,9	92,9
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7	93,7	94,2	93,4
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2	94,0	94,5	93,7
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9	94,5	94,9	94,2
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3	94,8	95,2	94,5
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7	95,0	95,4	94,8
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1	95,3	95,7	95,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6	95,6	96,0	95,4
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9	95,8	96,1	95,6
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1	96,0	96,3	95,8
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4	96,2	96,4	96,0
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6	96,3	96,6	96,1
Entre 200 e 375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8	96,5	96,7	96,3

Com base na norma IEC 60034-2-1, os valores do rendimento apresentados, na tabela 2, foram determinados com a temperatura do meio ambiente igual a 25°C.

Para além do rendimento do motor elétrico, aquando da instalação do equipamento para uma dada aplicação, deve conhecer-se as classes de serviço, as quais vão ser apresentadas.

A classe de serviço S1 significa que o funcionamento é contínuo, logo têm-se todo o interesse que o motor seja o mais eficiente possível e que o fator de potência seja aproximadamente unitário para que as perdas por efeito de Joule na aplicação sejam minimizadas.

Numa classe de serviço intermitente o rendimento do motor não tem um impacto tão relevante, pois existe um maior consumo de energia devido à inércia e às elevadas correntes de arranque, podendo reduzir-se o consumo de energia elétrica através do uso de VSD (*variable speed drive*) como se pode observar na Fig. 2. Isto é possível através de um aumento em rampa do valor da tensão, sendo que esta varia linearmente com a frequência [5]. Este facto permite aumentar a vida útil do motor, visto que este não vai ser sujeito a esforços térmicos elevados



Fig. 2-Esquema fragmentado de um variador eletrônico de velocidade.

O VSD trata-se de um dispositivo de grande utilidade pois tem capacidade de regular o binário e assim permite um controlo e uma proteção tanto do motor como do VSD e ainda do lado da rede elétrica, permitindo assim que esta não sofra perturbações. Assim o VSD apenas gasta a energia necessária, pelo que é um equipamento bastante eficiente [6]. No entanto, como qualquer dispositivo, a utilização do variador apresenta desvantagens como interferência eletromagnética que pode ser atenuada utilizando cabos blindados. [7]

As normas existentes para o ensaio de motores elétricos apresentam diferentes métodos consoante o motor elétrico em teste e ainda a forma de alimentação do mesmo. Para os ensaios realizados durante este trabalho a norma utilizada foi a IEC-60034-2-1 de Janeiro de 2013.

No caso de um motor de indução os métodos mais utilizados são:

- Direto
- Indireto com a segregação de perdas

Por outro lado, os principais métodos de ensaio de um motor síncrono são:

- Direto
- Indireto com segregação de perdas à carga nominal com estabilidade térmica, em vazio e em curto-circuito.

O método direto é um dos mais utilizados devido à facilidade de medição da rendimento do equipamento em causa, seja apenas o motor ou o conjunto variador mais motor, em que só é necessário medir a potência mecânica e a potência elétrica.

$$h = \frac{P_{mec}}{P_{ele}}, \quad (1.1)$$

onde h é o rendimento, P_{mec} é a potência mecânica disponível no veio e P_{ele} é a potência elétrica fornecida

1.2 Objetivos e Motivação

Os objetivos desta dissertação numa primeira fase é a determinação do rendimento para várias velocidades e regimes de carga de um motor síncrono de relutância de 2.2 kW, que não tinha classe de rendimento na chapa de características. O segundo objetivo foi conhecer os limites de velocidade/binário deste motor para perceber as principais diferenças eletromecânicas existentes na comutação de estrela-triângulo.

A motivação para este trabalho foi a possibilidade de testar um motor síncrono de relutância, uma tecnologia interessante que a curto prazo pode ser bastante utilizada na indústria.

Por último foi realizada uma simulação teórica de um método para a injeção de harmónicos na alimentação de um motor de 7.5kW, para o teste de proteções. O pretendido era saber se existisse um aumento do conteúdo harmónico de que forma se comportavam as proteções.

1.3 Organização da Tese

A tese está estruturada de forma a que no capítulo 1 seja feito um enquadramento teórico dos motores elétricos, variador eletrônico de velocidade e respetivos ensaios, no capítulo 2 é realizada uma definição teórica do motor síncrono de relutância e ainda comparação desta tecnologia com as restantes tecnologias. O capítulo 3 é composto pela descrição da bancada de ensaios e pela respetiva explicação dos ensaios realizados ao longo da dissertação.

No capítulo 4 foi apresentada a simulação e todos os resultados teóricos obtidos nos vários testes relevantes do modelo relativos à injeção de harmónicos.

No capítulo 5 foi apresentado os resultados experimentais relativos aos ensaios do rendimento do conjunto motor e variador eletrônico de velocidade em função do regime de carga e frequência de alimentação, otimização do rendimento do conjunto em função da tensão de alimentação, otimização do rendimento do conjunto em função da frequência de comutação do variador à carga nominal, dos limites de binário/velocidade do motor e por fim a validação experimental dos valores obtidos da simulação experimental. Por último, no capítulo 6 são apresentadas as principais ilações resultantes de toda a dissertação e ainda é descrito o trabalho futuro.

2. Motor Síncrono de Relutância

O motor síncrono de relutância-SynRM data ao ano de 1960, em que este tinha uma gaiola de esquilo para o arranque direto da rede. Devido ao fraco do desenvolvimento do seu *design* este motor apresentava uma baixa desempenho comparativamente ao motor de indução que já estava bem desenvolvido [8]. Mas este nos últimos anos ganhou grande popularidade devido ao desenvolvimento de novos esquemas de *design*. Os seus pontos fortes são uma estrutura simples e robusta, rendimento elevado, baixo ruído e menor *ripple* no binário [8] [9] e não existe regulação de velocidade, pois este roda sempre à velocidade síncrona.

O SynRM devido à sua característica de binário não permite um arranque direto, a não ser que tenha uma gaiola de esquilo com enrolamentos amortecedores[10], [11].

Por sua vez como todas as tecnologias tem sempre aspetos menos positivos, como o baixo fator de potência, no entanto este parâmetro pode ser melhorado através de múltiplas barreiras de fluxo e laminação axial anisotrópica [12] [13] .

O motor síncrono de relutância é composto por uma parte estática, conhecida como estator e por uma parte rotativa conhecida como rotor, que foram alvo de uma análise detalhada.

2.1 Constituição do Estator

O estator do SynRM é semelhante ao estator da máquina de indução, em que os enrolamentos estão desfasados espacialmente 120° visto que são alimentados por um sistema de tensões trifásico. Sendo que no caso dos motores da ABB, é possível trocar o rotor de um motor de indução por um de relutância da mesma dimensão. O circuito magnético do estator deve ser feito de material com elevada permeabilidade, para permitir que as perdas sejam reduzidas.

2.2 Constituição do Rotor

A parte rotativa da máquina (rotor) é constituída por um conjunto de chapas magnéticas empilhadas e barreiras de fluxo. Na Fig. 3 é representada uma chapa típica do rotor de um motor SynRM.

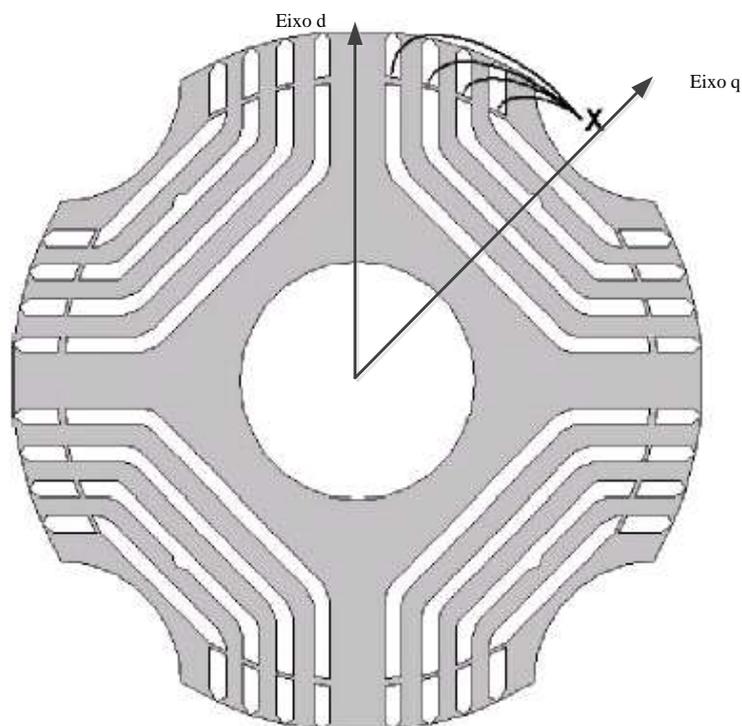


Fig. 3-Rotor de um motor síncrono de relutância com polos em ponte fixos representados com o X.[10]

Este rotor não tem qualquer enrolamento ou ímãs permanentes, levando a que as perdas por efeito de Joule no rotor sejam aproximadamente nulas [14]. A estrutura de chapas e barreiras de fluxo é realizada de forma a maximizar o rácio entre as indutâncias segundo os eixos direto e em quadratura, saliência, para assim durante o regime síncrono otimizar a sua performance [9].

Segundo a teoria clássica das máquinas elétricas o eixo d deve ser alinhado com os eixos do fluxo magnético com o objetivo de maximizar a indutância segundo este eixo, por outro lado o eixo q deve ser alinhado com as barreiras de fluxo de modo a minimizar a indutância segundo o eixo q de forma a termos uma saliência infinita [15], esta não pode ser infinita pois as barreiras de fluxo não são impermeáveis [16].

A densidade de fluxo segundo o eixo d distribui-se maioritariamente no rotor, apresentando valores médios de 1.55 T, sendo que apenas uma pequena parte das linhas de fluxo atravessam as barreiras de fluxo. Por outro lado se a excitação for segundo o eixo q os valores da densidade de fluxo no estator e no rotor são bastante reduzidos [8].

Assim existem várias configurações para o rotor do motor como pode ser observado na Fig. 4.

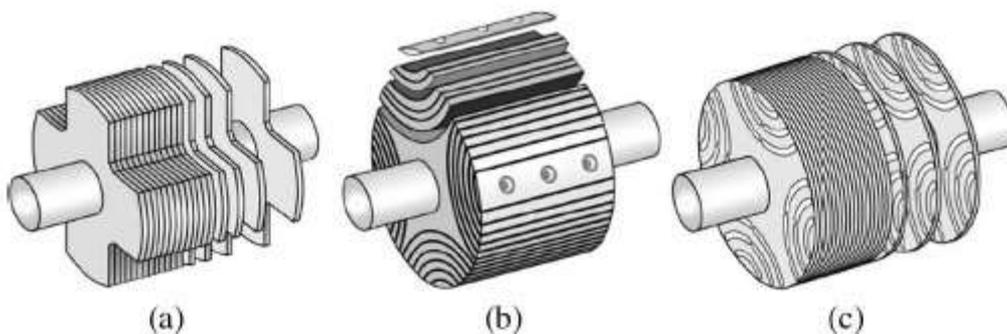


Fig. 4-Tipos de rotor de um SynRM: a) polo saliente simples b) axial laminado c) transversalmente laminado.[10]

A laminação axial apresenta uma grande anisotropia, grandes valores do rácio de saliência e está sujeita a maiores *stress* mecânicos do que a laminação transversal. Por sua vez, a laminação transversal apresenta bons resultados em aplicações dinâmicas, grande densidade de binário e capacidade de tolerância a falhas. A grande densidade de binário está diretamente relacionada com a sua estrutura, com a quantidade e posicionamento das barreiras de fluxo [17].

As barreiras são um componente importante para o desempenho do SynRM, estas são projetadas conforme o número de ranhuras do estator. A espessura das barreiras de fluxo vai influenciar as indutâncias segundo o eixo direto e em quadratura, se esta aumentar ambas as indutâncias vão diminuir. O seu posicionamento, também, é um fator a ter em conta visto que este

tem influência no *ripple* do binário, sendo de boa prática minimizar o mesmo [8]. As barreiras de fluxo são normalmente feitas de ar, contudo podem ser feitas de um material condutor.

O entreferro deve ser reduzido para que o binário produzido pelo motor seja elevado. O comprimento do entreferro do SynRM é similar ao do MIT [12].

As barreiras de fluxo apresentam diversas geometrias sob os polos, tais como o rotor “J” e “R” ou mesmo uma combinação de diferentes geometrias que deu origem ao rotor “Machaon”, conforme é apresentado na Fig. 5 Este rotor “Machaon” tem um custo de fabrico elevado.

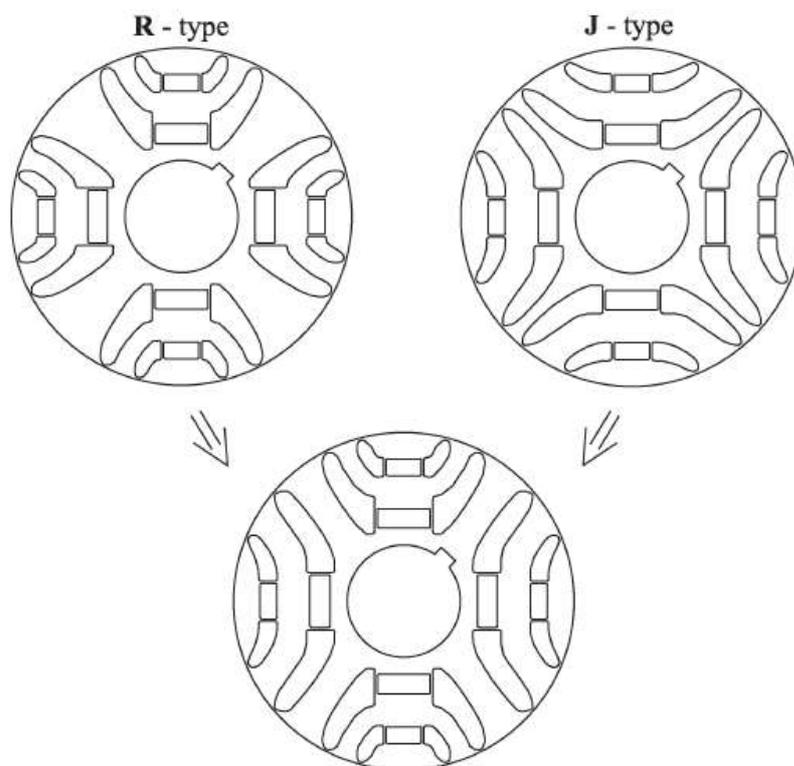


Fig. 5-Junção do rotor tipo “R” e “J” no rotor “Machaon”. [15]

O *ripple* do binário no SynRM é o resultado da interação entre o fluxo estatórico e a variação de relutância do rotor denominado como binário de relutância. Existem duas formas possíveis de a redução de *ripple*, através do *design* do rotor, a mais interessante e ao nível da corrente de excitação. A principal técnica utilizada é o *skewing*, que pode ser feito quer do lado do estator quer no lado do rotor, pois conduz a iguais efeitos eletromagnéticos na diminuição do *ripple* do binário. Este fenómeno reduz a variação da relutância “observada” pelo campo magnético estatórico, logo reduz o *ripple* mas vai aumentar as indutâncias de fugas, perdas extraviadas e complicar a estrutura do estator.

Com o intuito de reduzir a pulsação do binário pode-se atuar em termos estruturais com um aumento do número de ranhuras do estator, para além do número também, interessa se é um número par ou ímpar, sendo que em número ímpar apresenta uma menor pulsação [15] .

2.3 Comparação entre tecnologias

O motor síncrono de relutância comparativamente ao motor de indução e ao motor síncrono de ímãs permanentes, apresenta vantagens que lhe permite ser mais indicado para os acionamentos AC, nomeadamente ao nível do preço final, uma vez que não requer ímãs permanentes que podem desmagnetizar levando à ocorrência de sobreaquecimento e ou avarias, ou excitação no rotor originando um menor aquecimento que tem como consequência um aumento da vida útil do isolamento e dos enrolamentos, utiliza menos material ferromagnético que o motor de indução e não tem perdas no rotor como é apresentado na Fig. 6, apresenta uma vantagem ao nível da inércia que se consegue reduzir na ordem dos 30 a 50 %, uma vez que não possui gaiola ou ímãs no rotor. Por fim, o seu peso é inferior ao das tecnologias anteriormente apresentadas. Este não tem frequência de deslizamento como o MIT, visto que este último apresenta problemas ao nível da sensibilidade dos seus parâmetros elétricos [9].

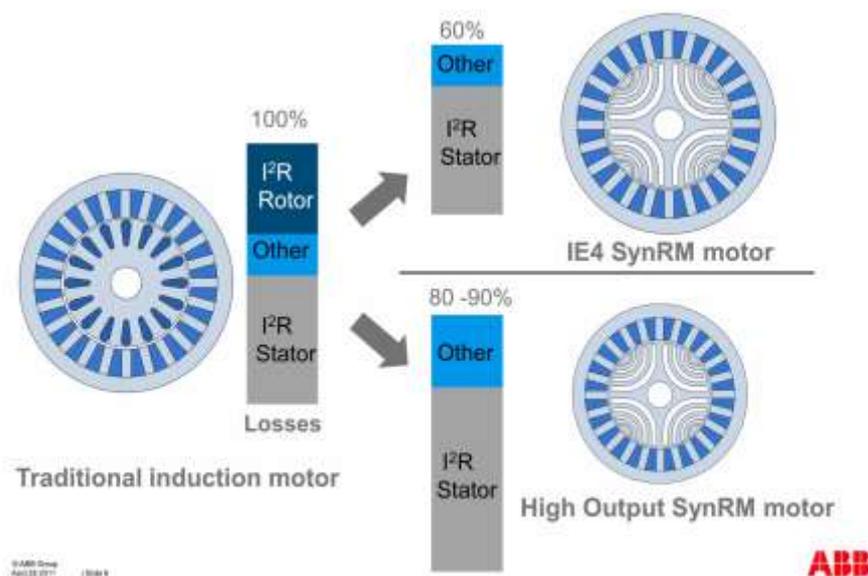


Fig. 6- Fragmentação das perdas nos motores para as diferentes classes de rendimento.[18]

No entanto, apresenta também, uma desvantagem, pois este necessita de intensidade de corrente superior para o mesmo binário produzido, visto que a magnetização do rotor é apenas realizada pelo estator.

