

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Conversor de frequência em MT aplicado ao ensaio de dupla frequência em motores elétricos de indução

João Pedro Bessa Barbosa



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira

Supervisor: Engenheiro Sérgio da Costa Mendes

27 de março de 2022

Resumo

A presente dissertação foi realizada com o apoio da WEGeuro e teve como objetivo o estudo, desenvolvimento, ensaio em laboratório e análise de resultados para um ensaio de elevação de temperatura de um motor de indução trifásico de média tensão em dupla frequência recorrendo ao conversor de frequência WEG MVW3000, produto WEG lançado em 2020. Foi também realizada a comparação com o ensaio à plena carga (dinamómetro).

O ensaio de máquinas de indução à plena carga têm sido o tradicionalmente aceite pelo mercado para determinar o parâmetro de elevação da temperatura. Este método tem a vantagem de simular com precisão as condições de operação da máquina a testar.

Porém, a este método acrescentam algumas complicações como a necessidade de ter um dinamómetro com característica igual ou superior à máquina em teste. Montar, acoplar e alinhar as máquinas elétricas implica um grande dispêndio de tempo, principalmente nos motores de grande potência, de elevada velocidade ou verticais.

O método de dupla frequência, sem a necessidade de potência elétrica nominal aplicada ao estator da máquina de indução ou aplicação de carga no eixo, vem a solucionar alguns dos entraves impostos pelo ensaio de acoplamento de carga. Este método é principalmente aplicado a máquinas de grande porte, logo o investimento num laboratório para efetuar ensaios de dupla frequência é elevado.

Se se efectuar um estudo cuidado do estado de arte, pouco é referido sobre a implementação deste método em laboratórios de média tensão, e, quando referido, recorre-se ao método de dupla fonte.

Com este trabalho, pretende-se efetuar ensaios de dupla frequência recorrendo a um conversor de frequência em MT, em que será realizada a alteração do software do MVW3000, discutindo aspetos que auxiliem no entendimento, na realização de ensaios e no levantamento de pontos importantes para a análise dos resultados obtidos e a comparação dos ensaios efetuados.

Keywords: Dupla frequência, Bi-frequência, Conversor de frequência, Inversor de Frequência, Variador de velocidade, Temperatura, MVW3000, Ensaio de motores

Abstract

The present dissertation was carried out with the support of WEGeuro and aimed at the study, development, laboratory test and analysis of results for a temperature rise test of a three-phase medium voltage dual frequency induction motor using the frequency converter WEG MVW3000, WEG product launched in 2020. A comparison with the full load test (dynamometer) was also carried out.

The test of induction machines at full load has been traditionally accepted by the market to determine the temperature rise parameter. This method has the advantage of accurately simulating the operating conditions of the machine to be tested.

However, this method adds some complications such as the need to have a dynamometer with a characteristic equal to or superior to the machine under test. Assembling, coupling and aligning electrical machines involves a great deal of time, especially in high-power, high-speed or vertical motors.

The dual frequency method, without the need for rated electrical power applied to the stator of the induction machine or application of load on the shaft, solves some of the obstacles imposed by the load coupling test. This method is mainly applied to large machines, so the investment in a laboratory to perform dual frequency tests is high.

If a careful study of the state of the art is carried out, little is said about the implementation of this method in medium voltage laboratories, and, when mentioned, the dual source method is used.

With this work, we intend to carry out dual-frequency tests using a frequency converter in MV, in which the MVW3000 software will be changed, discussing aspects that help in the understanding, in the tests and in the survey of important points for the analysis of the results obtained and the comparison of the tests carried out.

Keywords: Dual frequency, Bi-frequency, Frequency converter, Frequency inverter, Speed variator, MVW3000, Motor testing

Agradecimentos

Os meus merecidos agradecimentos são dirigidos à minha família, pai, mãe, irmão e avós, pelo exemplo, pelo investimento em mim e na minha educação, por me terem estimulado e acreditado em mim, pelas horas que não passamos juntos, pelo apoio incondicional e por me terem ajudado a transpor mais um desafio.

Ao professor José Rui, obrigado pela possibilidade de ter trabalhado consigo, por toda a disponibilidade, apoio, interesse e exigência como professor e ao longo deste trabalho. Foi um enorme prazer.

Ao engenheiro Sérgio Mendes, só tenho a agradecer por toda a confiança, apoio, disponibilidade e ensinamentos que com alegria e afabilidade me foram transmitidos. Um enorme obrigado pela oportunidade concebida de hoje fazer parte da equipa do SAQE na