O *design* do rotor do motor síncrono de relutância consegue mitigar as desvantagens do motor de relutância comutada, pois este é um motor com um binário com bastante *ripple* e um grande desconforto auditivo devido ao ruído durante o seu funcionamento, fator pelo qual é considerado inadequado para a indústria. Estas desvantagens são causadas devido à sua construção, utilizando um conceito ao nível dos enrolamentos e uma forma de onda da corrente não sinusoidal. Esta mitigação pode ser resolvida utilizando a laminação transversal para se cancelar os harmónicos de uma determinada ordem e compensar todos os outros [17] .

3. Métodos de Ensaio

A bancada de ensaios utilizada durante a dissertação cumpre as normas IEC- 60034-2-1, uma vez que a precisão de todos os equipamentos está dentro dos limites definidos pela norma. O método utilizado foi o teste do dinamómetro através de leituras diretas. Os equipamentos utilizados para os ensaios realizados foram os seguintes:

- Motor síncrono de relutância de 2.2kW da Kaiser
- Motor de indução IE3 de 7.5 kW da WEG
- Variador eletrónico de velocidade 8200 da Lenze
- Autotransformador /Alimentação trifásica
- Dinamómetro de histerese Magtrol HD-815-8NA com ventilador
- Analisador de Potência Yokogawa WT1030M
- Pinça amperimétrica Fluke CNX a3000
- Medidor de temperatura por infravermelhos Fluke 63
- Multímetro Fluke CNX 3000
- Motor de indução IE3 de 11 kW da ABB
- Variador eletrónico de velocidade ABB ACS850-04 de 22 kW
- Analisador de Energia e Potência Chavin Aurnoux 8334B

As principais características do motor SynRM, do dinamómetro de histerese e do variador de velocidade são apresentadas nas tabelas 3, 4 e 5 respetivamente. Na Fig. 7 é apresentada a montagem experimental do motor SynRM dinamómetro e VSD. Os outros equipamentos utilizados no decorrer deste trabalho, são apresentados no Anexo A.

Tabela 3- Características nominais do motor síncrono de relutância

Binário	14 Nm
Potência	2200 W
Velocidade	1500 rpm
Tensão	380 V
Corrente	9,5 A
Fator de Potência	0.47 (ind)
Número de Pólos	4
Rendimento	74,90%
Momento de Inércia	0.0240 Kgm ²

Tabela 4- Características máximas do dinamómetro de histerese.

Binário	28 Nm
Potência	6000 W
Velocidade	12000 rpm
Momento de Inércia	1,19x10 ⁻² kgm ²
Arrefecimento	Ar (Ventilador)

Tabela 5- Características do variador eletrónico de velocidade

Potência	5,7 kW
Tensão	400 V
Controlo	V/f, controlo vetorial
Frequência de Saída	Superior a 650 Hz
Frequências Comutação	2,4,8,16 kHz

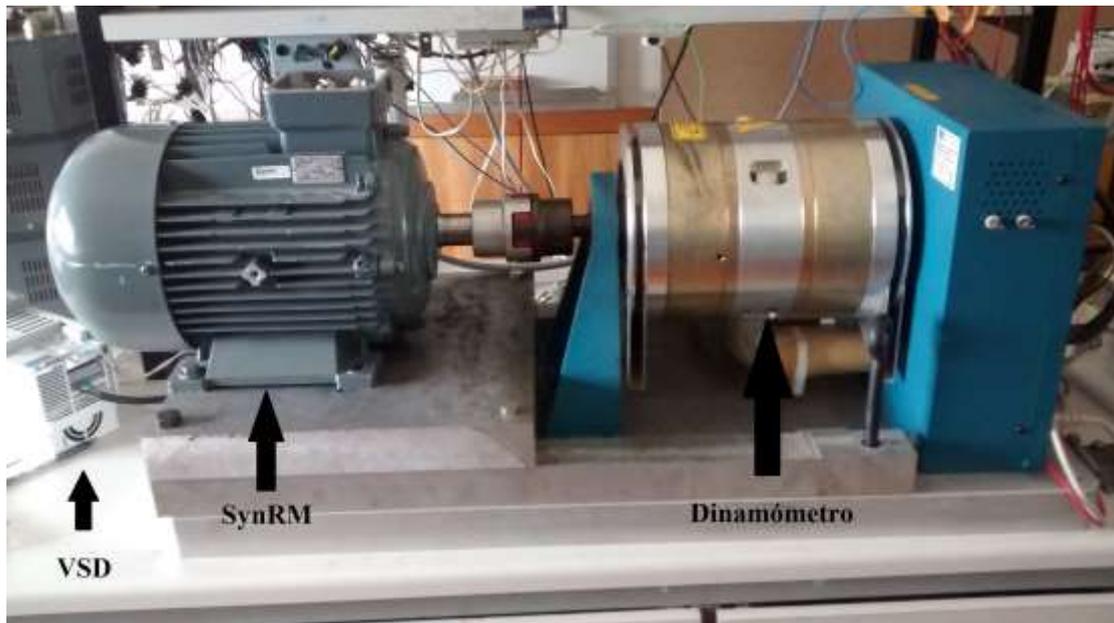


Fig. 7- Grupo do motor & VSD/ dinamómetro.

Como apresentado na Fig. 7 o motor foi acoplado ao dinamómetro, que é refrigerado pelo ventilador. Anteriormente já tinha sido realizada a ligação do autotransformador à alimentação do variador, que por sua vez é ligado na entrada do analisador de potência. O controlo da bancada é realizado através do controlo da corrente que é proporcional ao binário, este é realizado através de uma fonte de alimentação. O binário foi lido com precisão no analisador de potência.

Os equipamentos acima mencionados foram dispostos em duas configurações diferentes. A configuração utilizada para realizar os testes de rendimento do conjunto motor e VSD é representada esquematicamente na Fig. 8.



Fig. 8- Esquema da bancada de ensaios para os testes de rendimento do conjunto.

Com recurso a bancada de ensaios anteriormente descrita, os ensaios do rendimento do conjunto motor de relutância síncrono de 2.2 kW e VSD foram realizados para várias frequências e para cada frequência foram testados diferentes regimes/fator de carga. As frequências utilizadas foram: 50 Hz, 37.5 Hz, 24,2 Hz e 10.8 Hz. Os regimes de carga foram 100%, 75%, 50% e 25%, no entanto nem sempre foi possível atingir o regime de carga pretendido devido ao limite elétrico da máquina (corrente nominal do motor). Os ensaios tinham como finalidade obter grandezas elétricas, mecânicas e eletromagnéticas do conjunto motor e VSD para posterior análise.

Com recurso ao analisador de potência, as grandezas elétricas retiradas foram: as tensões e correntes de cada fase, suas componentes fundamentais e harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem, potência elétrica e fator de potência do conjunto motor mais variador eletrônico de velocidade. Os parâmetros mecânicos retirados foram o binário eletromagnético produzido pelo motor e a potência mecânica acessível no veio do mesmo.

Com recurso a um medidor de temperatura por infravermelhos foi possível medir a temperatura em dois locais da carcaça e ainda a temperatura ambiente. Todos os resultados e medições foram realizados após a estabilização da temperatura do motor elétrico, ou seja, não pode existir uma variação de temperatura superior a 2°C, durante uma hora.

Ainda foram realizados ensaios de rendimento com o objetivo de determinar o ponto ótimo de funcionamento do conjunto motor e variador aos 50 Hz e à carga nominal variando a tensão de alimentação do conjunto em cerca de $\pm 10\%$. Os dados obtidos destes ensaios foram considerados quando existia estabilização térmica.

Com a mesma configuração de bancada ainda foram realizados ensaios às condições nominais do motor e em estabilidade térmica para determinar o rendimento do conjunto motor e variador, variando a frequência do variador eletrônico de velocidade. As frequências disponíveis no VSD e testadas foram respetivamente: 2,4, 8 e 16 kHz.

Na Fig. 9 pode-se observar uma configuração da bancada de ensaios para a segunda fase de testes realizados



Fig. 9-Esquema da bancada de ensaios para os testes de limite de velocidade/binário.

Na segunda fase de ensaios realizou-se para uma gama de frequências de alimentação entre os 6.25 Hz e os 87.5 Hz. Para cada frequência testada aumentou-se o binário até atingir a corrente nominal, que para este ensaio foi o critério utilizado. Para cada teste foram registados as correntes e tensões de cada fase, binário, potência elétrica, fator de potência, potência mecânica, apenas do motor elétrico. Na primeira fase de ensaios os enrolamentos do estator estavam ligados em estrela e posteriormente foram ligados em triângulo.

Por fim foram realizados ensaios com o intuito de verificar a injeção de harmônicos no motor de indução de 7.5 kW através de um paralelo de um motor e um variador, como pode ser visto na Fig. 10.

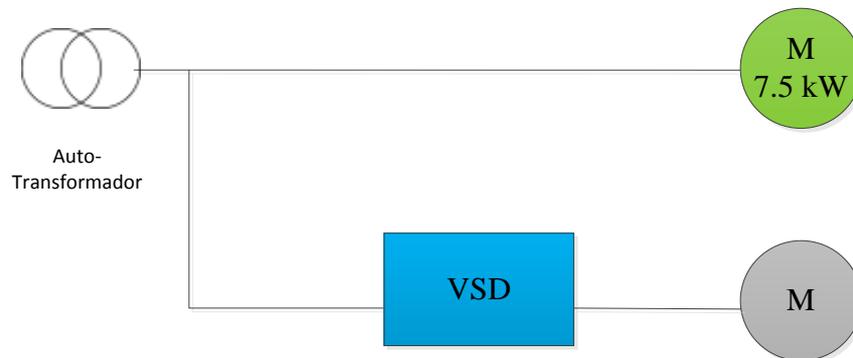


Fig. 10- Configuração da bancada de ensaios na injeção de harmônicos.

Numa primeira fase foram medidos os harmônicos de corrente e de tensão até à ordem 50 de cada uma das fases com o motor a ser alimentado pelo autotransformador e a funcionar em vazio, em seguida foi ligado em paralelo um variador eletrônico de velocidade e o motor síncrono de relutância sem carga numa primeira fase e por fim foi realizado um ensaio em carga do motor síncrono de relutância.

4. Simulação e Resultados

O modelo de simulação, apresentado na Fig. 11, foi desenvolvido com recurso à *toolbox Simulink* e o qual pretende determinar qual é a influência do conjunto motor e variador eletrônico de velocidade na injeção de conteúdo harmónico para o motor de 7.5 kW, correspondente à parte final do trabalho prático.

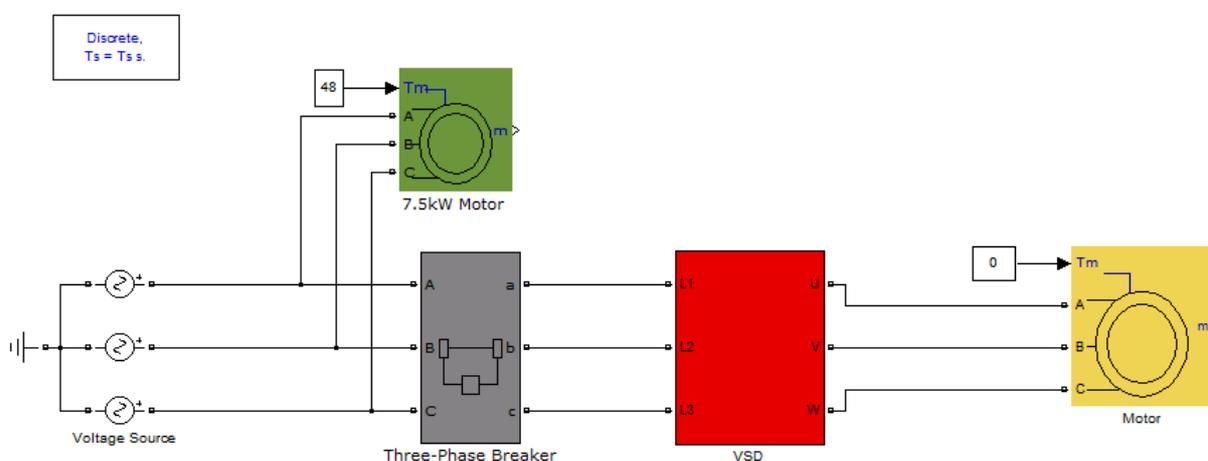


Fig. 11-Diagrama de blocos do modelo em *Simulink*.

O modelo considera a alimentação trifásica paralela do motor de 7.5 kW e do conjunto motor e variador de velocidade. Este conjunto é precedido de um contactor trifásico para que exista separação elétrica entre o motor de 7.5 kW e o conjunto motor e variador de velocidade.

No primeiro teste realizado o contactor esteve aberto, para analisar apenas o conteúdo dos harmónicos da tensão e da corrente da alimentação do motor de 7.5 kW. Os harmónicos da tensão e da corrente estão representados nas Fig. 12 (a) e (b), respetivamente. Estes foram calculados para uma frequência de 50 Hz, durante 50 períodos, começando a amostrar a partir de 1 segundo, até aos 3 segundos para evitar o regime transitório.

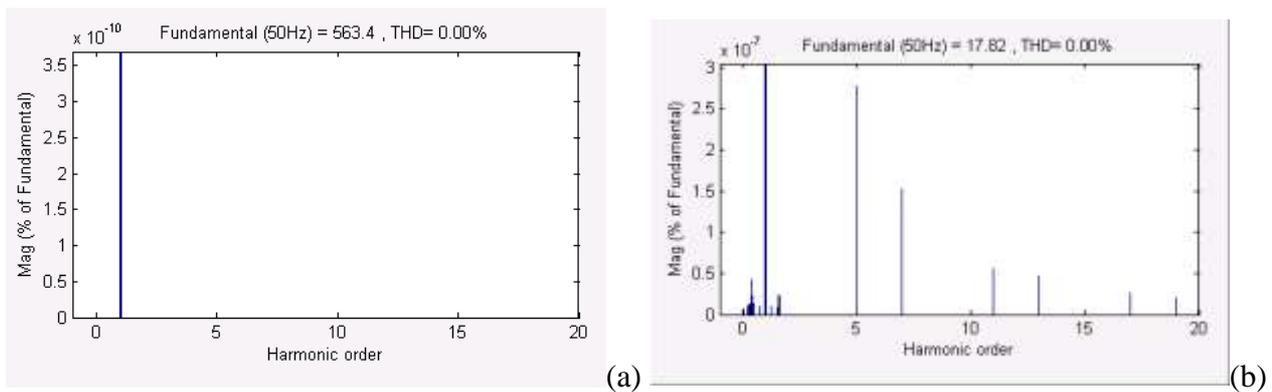


Fig. 12-(a) Gráficos de barras dos harmônicos da tensão composta de alimentação (b) gráficos de barras dos harmônicos da corrente de alimentação.

Por sua vez, no segundo teste, o contactor foi fechado, para analisar a influência que o conjunto motor de 15 kW e variador de velocidade introduziu nos harmônicos de tensão e de corrente do motor de 7.5 kW. Os resultados obtidos estão representados na Fig. 13.

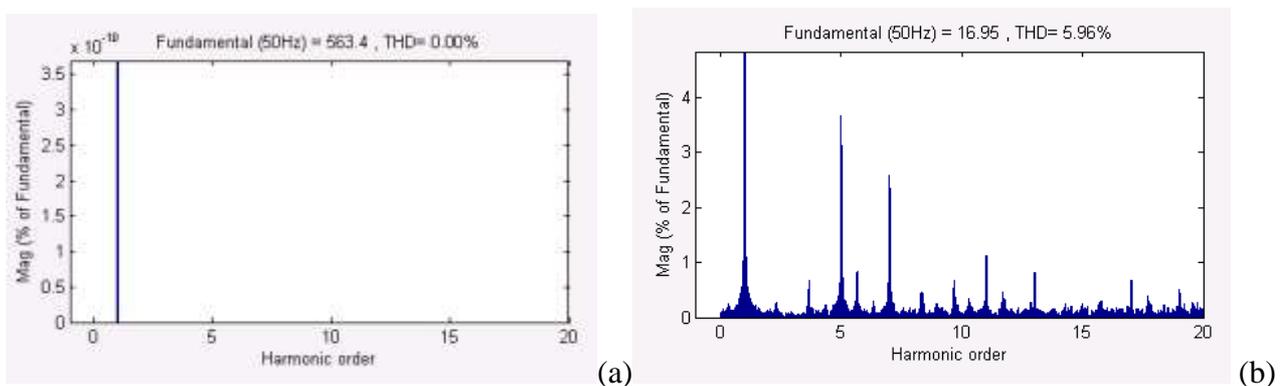


Fig. 13-(a) Gráfico de barras dos harmônicos da tensão composta de alimentação (b) gráfico de barras dos harmônicos da corrente de alimentação do motor de 7.5kW.

Da observação da Fig. 12 (a) e da Fig. 13 (a), verifica-se que o funcionamento do conjunto motor de 15 kW e VSD não tem influência nos harmônicos da tensão de alimentação do motor de 7.5 kW. No entanto comparando com os resultados da Fig. 12 (b) e na Fig. 13 (b) é visível um aumento inferior a 5% em relação à amplitude do termo fundamental em todos os harmônicos ímpares e também existe um aumento do THD. Pelo que pela análise dos resultados obtidos parece não existir a injeção significativa de conteúdo harmónico, pelo que este método não parece ser eficaz.

Em suma não foi possível observar qualquer variação nos harmônicos de tensão, os quais se pretendia injetar, já ao nível dos harmônicos de corrente parece existir uma injeção mas pouco significativa, ou seja, inferior a 5% do termo fundamental.

5. Resultados Experimentais

5.1 Resultados dos ensaios do rendimento do conjunto (Motor e VSD) em função do regime de carga e da frequência

Os dados retirados do analisador de potência foram analisados no Excel, sob a forma de gráficos.¹

Na Fig. 14 estão representados os valores do rendimento em função da carga do motor. O rendimento é calculado através do método direto de acordo com a norma 60034-2-1 de Janeiro de 2013, que se resume à medição da potência elétrica e à medição da potência mecânica e posteriormente ao seu rácio obtendo o rendimento do conjunto motor e VSD.

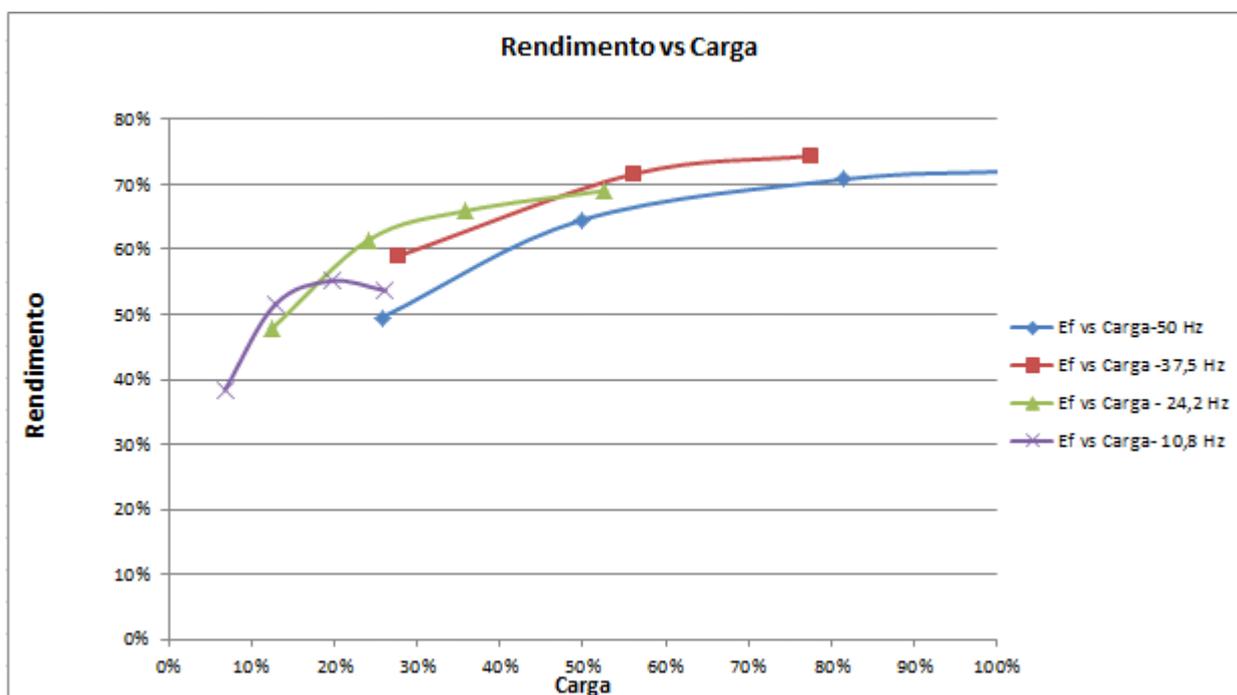


Fig. 14-Evolução do rendimento do conjunto Motor e VSD em função da carga.

¹ Critério de cores na apresentação dos gráficos, sendo assim todos os gráficos correspondentes à frequência de 50 Hz aparecem com uma cor azul, por sua vez os gráficos correspondentes à frequência de 37.5 Hz aparecem com uma cor vermelha, os gráficos correspondentes à frequência de 24.2 Hz estão representados a verde e por fim os gráficos correspondes à frequência de 10.8 Hz estão representados a roxo.

As características do rendimento apresentam a forma esperada, no entanto, os motores elétricos costumam ser dimensionados para 50/60 Hz, o que parece não acontecer neste, uma vez que este apresenta um maior rendimento para uma frequência inferior a 50 Hz (37,5 Hz). Era expectável que a curva azul apresentasse valores mais elevados, seguida da vermelha, verde e roxa. Os valores do rendimento são reduzidos para uma máquina elétrica, pelo que enuncio possíveis causas para estes resultados.

Uma das possíveis causas para isto pode ser as perdas no ferro, visto que estas variam proporcionalmente com a frequência e assim quanto menor frequência menores perdas, no entanto isto não é perceptível na análise do respetivo gráfico. Outra possível causa pode ser o conteúdo harmónico, este vai ser abordado posteriormente.

Na Fig. 15 estão representados os valores do fator de potência em função do regime de carga, estes valores são similares para baixos regimes de carga exceto para os 24,2 Hz, no entanto a partir dos 40% da carga nominal o funcionamento a 50 Hz apresenta valores superiores, apenas sendo superado a aproximadamente 80% da carga pelo funcionamento a 37,5 Hz.

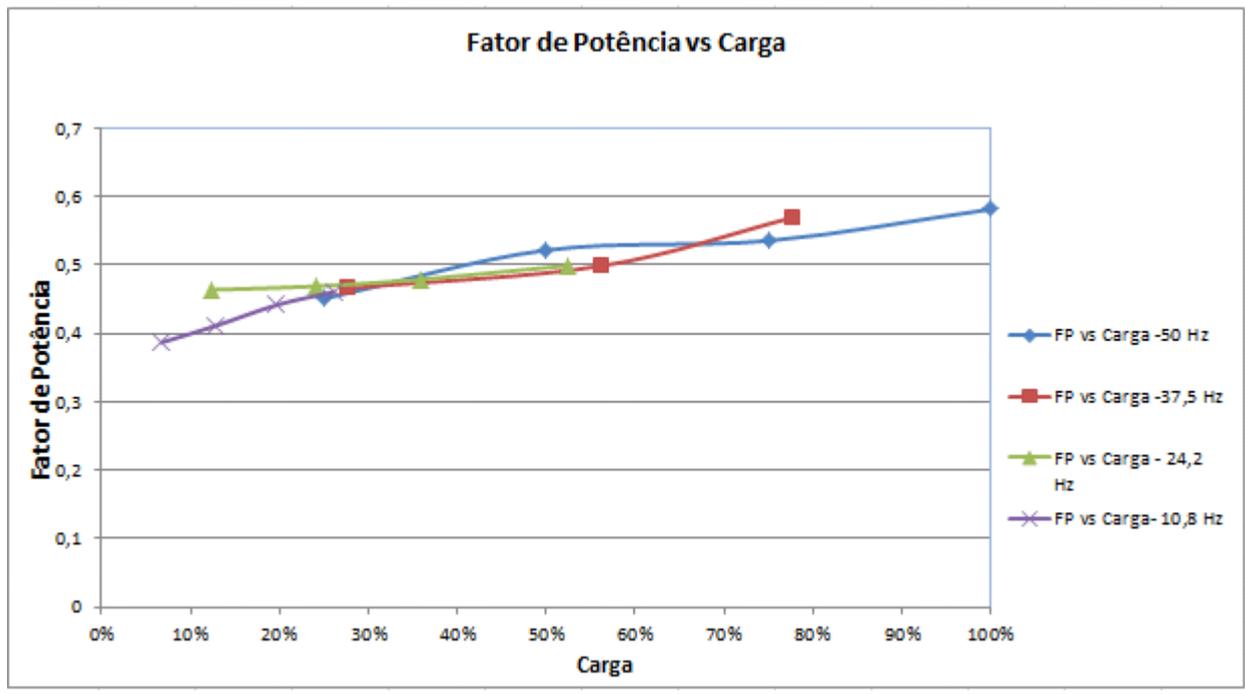


Fig. 15-Evolução do fator de potência do conjunto em função do regime de carga.

Na Fig. 16 pode-se observar as características da corrente em função do regime carga, como pode constatar com aumento do regime de carga resulta num aumento da corrente do conjunto motor e variador para todas as frequências testadas. Era expectável que a curva correspondente aos 24.2 Hz e aos 10.8 Hz, estivesse abaixo da curva dos 37.5 Hz o que não acontece.

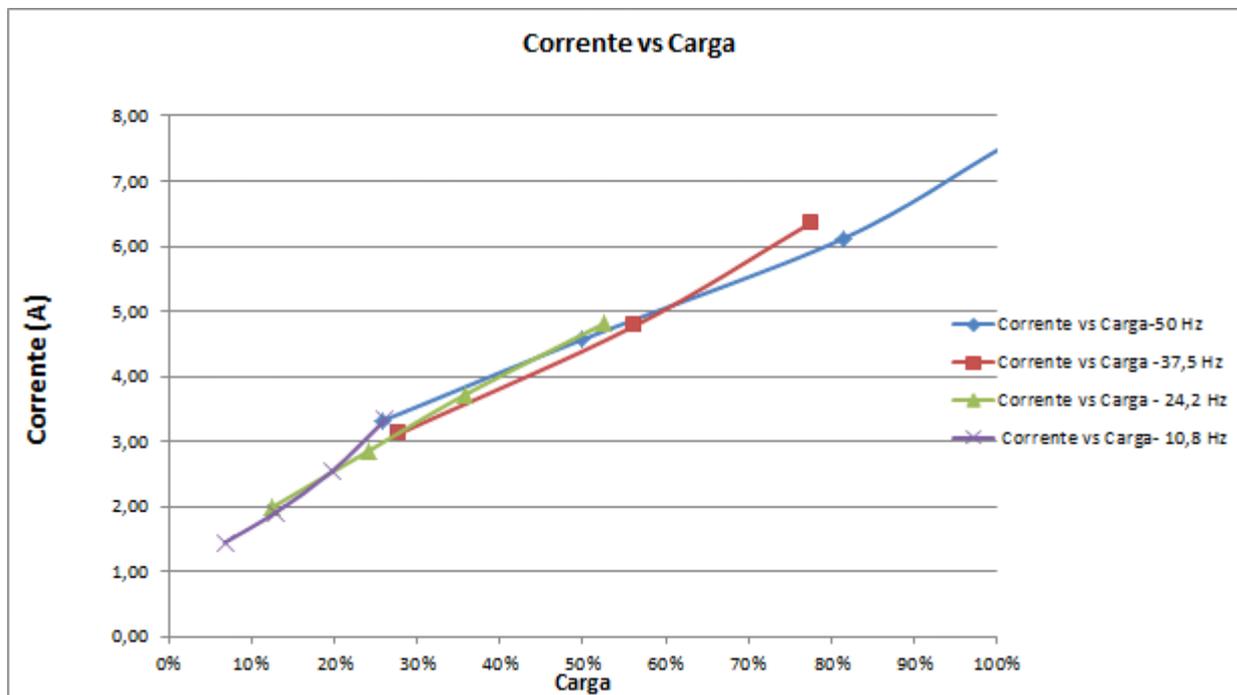


Fig. 16-Evolução da corrente medida na entrada do VSD com o regime de carga.

Na Fig. 17 é visível os dois locais onde foram realizadas as medidas da temperatura da carcaça.

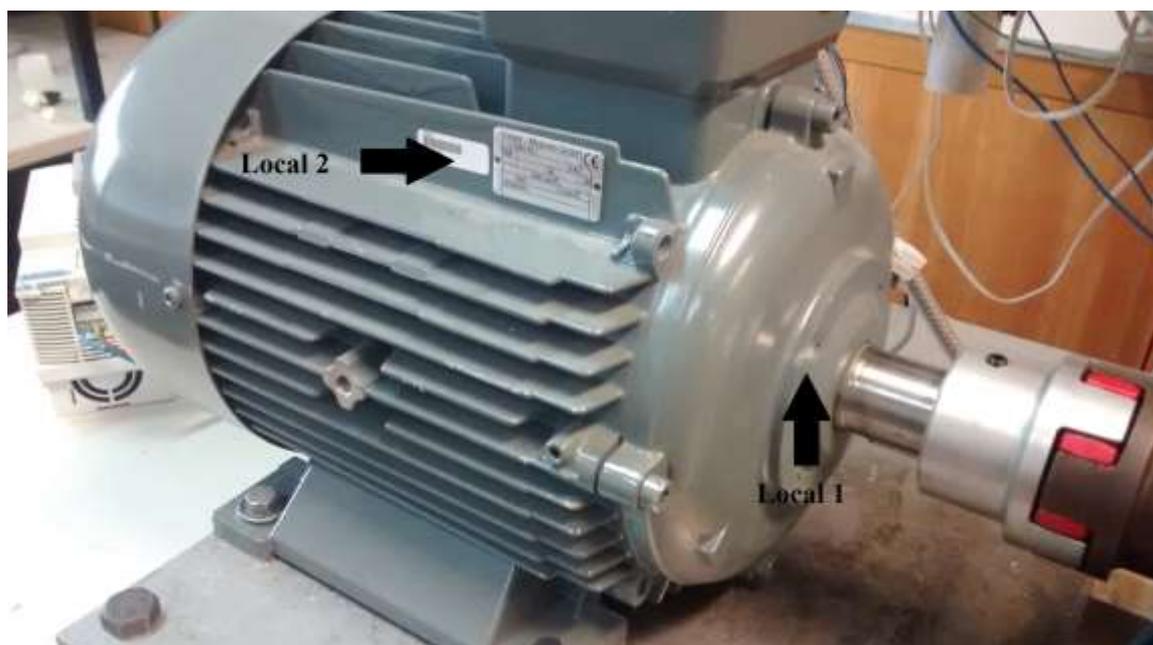


Fig. 17- Locais de medição da temperatura na carcaça.

A variação da temperatura na carcaça no local 1 em função do regime de carga é apresentada na Fig. 18. Uma vez que a temperatura está relacionada com a corrente pode-se observar que a temperatura apresenta o maior valor nas condições nominais da máquina. As características obtidas seguem aproximadamente uma linha de tendência quadrática que é mais perceptível a baixas frequências, já que para as frequências de alimentação de 37,5 e 50 Hz a curvatura é menos perceptível. Esta característica está diretamente relacionada com o circuito equivalente térmico do motor.

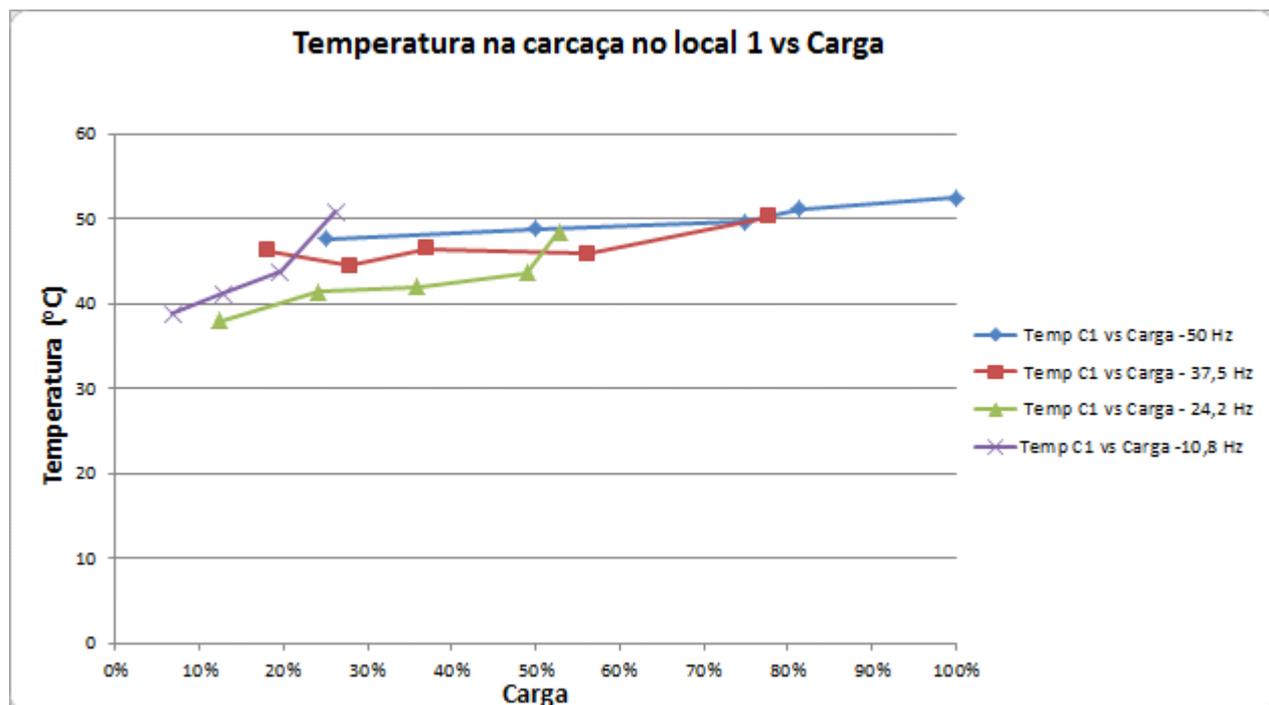


Fig. 18-Evolução da temperatura na carcaça local 1 em função da carga.

A Fig. 19 representa as medições da temperatura na carcaça local 2 do motor em função do regime de carga. A temperatura medida vai estar dependente de dois fatores o regime de carga (corrente) e a ventilação, assim é possível perceber que quanto menor a frequência menor a velocidade logo o motor têm uma menor ventilação, no entanto quanto maior a frequência maior a corrente. Ao conjugar estes dois fatores tem-se o ponto com maior valor na curva roxa em que foi feito um ensaio a 10.8 Hz com o valor nominal de corrente, correspondente à maior temperatura registada na carcaça no local 2 do motor.

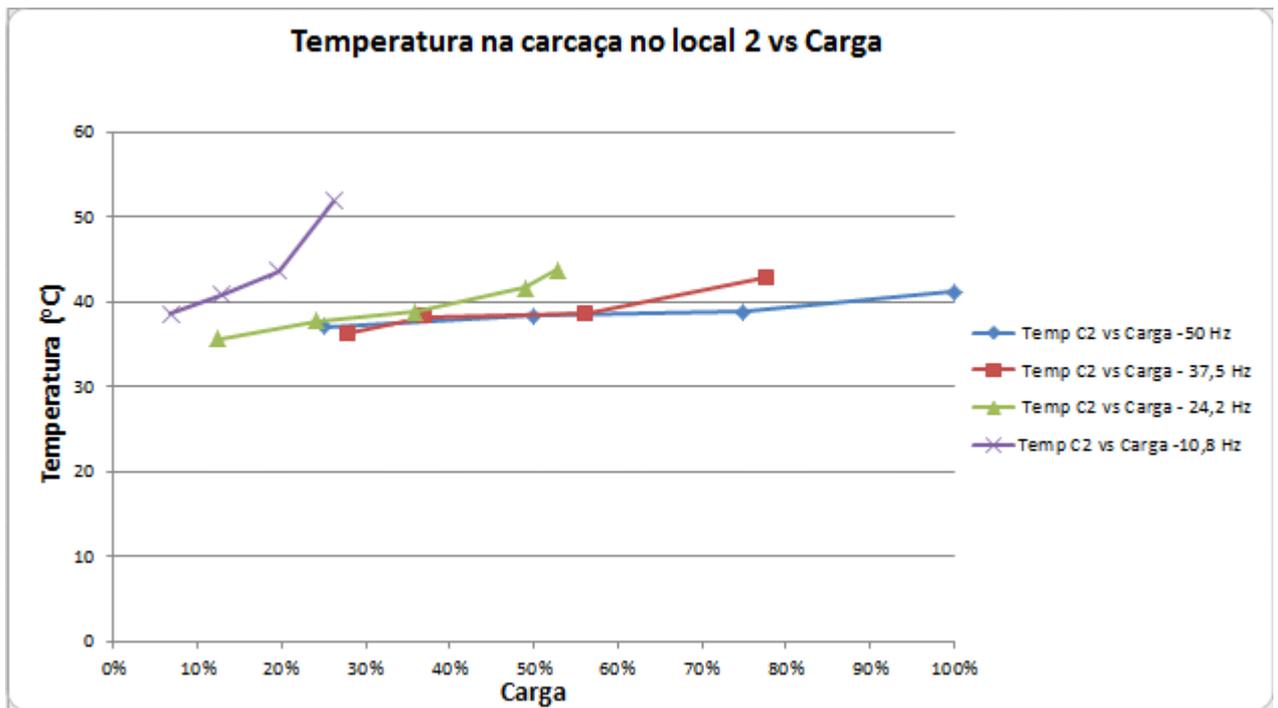


Fig. 19-Evolução da temperatura na carcaça local 2 com regime de carga

Na Fig. 20 pode-se observar o valor da temperatura ambiente no laboratório em função do regime de carga, a temperatura vai ser afetada por várias condicionantes como a temperatura exterior, sendo esta a que tem mais influência, tempo funcionamento da máquina, a refrigeração do laboratório e local da medição.

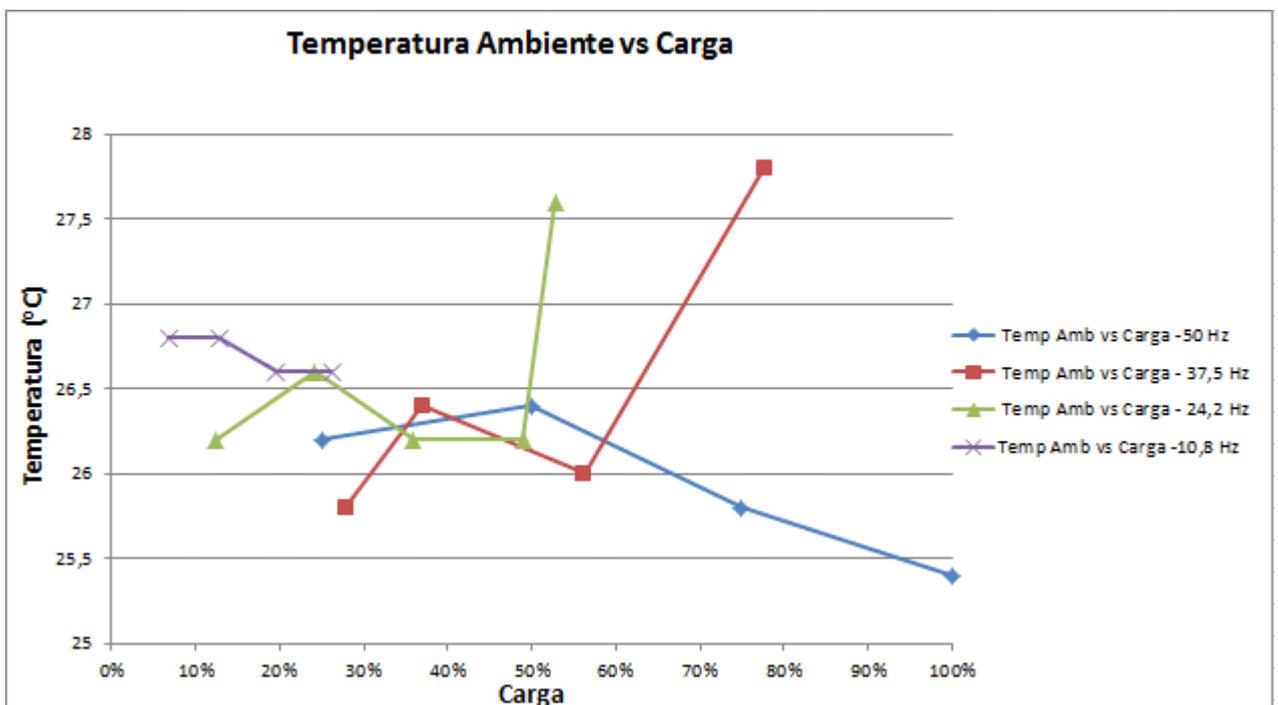


Fig. 20-Evolução da temperatura ambiente com o regime de carga.

A Fig. 21 apresenta o gradiente da temperatura na carcaça local 1 em função do regime de carga onde o valor mais elevado foi registado durante o funcionamento do motor a 50 Hz.

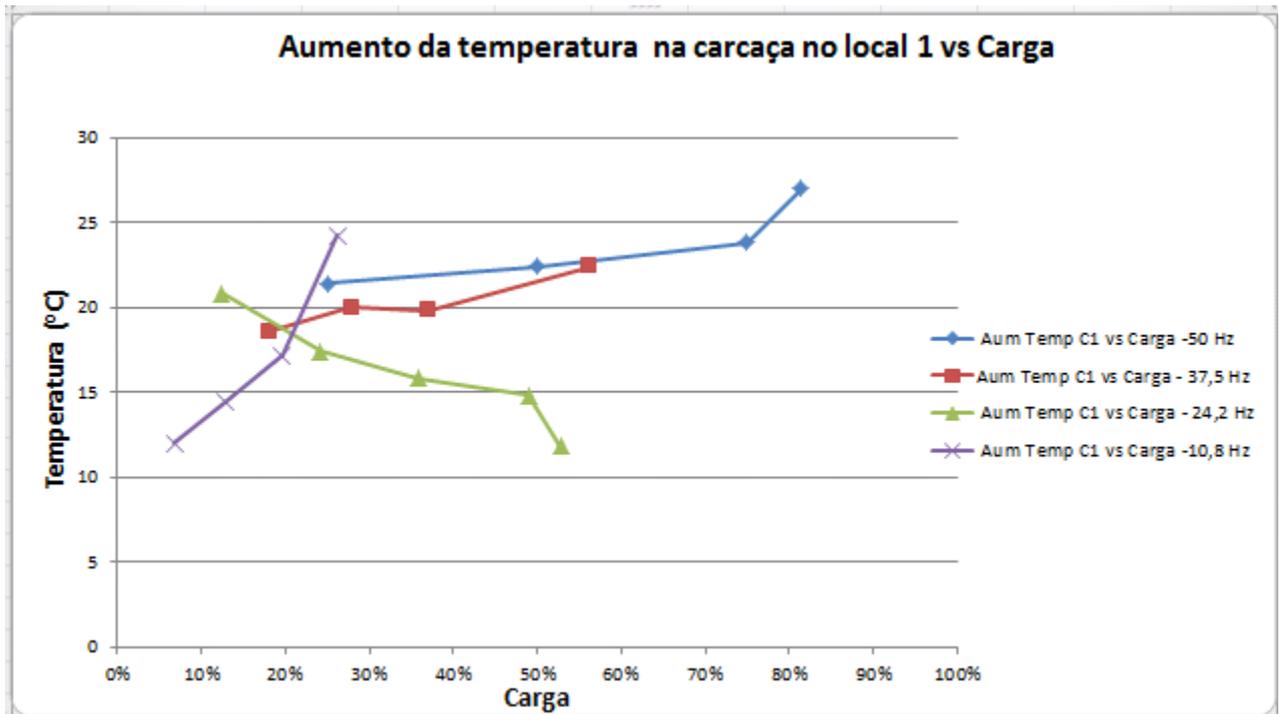


Fig. 21-Evolução do gradiente da temperatura na carcaça local 1.

A Fig. 22 apresenta o gradiente da temperatura da carcaça do motor local 2 em função do regime de carga onde o valor mais elevado foi registado durante o funcionamento a 10.8 Hz.

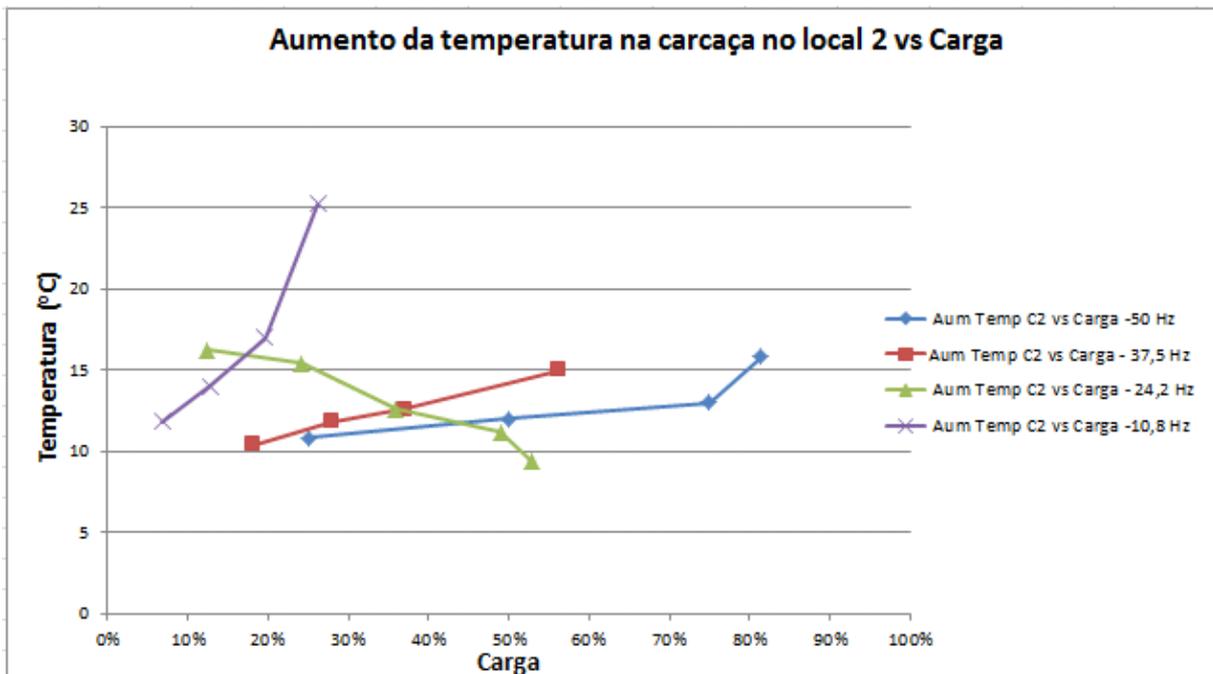


Fig. 22-Evolução do gradiente da temperatura na carcaça local 2 com o regime de carga.

Aos ensaios anteriormente realizados foi feita uma análise dos harmônicos de tensão, de corrente e respectiva distorção harmônica total de cada fase podem ter grande influência na performance do sistema. Foram apresentados dados relativos aos ensaios de 400V/50Hz à carga nominal e a 25% da carga nominal e por fim a 400V/24,2 Hz a 24% da carga nominal para fazermos a comparação entre frequências, sendo que os restantes dados podem ser consultados no Anexo C.

Na Tabela 6 estão representados os harmônicos de corrente e de tensão e distorção harmônica total para cada fase do motor. O motor estava a funcionar às condições nominais, ou seja 400 V/50 Hz e com binário de 14 Nm.

Tabela 6- Harmônicos de corrente e tensão na entrada do variador em função do harmónico fundamental e THD de cada fase no funcionamento às condições nominais do motor.

	100%				
	HARM 1	HARM 3	HARM 5	HARM 7	THD (%)
Usum (V)	393,1				
U1 (V)	391,9	0,50	7,00	4,70	2,34
U2 (V)	394,1	0,20	6,80	4,70	2,33
U3 (V)	393,3	0,50	6,50	4,70	2,2
Isum (A)	4,377				
I1 (A)	4,414	0,26	4,12	3,69	158,08
I2 (A)	4,248	0,09	3,86	3,69	158,9
I3 (A)	4,468	0,20	4,12	3,77	155,92
Σ Pin (W)	2971				

Na Fig. 23 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão em função do harmónico fundamental de casa fase.

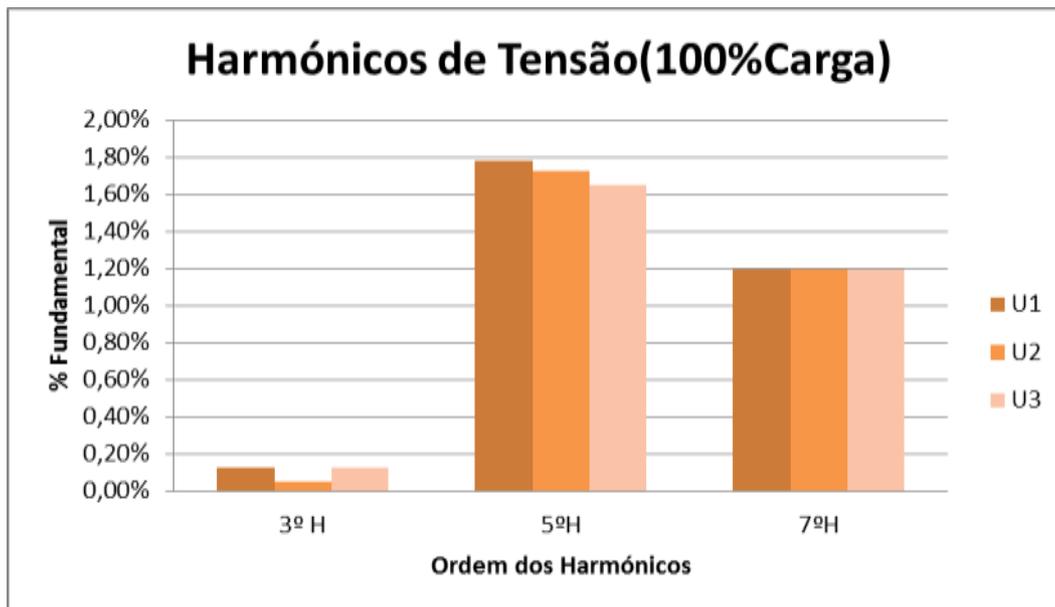


Fig. 23-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador às condições nominais.

Na Fig. 24 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico da corrente em função do harmónico fundamental de cada fase.

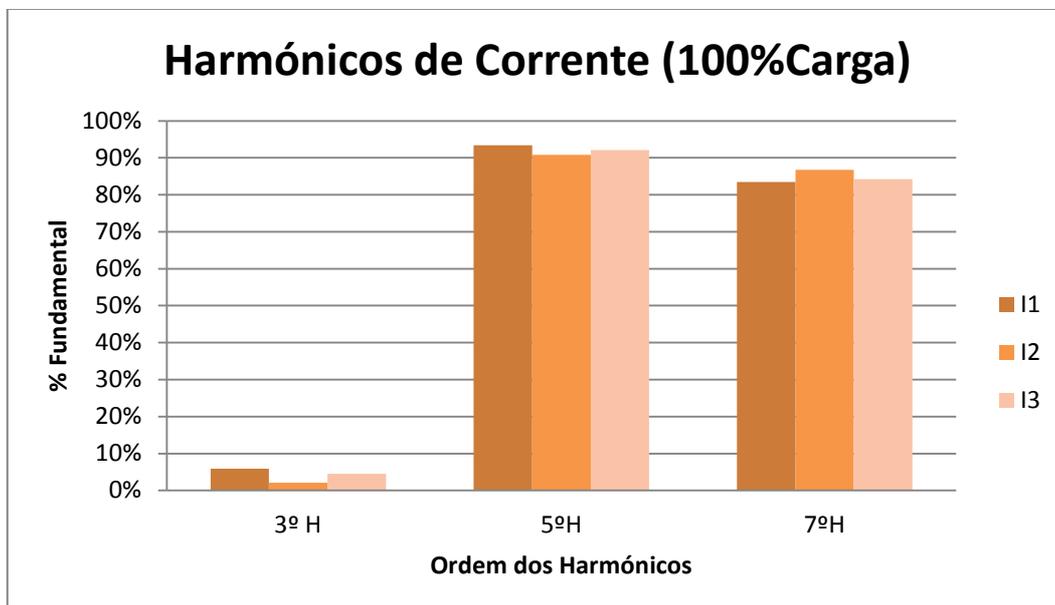


Fig. 24-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador às condições nominais.

Os harmónicos da tensão são relativamente reduzidos e o terceiro harmónico de corrente também, por sua vez o quinto e o sétimo harmónico de corrente apresentam valores muito elevados.

O 5º harmónico é de sequência negativa que por sua vez conduz a sobreaquecimentos, vibrações e menor rendimento, já o 7º harmónico é de sequência positiva, este contribui de forma positiva para o binário do motor. Este conteúdo harmónico elevado é explicado através da interação dos polos ranhurados do rotor com as ranhuras do estator, como pode ser visível na Fig. 25.

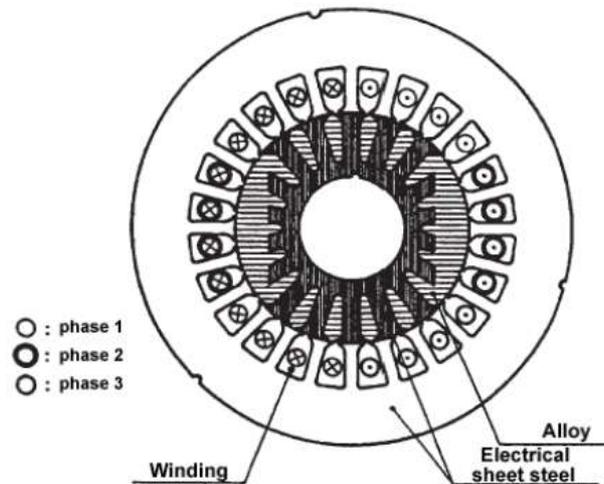


Fig. 25-Estrutura do rotor e do estator do SynRM de 2.2 kW da Kaiser.

O conteúdo harmónico é o principal responsável pelo reduzido rendimento do motor em ensaio.

Na Tabela 7 estão representados os harmónicos de corrente e de tensão e distorção harmónica total para cada fase do motor. O motor estava a ser alimentado a 400 V/50 Hz com regime de carga de 25% da carga nominal

Tabela 7-Harmónicos de corrente e tensão medidos na entrada e THD de cada fase no funcionamento a 25% de carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.

	25%				
	HARM 1	HARM 3	HARM 5	HARM 7	THD (%)
Usum (V)	405				
U1 (V)	404,55	0,64	7,43	5,49	2,36
U2 (V)	405	1,10	7,00	4,80	2,22
U3 (V)	405,4	0,70	6,90	5,00	2,19
Isum (A)	1,593				
I1 (A)	1,539	0,05	1,46	1,35	181
I2 (A)	1,584	0,08	1,50	1,42	183,69
I3 (A)	1,654	0,04	1,54	1,48	180,78
Σ Pin (W)	1108				

Na Fig. 26 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase.

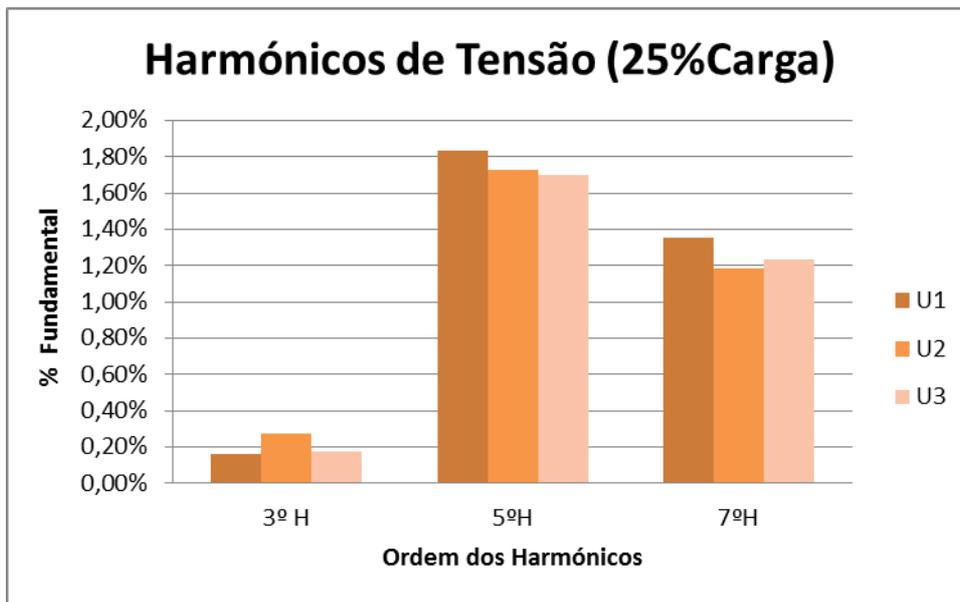


Fig. 26-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador à 25% da carga nominal sendo alimentado a 400 V/50 Hz.

Na Fig. 27 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico da corrente em função do harmónico fundamental de cada fase.

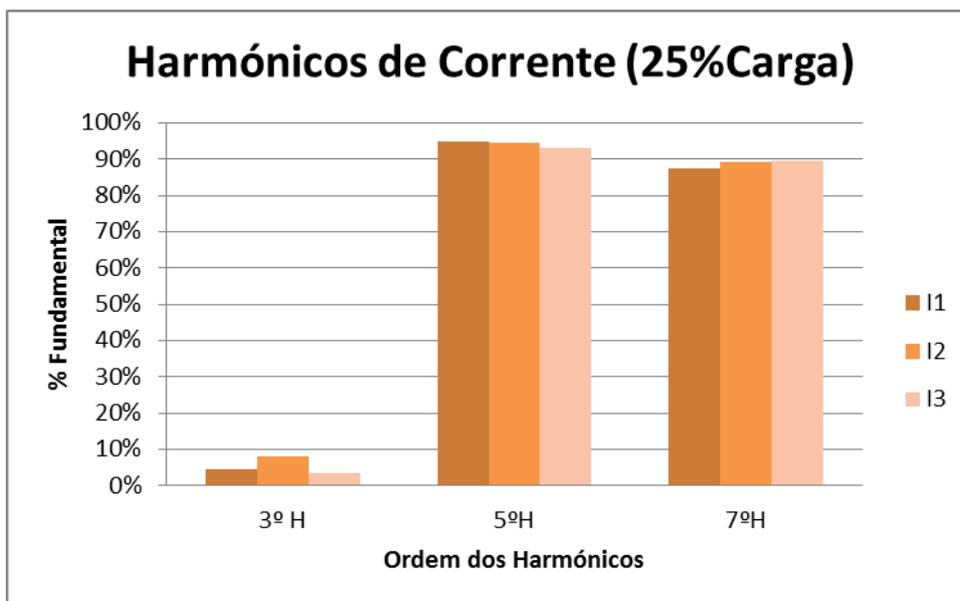


Fig. 27-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador a 25 % da carga nominal sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.

Na Tabela 8 estão representados os harmônicos de corrente e de tensão e a distorção harmônica total para cada fase do motor. O motor estava a ser alimentado a 400 V/24.2 Hz com regime de carga de 24% da carga nominal.

Tabela 8-Harmônicos de corrente e tensão medidos na entrada do variador e THD de cada fase no funcionamento a 24% de carga sendo alimentado a 400/24.2 Hz.

	24%				
	HARM 1	HARM 3	HARM 5	HARM 7	THD (%)
Usum (V)	401,4				
U1 (V)	402,23	0,27	6,81	5,24	2,2
U2 (V)	401,3	1,70	7,60	4,70	2,45
U3 (V)	400,6	1,80	7,70	5,40	2,58
Isum (A)	1,247				
I1 (A)	1,324	0,06	1,20	1,10	160,68
I2 (A)	1,188	0,10	1,09	0,98	164,49
I3 (A)	1,228	0,15	1,13	1,06	168,88
Σ Pin (W)	857				

Na Fig. 28 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmônico de tensão em função do harmônico fundamental de cada fase.

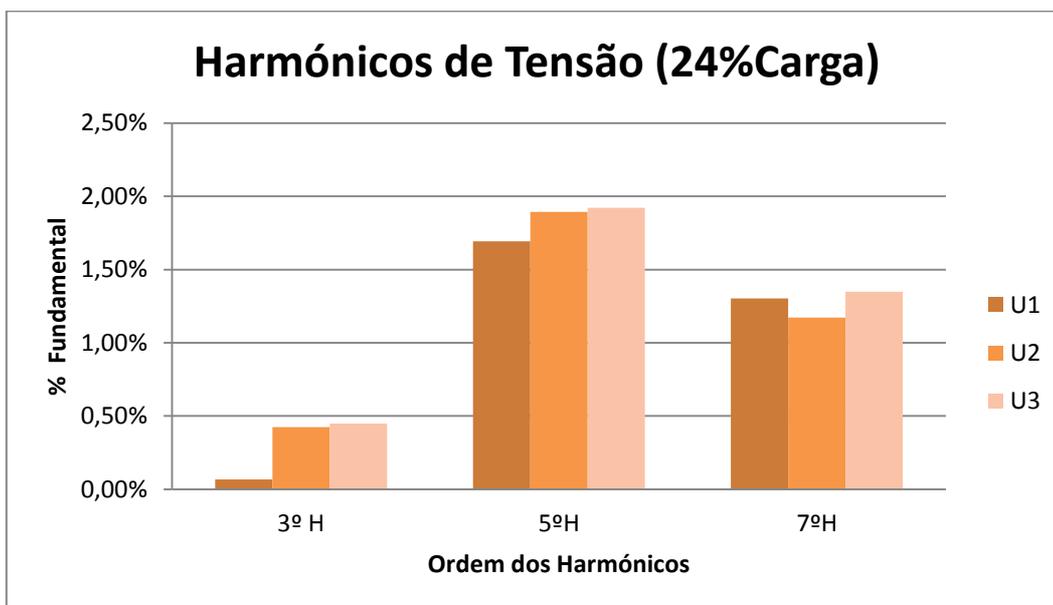


Fig. 28-Segmentação dos harmônicos de tensão na entrada do variador a 24% da carga nominal sendo alimentado a 400 V/ 24.2 Hz.

Na Fig. 29 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico da corrente em função do harmónico fundamental de cada fase

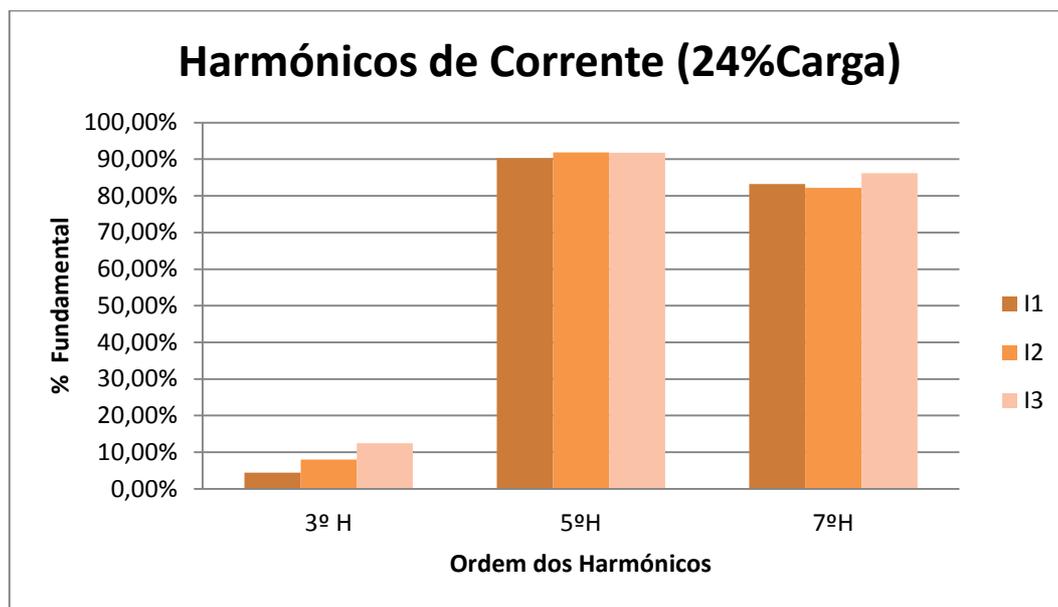


Fig. 29-Segmentação dos harmónicos de correntes medidos na entrada do variador a 24% da carga nominal sendo alimentado a 400 V/24.2 Hz.

Com a diminuição da frequência de alimentação é possível observar que o terceiro harmónico da corrente aumentou, uma das causas pode ser o conteúdo harmónico da rede que é diferente consoante o período de tempo, pois o número de cargas ligadas à rede durante a manhã é diferente do número ligado de tarde.

Relativamente ao 5º e ao 7º harmónico de corrente existe uma diminuição na ordem dos 5% quando alimentado a 50 Hz e a 24.2 Hz, contudo ao nível dos harmónicos de tensão não existiu uma variação significativa.

5.2Rendimento do conjunto motor e variador em função da tensão de alimentação.

A Fig. 30 apresenta os valores do rendimento do conjunto (motor e variador) para os diferentes valores de tensão aplicado com uma alimentação a 400 V/ 50 Hz e com um binário de carga nominal, com o intuito de determinar o ponto ótimo.

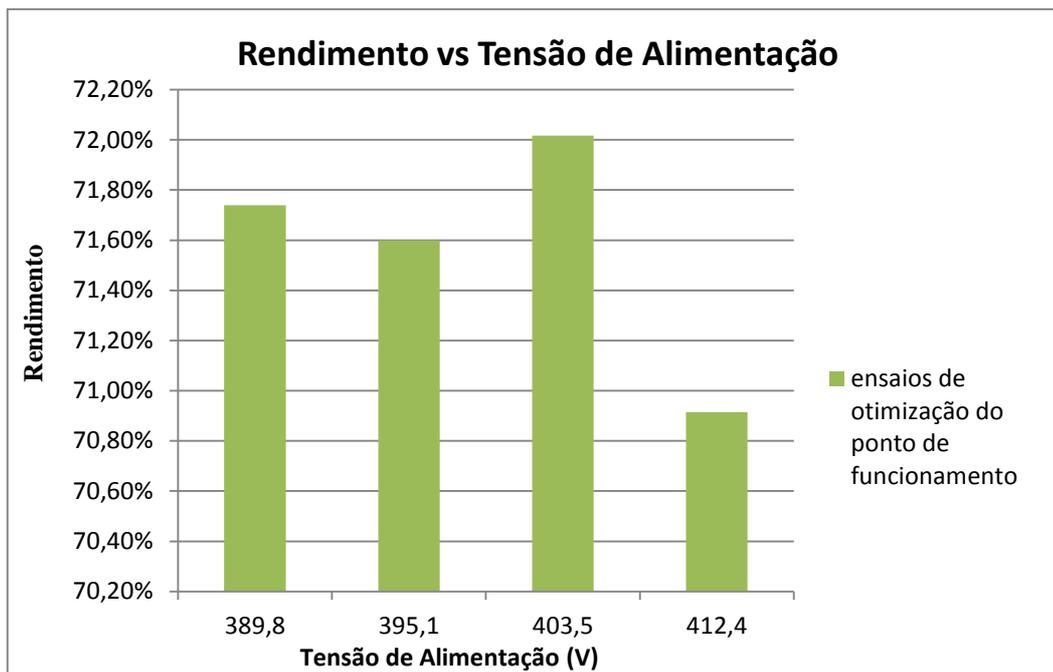


Fig. 30-Otimização do ponto de funcionamento nominal do conjunto em função da tensão de alimentação.

Os ensaios mostram que o conjunto está otimizado para os 400 V, sendo que quando o sistema foi subalimentado apresentou valores mais elevados de rendimento do que quando foi sobrealimentado.

5.3 Rendimento do conjunto motor e variador em função da frequência de comutação

Posteriormente foram realizados ensaios às condições nominais da máquina para diferentes frequências de comutação disponíveis no variador 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz e ver o impacto das perdas de comutação no rendimento total do conjunto variador e motor, como se pode verificar na Fig. 31.

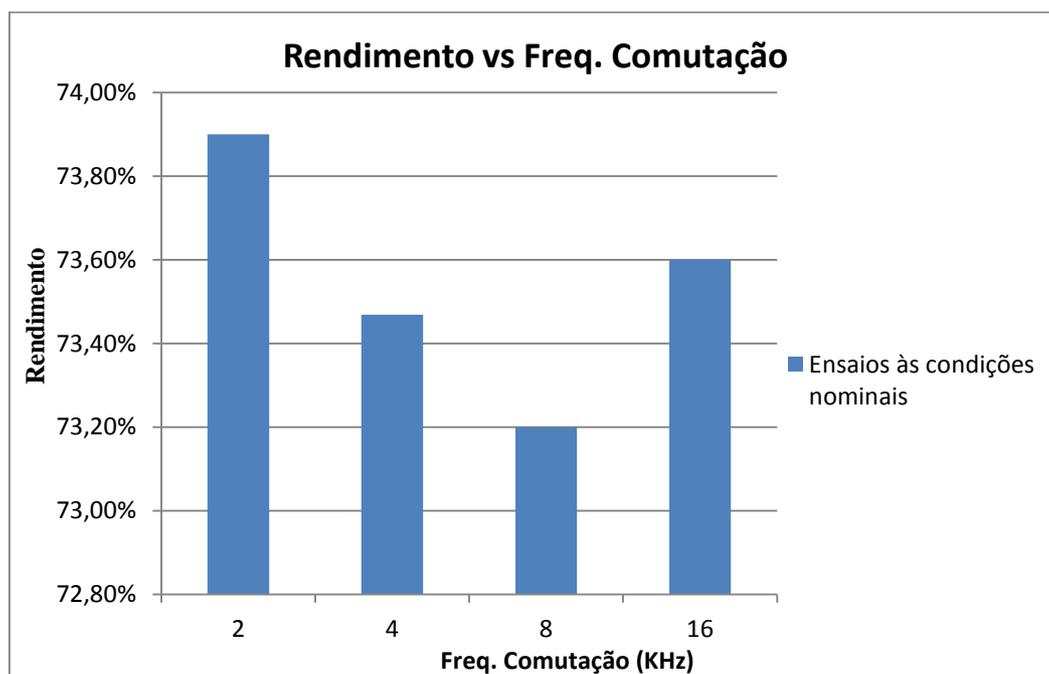


Fig. 31-Rendimento em função da frequência de comutação.

Os valores do rendimento para as várias frequências obtidos estão relativamente próximos, visto que o aumento da frequência de comutação origina um aumento das perdas de comutação, contudo a forma de onda de saída do VSD é mais sinusoidal e assim as perdas no motor vão ser reduzidas. No entanto esta pode ser alterada dependendo da aplicação que se pretende utilizar o motor, para casos em que se pretende que o motor funcione suavemente para baixas frequências de alimentação devemos optar por uma frequência de comutação de 2 kHz ou 4 kHz, no entanto estas frequências produzem ruído audível para o ser humano. A frequência de comutação a 16 kHz tem como vantagens um ruído não audível por parte do ser humano, assim menor ruído e ainda permite uma melhor forma de onda para frequências médias, ou seja superiores a 150 kHz. A sua principal desvantagem é o esforço mecânico pedido aos semicondutores o que origina aumento das perdas de comutação e ainda interferência eletromagnética.

5.4 Limites de velocidade/binário

Na Fig. 32 é possível observar a variação de binário ao longo da gama de frequências testadas, para as duas ligações do estator.

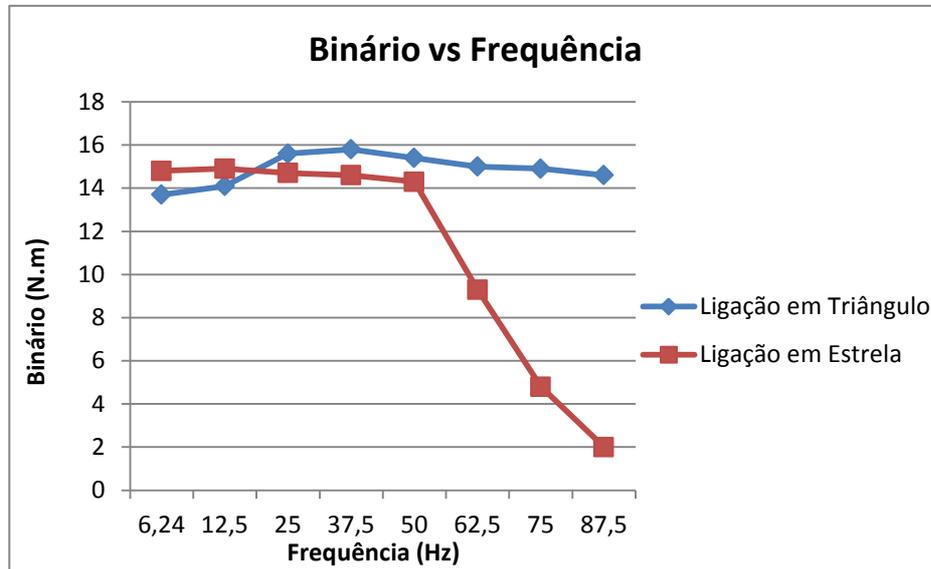


Fig. 32-Evolução do binário em função da frequência de alimentação.

Da análise do gráfico anterior pode-se concluir a ligação em triângulo permite obter um binário aproximadamente constante, enquanto que com uma ligação em estrela o valor do binário apenas se mantém constante para frequências até 50 Hz. Para frequências superiores existe uma queda acentuada do valor do binário, também foi notória uma flutuação da corrente e como a corrente elétrica era o parâmetro de paragem, atingiu-se os valores anteriormente apresentados. Este comportamento é observado a que a partir de 50 Hz, visto que o fluxo magnético na ligação é menor, uma vez que a tensão de alimentação se mantém constante e a frequência aumenta, vai originar um valor mais reduzido de binário e potência mecânica. Já na ligação em triângulo temos raiz de três vezes mais fluxo, logo a potência aumenta e como a frequência aumenta o binário mantém-se constante.

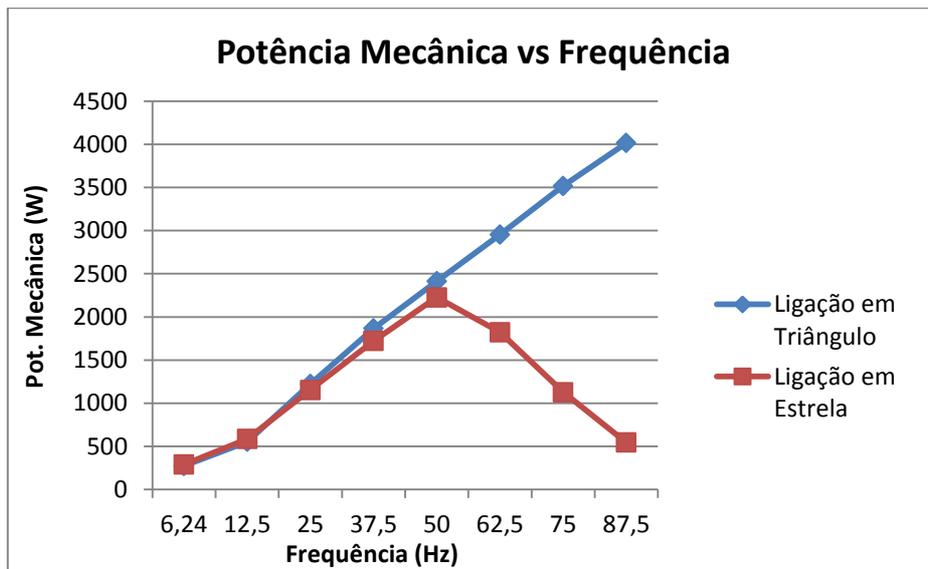


Fig. 33-Evolução da potência mecânica em função da frequência de alimentação.

Apesar das duas diferentes ligações do estator, a potência mecânica disponível no veio do motor é semelhante até aos 50 Hz, sendo que a partir desta frequência a potência mecânica aumenta no caso do estator estar ligado em triângulo e diminui no caso de estar ligado em estrela, como pode ser observado na Fig. 33.

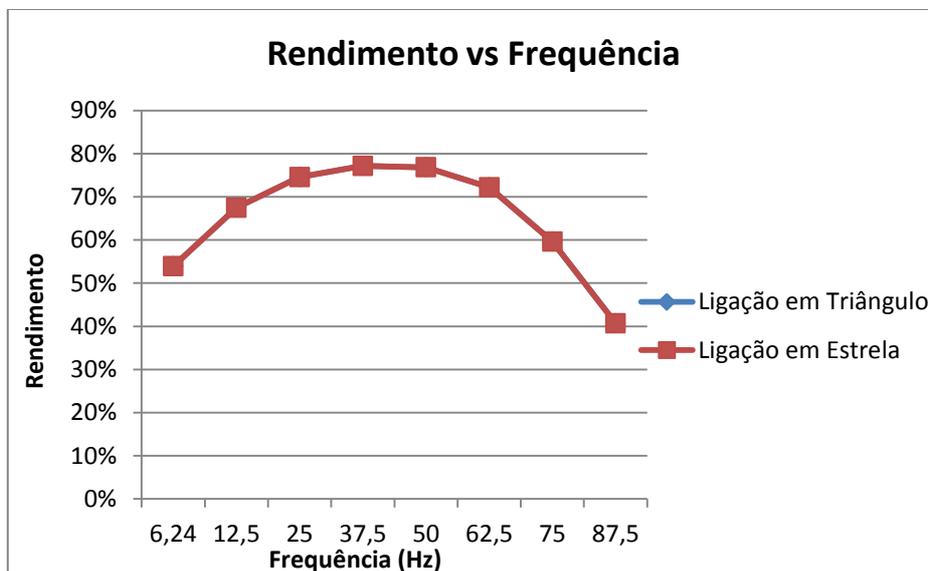


Fig. 34-Evolução do rendimento em função da frequência de alimentação.

Ao nível da rendimento não foi possível observar qualquer diferença de valores para a ligação em estrela e triângulo pelo que as curvas estão sobrepostas, como é visível na Fig. 34.

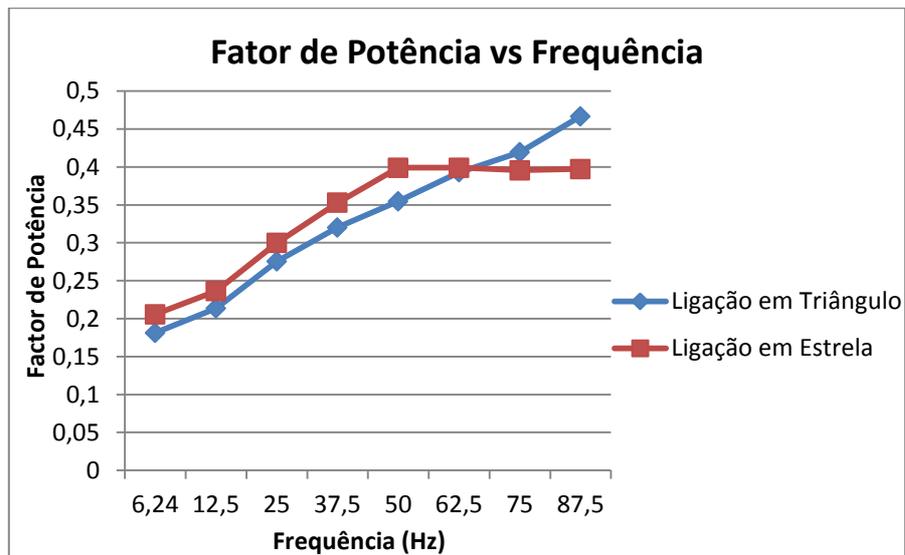


Fig. 35-Evolução do fator de potência do motor em função da frequência de alimentação.

O fator de potência do motor é mais elevado até aos 62.5 Hz para uma ligação em estrela, sendo que a partir desse valor o fator de potência do motor na ligação em triângulo supera o valor da ligação em estrela. A característica da ligação em estrela aumenta até aos 50 Hz, sendo que a partir dessa frequência diminui ligeiramente, enquanto no caso da ligação em triângulo a característica é sempre crescente como se pode verificar na Fig. 35.

O controlo utilizado foi o controlo V/f, contudo não permitiram alterar a curva V/f para os valores pretendidos, como se pode constatar na Fig. 36.

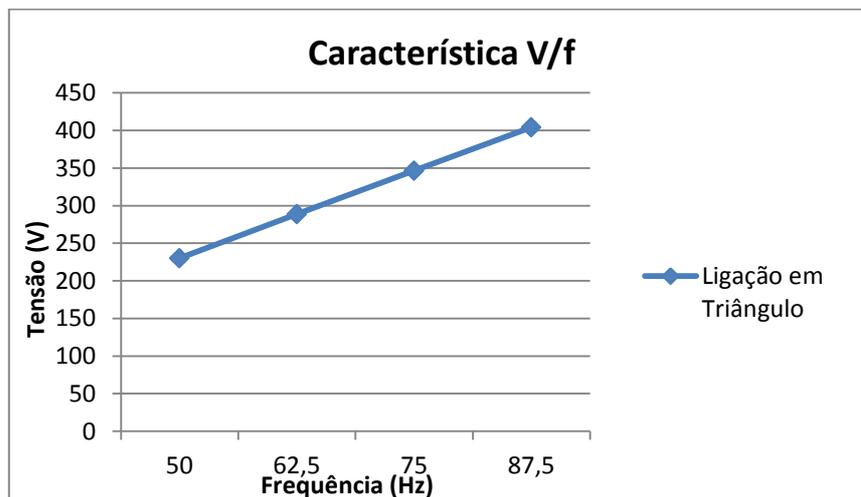


Fig. 36- Característica da curva V/f para a ligação em triângulo.

Contudo o variador da Lente utilizado não permitia regular a tensão fornecida ao motor, esta é ajustada automaticamente pelo variador. Na Fig. 37 são apresentados os valores fundamentais da tensão eficaz e não a tensão total eficaz, visto que o motores reagem fundamentalmente à componente fundamental.

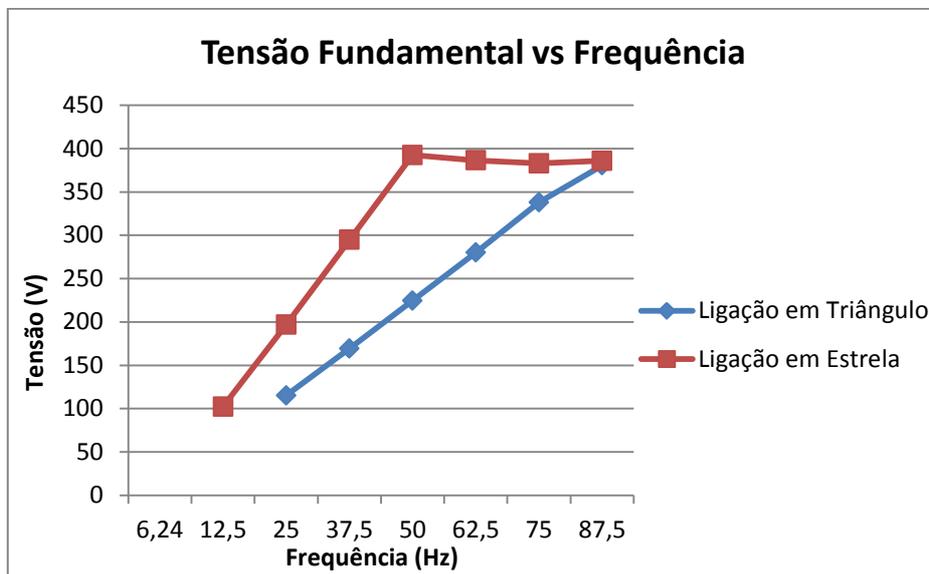


Fig. 37- Evolução da tensão fundamental eficaz de alimentação do motor em função da frequência de alimentação.

Na Fig. 38 pode-se observar a relação entre a tensão fundamental eficaz e a tensão total eficaz aplicada.

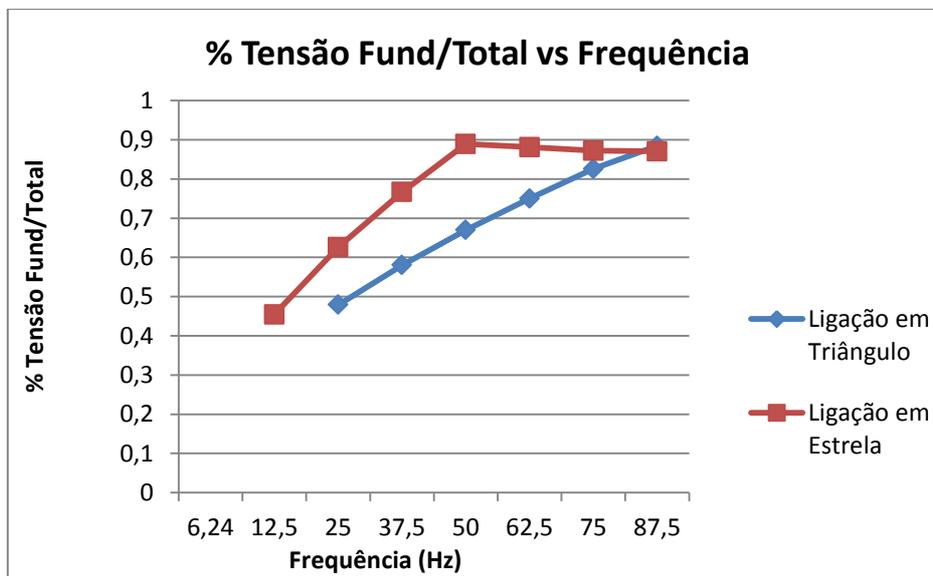


Fig. 38- Relação entre a tensão fundamental e total em função da frequência.

5.5 Injeção de harmônicos na alimentação de um motor

A Fig. 39 e Fig. 40 apresentam os harmônicos de tensão e de corrente, respetivamente, da alimentação de um motor de 7.5 kW em vazio, o motor estava ligado em estrela e alimentado a 400 V/50 Hz, para que se perceba o conteúdo harmónico da sua alimentação, para com estes dados fazer a comparação depois da ligação do paralelo do motor e variador.



Fig. 39-Harmônicos de tensão da alimentação de um motor de 7.5 kW em vazio.

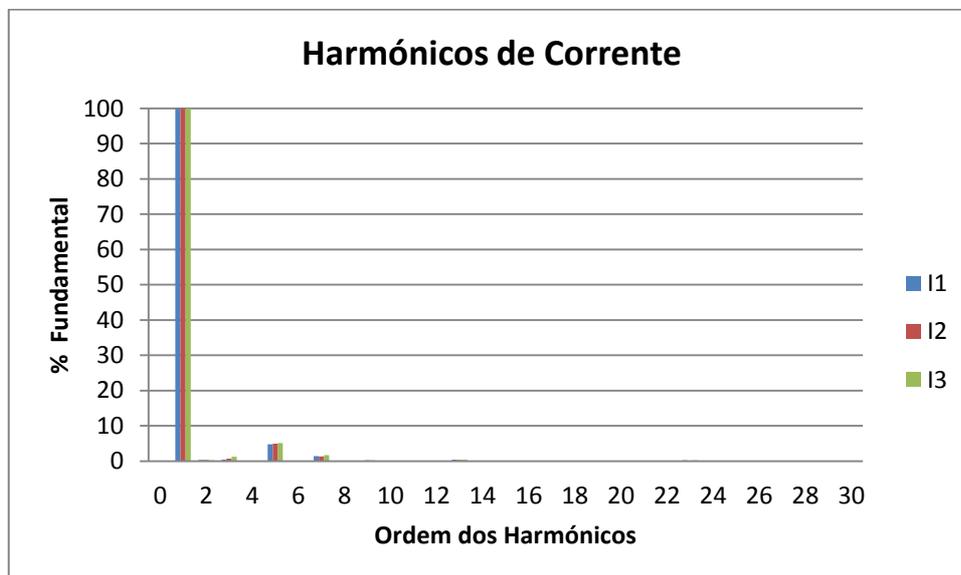


Fig. 40-Harmônicos de corrente da alimentação de um motor de 7.5 kW em vazio.

Posteriormente adicionou-se um motor indução de 11 kW em vazio, alimentado por variador eletrônico de velocidade da ABB em paralelo com o motor de 7.5 kW, com o objetivo de analisar a injeção de harmônicos na alimentação do motor de 7.5 kW, como se pode observar Fig. 41 e Fig. 42.

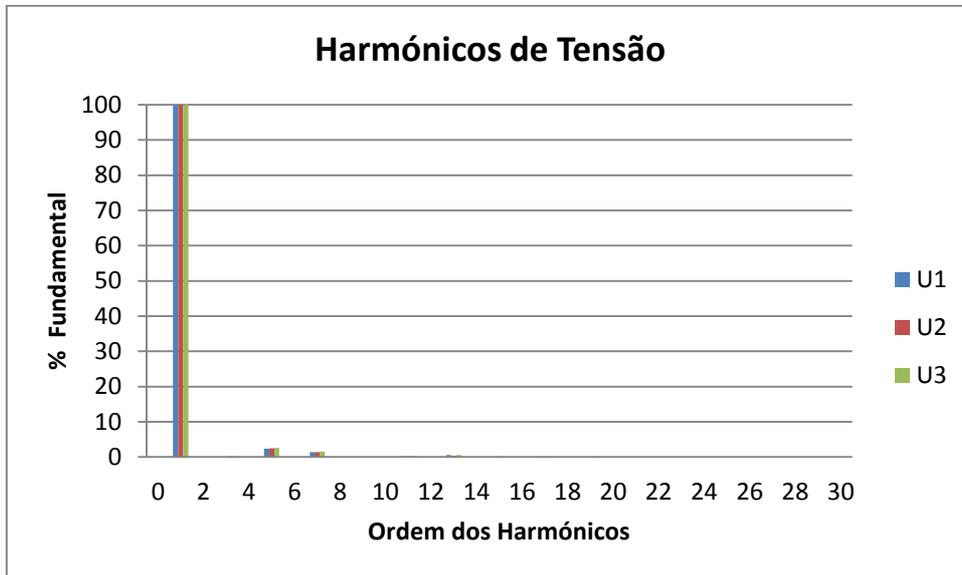


Fig. 41-Segmentação dos harmônicos de tensão na alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em vazio e variador.

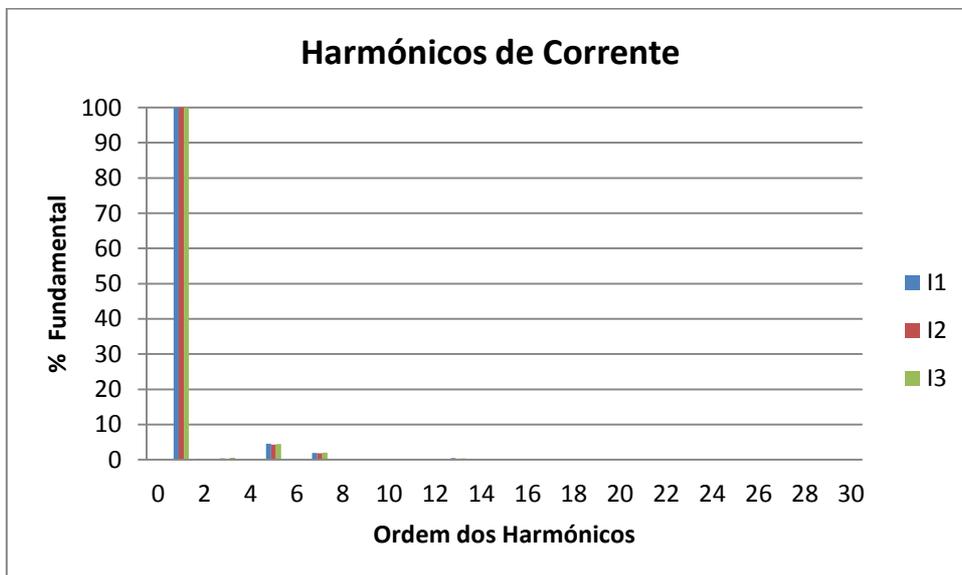


Fig. 42-Segmentação dos harmônicos de corrente na alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em vazio e variador.

A análise dos harmônicos mostra que o funcionamento do motor de indução em vazio e com o variador, não vai introduzir um conteúdo harmônico significativo, ou seja superior a 5 %. O variador da ABB apresenta uma grande indutância de entrada que vai funcionar como filtro, assim sendo a próxima estratégia foi utilizar outro variador. O teste seguinte passou por colocar o motor síncrono de relutância de 2.2 kW em carga alimentado pelo variador da Lenze para ver se este conjunto introduz harmônicos como mostram as Fig. 43 e Fig. 44.

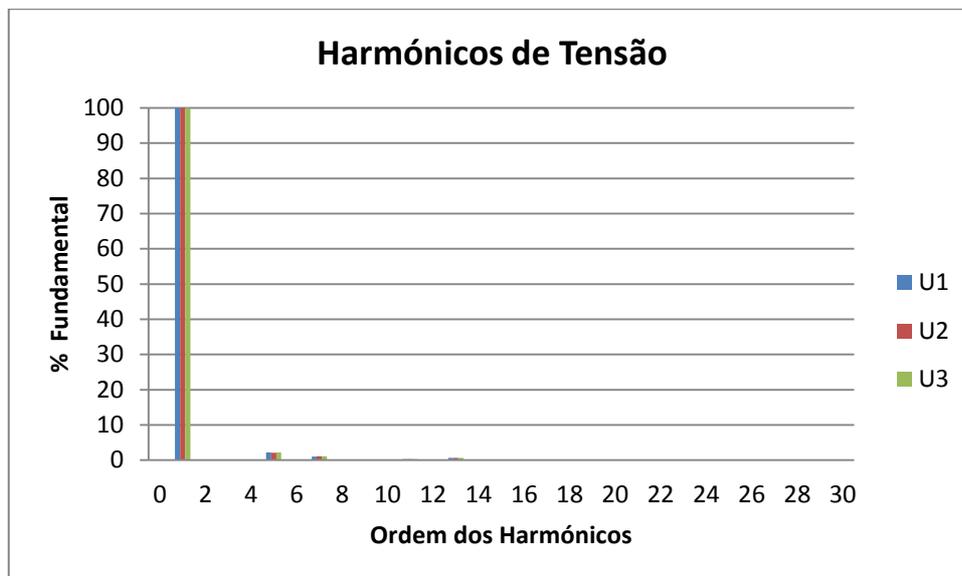


Fig. 43-Segmentação dos harmônicos de tensão na alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em carga e variador.

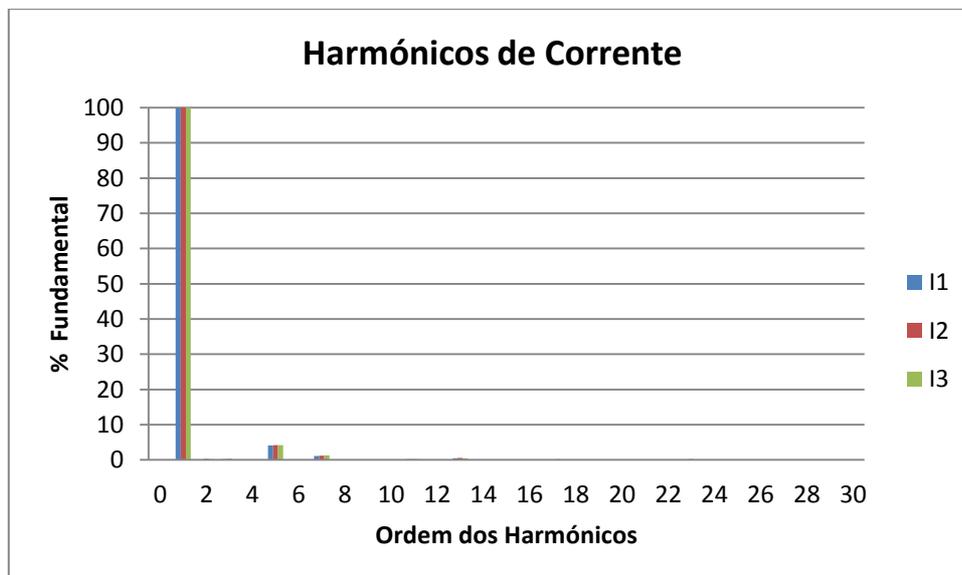


Fig. 44-Segmentação dos harmônicos de corrente da alimentação do motor de 7.5 kW com motor tendo em conta a influência do funcionamento do motor em carga e variador.

Contudo, neste teste efetuado, em carga, no motor síncrono de relutância de 2.2 kW e o variador eletrônico da Lenze não apresentou melhorias relativas ao ensaio com o motor de indução de 11 kW e o variador da ABB, pelo que este método se mostrou incapaz de gerar harmônicos para a alimentação do motor de 7.5 kW, com especial foco para os harmônicos de tensão que são os mais severos para as máquinas elétricas apesar de serem encontrados em quantidade reduzida. O objetivo era que as componentes harmônicas da corrente fossem absorvidas por um retificador para dar origem ao aparecimento de componentes harmônicas de tensão devido à impedância da instalação a montante

6. Conclusões e Trabalho Futuro

O motor utilizado nesta dissertação foi um motor síncrono de relutância. Um dos objetivos deste estudo foi a determinação do rendimento do conjunto motor e variador para diferentes frequências de alimentação. Foi também, estudado a influência da frequência de comutação no rendimento global do conjunto, os limites de velocidade/binário do motor e por fim foi tentada sem sucesso a injeção de harmônicos na alimentação de um motor.

Os resultados obtidos evidenciaram que o motor testado tem um rendimento muito reduzido para um motor elétrico. O valor mais elevado do rendimento do conjunto foi de 74,40% e foi obtido para a frequência de alimentação os 37.5 Hz, contudo, normalmente, os motores são dimensionados para uma gama de frequências entre os 50 e os 60 Hz. Ao nível térmico constatou-se que a frequências mais reduzidas a temperatura da carcaça no local 2 apresentou um valor mais elevado, já na carcaça no local 1 a temperatura mais elevada foi medida no ensaio a 50 Hz. A principal razão para um rendimento mais é o conteúdo harmónico obtido em que o quinto e o sétimo harmónicos da corrente apresentam valores bastantes próximos do valor da componente fundamental.

O ponto de funcionamento ótimo foi obtido quando o conjunto motor e variador foi alimentado a 400 V/50 Hz, sendo que foram testados valores inferiores e superiores, na ordem dos 10%.

Os ensaios realizados às condições nominais tinham como objetivo variar a frequência de comutação do variador, permitiram verificar que a variação desta não tem grande influência sobre o rendimento do conjunto motor e variador. Ainda permitiram notar que o aumento da frequência de comutação apresenta um menor ruído audível pelo ser humano, mas por outro lado comporta para os semicondutores um maiores perdas e podem ser geradas interferências eletromagnéticas que não são desejáveis.

Os ensaios relativos aos limites velocidade/binário, permitiram concluir que a comutação da ligação estrela-triângulo apresenta vantagens, as quais são ser descritas. Para uma aplicação que funcione com valores superiores a 50 Hz, a ligação em triângulo permite que o binário se mantenha constante ao invés da ligação em estrela em que o binário diminui. Já no caso da potência mecânica esta aumenta quase linearmente com a frequência com a ligação do estator em triângulo enquanto com a ligação em estrela a potência mecânica aumenta até aos 50 Hz, sendo que a partir desta frequência diminui.

O fator de potência do motor na ligação em estrela, aumenta até 50 Hz, sendo que a partir desta frequência os valores mantêm-se aproximadamente constante e igual a 0,39 em atraso, por sua vez na ligação em triângulo apresenta um crescimento progressivo, contudo até aos 62.5 Hz apresenta valores inferiores à ligação em estrela. Em termos de rendimento não existe variação para o tipo de ligação do estator, sendo assim por todas as razões anteriormente mencionadas uma comutação de uma ligação estrela-triângulo para valores superiores a 50 Hz parece ser recomendável.

Ainda foi desenvolvido um modelo de simulação na *toolbox Simulink* para a injeção de harmónicos na alimentação de um motor através da ligação em paralelo de outro motor e um variador eletrónico de velocidade. Posteriormente foram realizados ensaios experimentais os quais não permitiram observar qualquer injeção de harmónicos. Foram utilizados motores de diferentes potências e com diferentes regimes de carga para ver a influência que tinham, em todos os casos não se notou uma alteração significativa, ou seja não houve um aumento superior a 5% em relação ao termo fundamental.

Por fim, como trabalho futuro pode ser realizado ensaio a um motor síncrono de relutância IE4, ou seja, super eficiente, para comparar com os dados obtidos durante esta dissertação e conseguir perceber as principais diferenças em termos elétricos e térmicos, apesar do motor utilizado nesta dissertação ter um rendimento bastante reduzido, a tecnologia em causa tem bastante potencial de penetração na indústria.

Relativamente aos ensaios de limite velocidade/binário, o critério de binário máximo admissível abaixo e acima da velocidade nominal foi a corrente nominal, podendo ser utilizado outro critério como a temperatura para valores mais exatos do binário, uma vez que para valores superiores à velocidade nominal o motor apresenta uma maior ventilação, pelo que pode ser injetada mais corrente, superior à corrente nominal.

Referências

1. Maheswaran, D., et al., "Energy efficiency in electrical systems", in 2012 IEEE International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems (PEDES), , Bengaluru, India, pp. 1-6, 16-19 December, 2012.
2. de Almeida, A.T., F.J.T.E. Ferreira, and G. Baoming, "Beyond induction motors - Technology trends to move up efficiency", in IEEE/IAS 49th Industrial & Commercial Power Systems Technical Conf (I&CPS) 2013, Stone Mountain, Georgia, pp. 1-13, April 30 -May 3 2013.
3. de Almeida, A.T., F.J.T.E. Ferreira, and J.A.C. Fong, "Standards for Efficiency of Electric Motors". Industry Applications Magazine, IEEE, vol.17,nº1, pp. 12-19, 2011
4. WEG- Programas para Rendimento Energética [consult: 06/01/2014 às 14:27]. Disponível em http://www.weg.net/green/_files/Diretivas-Globais-de-Eficiencia-Energetica_-_Apresentacao.pdf.
5. Chapman, S.J., *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed, pp. 292, 2005.
6. IEC-60034-31 ,ed 1, 2009
7. de Almeida, A.T., F.J.T.E. Ferreira, Fonseca Paula, Chretien Bruno, Hugh Falkner, Reichert C.C Juerger, West Mogens, Nielsen B. Sandie, Both Dick, " VSDs for Electric Motor Systems".
8. Agrawal, A., A. Srivastava, and A. Trivedi, "Performance investigation of three phase synchronous reluctance motor using finite element analysis", in 2012 IEEE Fifth Power India Conference, Murthal, India, pp. 1-5, 19-22 December, 2012.
9. Wei, M.-Y. and L. Tian-Hua, "Rotor position and speed estimation for a synchronous reluctance motor drive using dual current-slope technique", in 2011 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT),, Auburn, Alabama, USA, pp. 176-181, 14-16 March 2011.
10. Kolehmainen, J., "Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.25,nº2, pp. 450-456, 2010
11. Miller, T.J.E., C. Cossar, and A.J. Hutton, "Design of a synchronous reluctance motor drive", in Conference Record of the 1989 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1989, pp. 122-127 1-5 October, 1989.
12. Ilamparithi, T.C. and S. Nandi, "Detection of Eccentricity Faults in Three-Phase Reluctance Synchronous Motor". IEEE Transactions on Industry Applications, vol.48,nº4, pp. 1307-1317, 2012

13. Dabija, O., et al., "Study of a skewed rotor cage synchronous reluctance motor using finite element analysis", in 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) 2013, Bucharest, Romania, pp. 1-6, 23-25 May 2013.
14. Neti, P. and S. Nandi, "Determination of effective air-gap length of synchronous reluctance motors (SynchRel) from experimental data". IEEE Transactions on Industry Applications, vol.42,nº2, pp. 454-464, 2006
15. Niazi, P., et al., "A Low-Cost and Efficient Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive". IEEE Transactions on Industry Applications, vol.43,nº2, pp. 542-550, 2007
16. Staton, D.A., T.J.E. Miller, and S.E. Wood, "Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor". IEE Proceedings B, Electric Power Applications, vol.140,nº4, pp. 249-259, 1993
17. Bianchi, N., et al., "Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, vol.45,nº3, pp. 921-928, 2009
18. ABB-[consult: 10/02/2014 às 19:27]. Disponível em http://www.myren.com/iframe/nyhet_arkiv_eng.asp?id=107.

Anexo A – Equipamentos constituintes da bancada de ensaios

Os seguintes equipamentos foram descritos no capítulo 3, sendo que neste anexo vão ser abordados com maior detalhe.

A.1 Analisador de Potência Yokogawa WT1030M



Fig. 45- Imagem do analisador de potência utilizado nos ensaios do rendimento e limite de velocidade/binário.

A.2 Motor de indução trifásico WEG IE3 de 7.5kW



Fig. 46-Motor de teste da injeção de harmônicos.

Tabela 9- Características do motor de indução trifásico de teste.

Binário	48 Nm
Potência	7500W
Velocidade	1465 rpm
Tensão	400 V
Corrente	13.8 A
Fator de Potência	0,85
Número de Pólos	4
Rendimento	91,2%
Frequência	50 Hz

A.3 Motor de indução trifásico ABB IE3 de 11kW



Fig. 47-Motor de indução usado no paralelo.

Tabela 10- Características do motor do paralelo.

Binário	71,2 Nm
Potência	1100W
Velocidade	1473 rpm
Tensão	400 V
Corrente	20,4 A
Fator de Potência	0.84
Número de Pólos	4
Rendimento	92,3%
Frequência	50 Hz

A.4 Variador eletrônico de velocidade ABB ACS850-04 de 25 kW



Fig. 48- Variador eletrônico de velocidade utilizado no paralelo com o motor de indução de 11 kW.

A.5 Analisador de Energia e Potência Chavin Aurnoux 8334B



Fig. 49-Analisador de potência utilizado para analisar harmônicos da alimentação do motor de indução.

A.6 Equipamentos de medida Fluke



Fig. 50-Equipamentos de medida utilizados.

Tabela 11- Limites mínimos de precisão dos equipamentos de medida da norma 60034-2-1.

Grandeza	Limite mínimo de precisão
Potência (W)	0,2
Binário (Nm)	0,2
Tensão (V)	0,2
Corrente (A)	0,2
Velocidade (rpm)	1
Frequência (Hz)	0,1
Resistência (Ω)	0,2
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	1

O nosso equipamento de medida de potência apresenta uma precisão de 0.1, este foi utilizado para medir todas as grandezas exceto a resistência e a temperatura. O equipamento responsável pela medição da temperatura também cumpre o limite mínimo de precisão de 1 $^{\circ}\text{C}$.

Anexo B – Modelo de simulação

O variador é composto por um retificador a diodos, por um barramento DC com uma capacidade de 5000 mF e ainda um inversor composto por IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) com diodos em antiparalelo controlado por um controlo vetorial em que é ajustado pelo utilizador a velocidade em radianos por segundos que o motor funciona, como pode ser observado na Fig. 51.

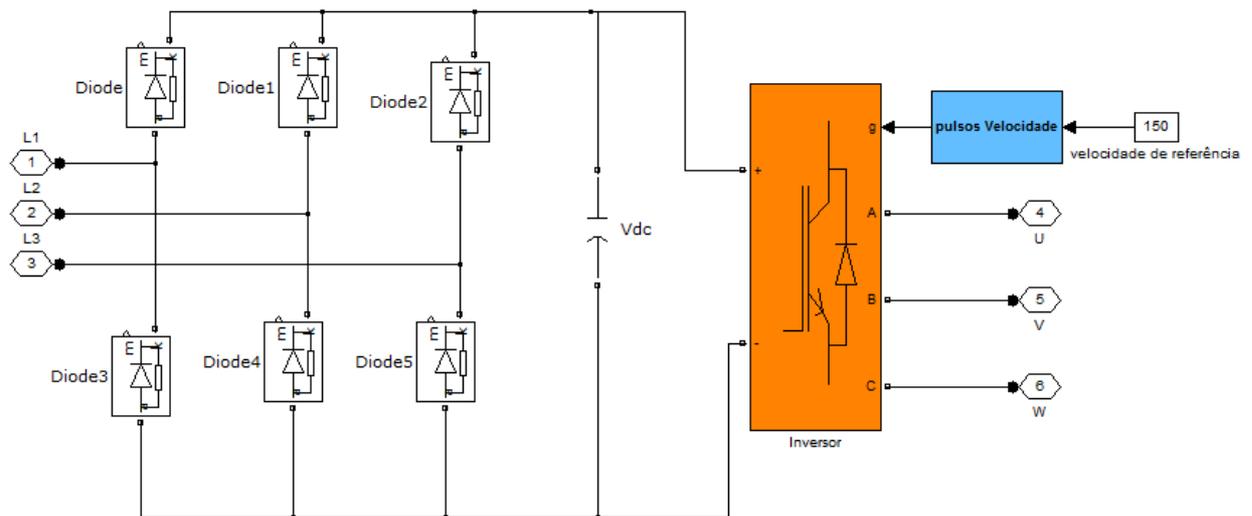


Fig. 51-Esquema de blocos do variador eletrónico de velocidade.

A simulação foi realizada no modo discreto com um tempo de amostragem de $2 \times 10^{-6}\text{ s}$.

Anexo C – Dados relativos ao conteúdo harmónico

Na Fig. 52 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/50 Hz e a 75% da carga nominal.

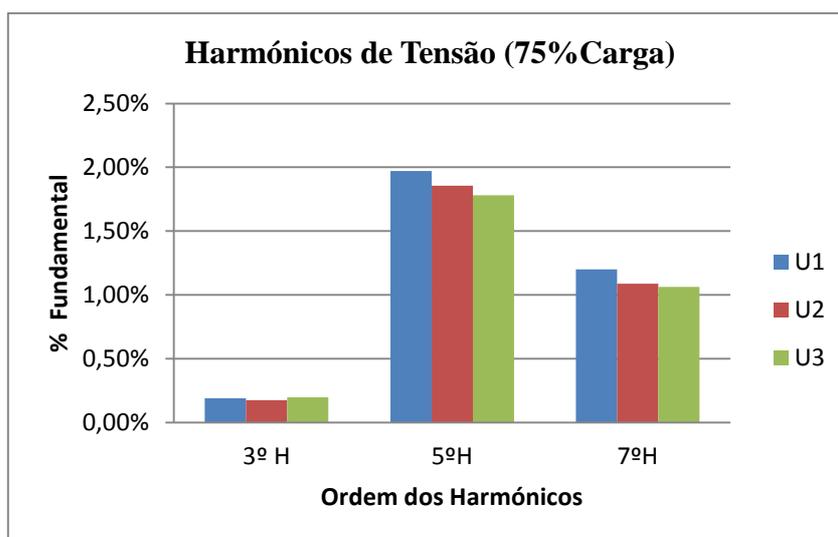


Fig. 52-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador a 75 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.

Na Fig. 53 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de corrente medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase.

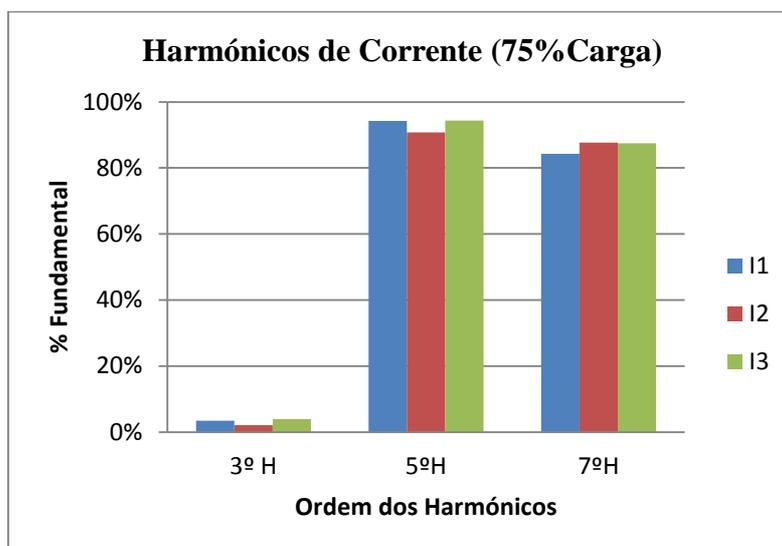


Fig. 53-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador a 75 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.

Na Fig. 54 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/50 Hz e a 50% da carga nominal.

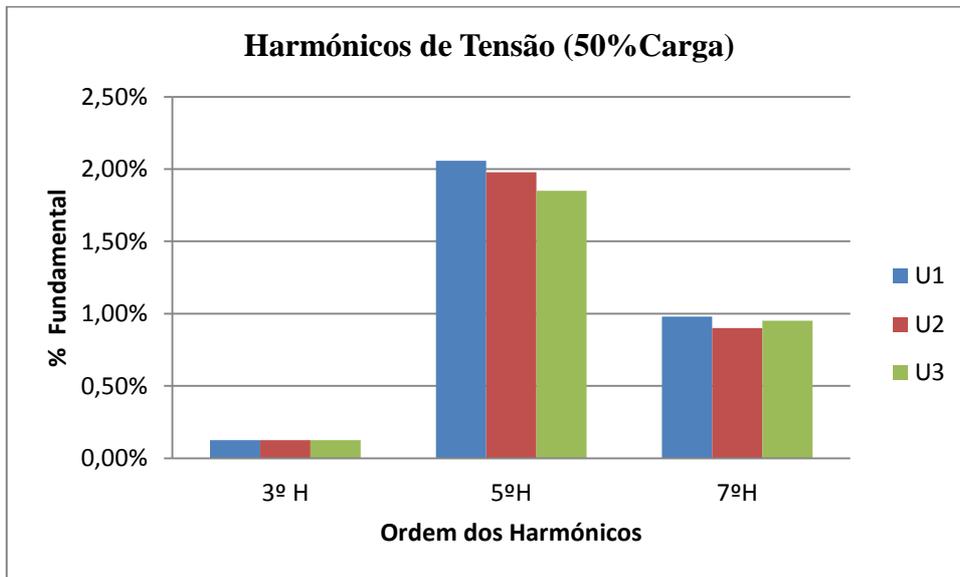


Fig. 54-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador a 50 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.

Na Fig. 55 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de corrente medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/50 Hz e a 50% da carga nominal.

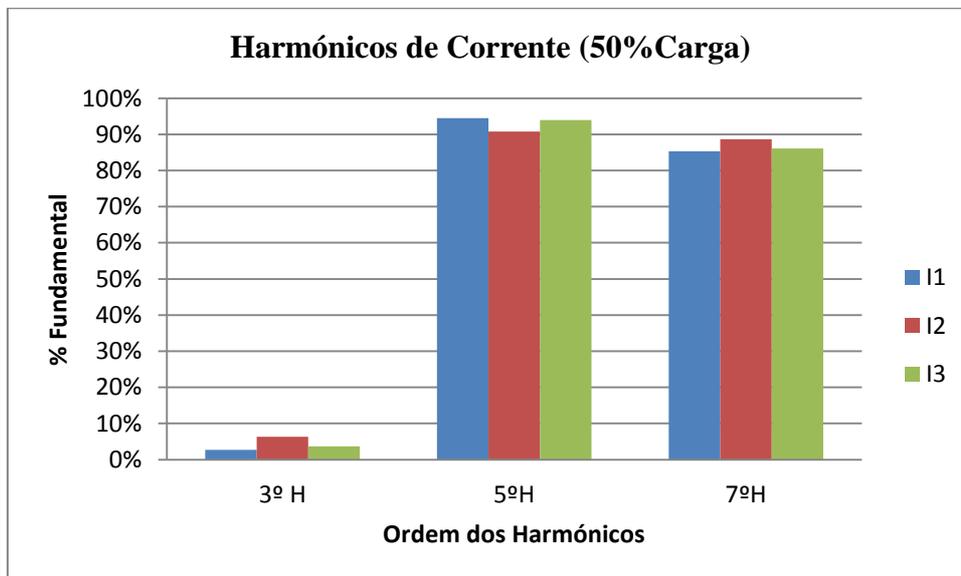


Fig. 55-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador a 50 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 50 Hz.

Na Fig. 56 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/24,2 Hz e a 49% da carga nominal.

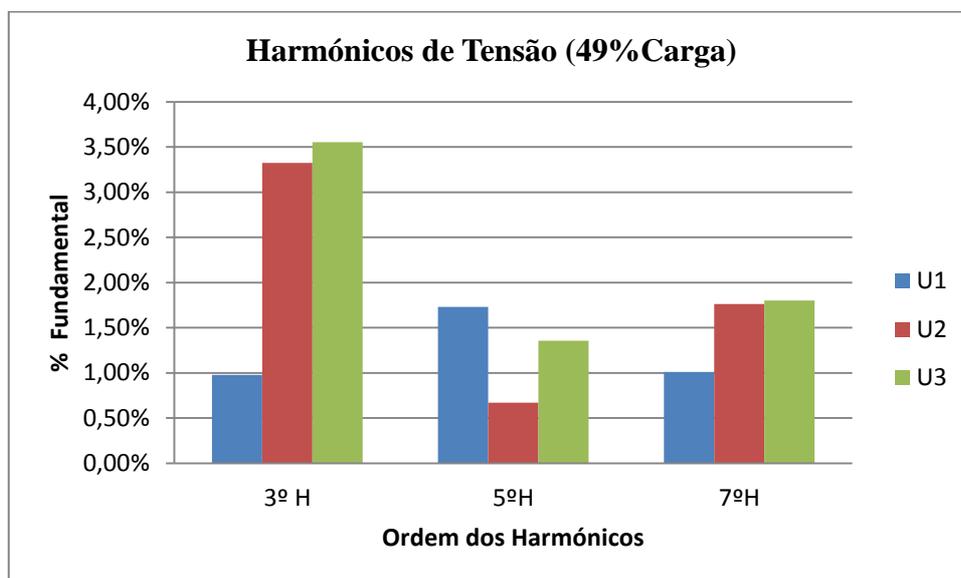


Fig. 56-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador a 49 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 24,2 Hz.

Na Fig. 57 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/24,2 Hz e a 49% da carga nominal.

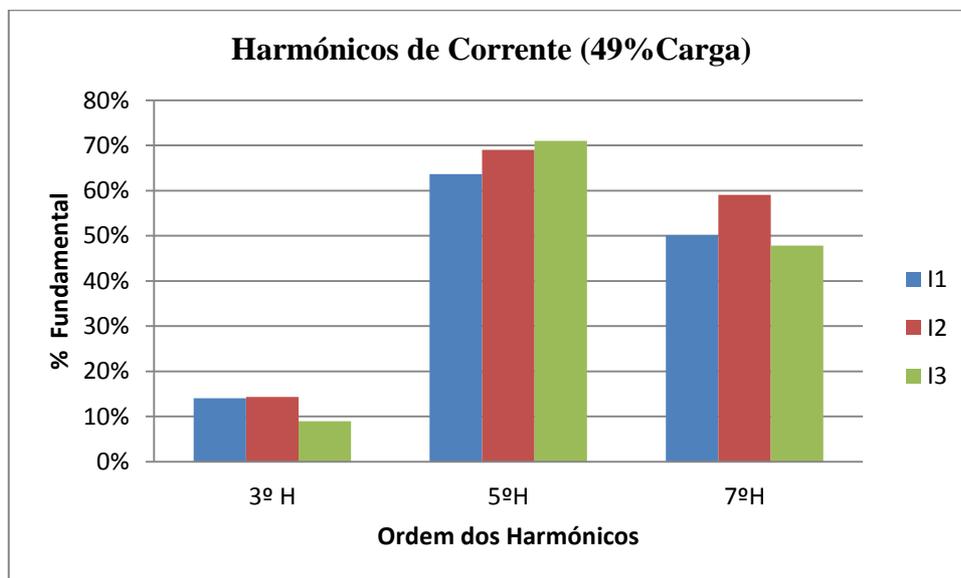


Fig. 57-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador a 49 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 24,2 Hz.

Na Fig. 58 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de tensão medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/10,8 Hz e a 26% da carga nominal.

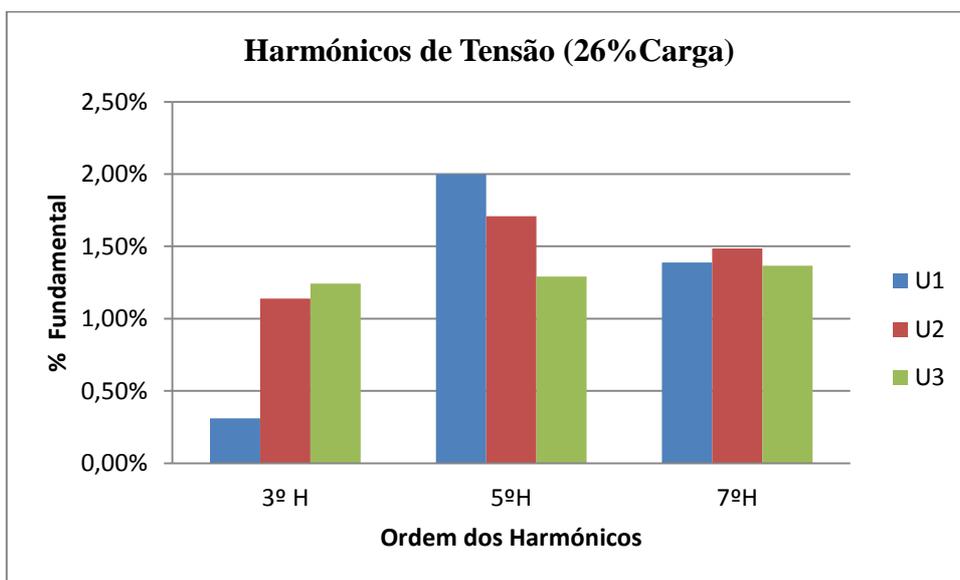


Fig. 58-Segmentação dos harmónicos de tensão na entrada do variador a 26 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 10,8 Hz.

Na Fig. 59 pode-se observar o terceiro, quinto e sétimo harmónico de corrente medidos na entrada do variador em função do harmónico fundamental de casa fase no ensaio em que foi alimentado a 400 V/10,8 Hz e a 26% da carga nominal.

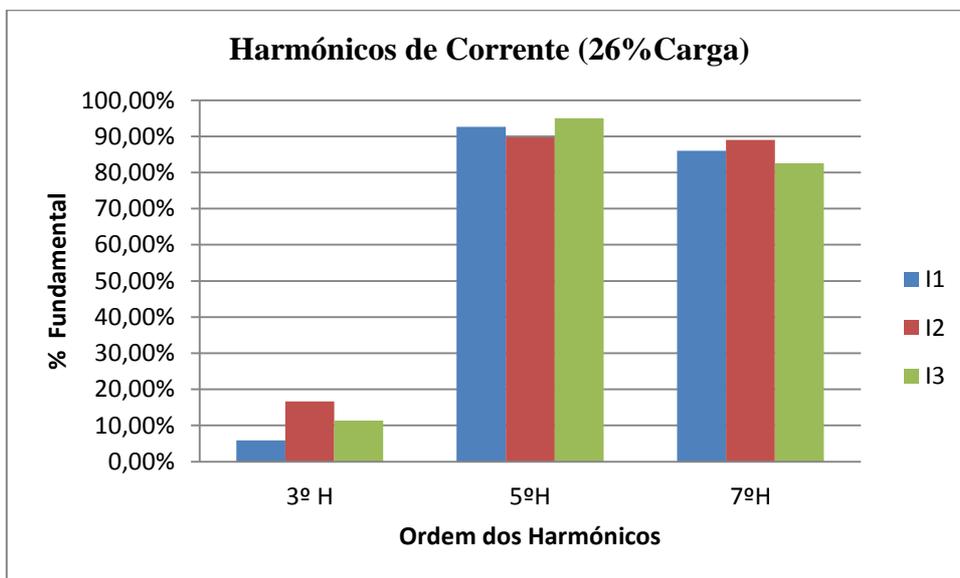


Fig. 59-Segmentação dos harmónicos de corrente na entrada do variador a 26 % da carga sendo alimentado a 400 V/ 10,8 Hz.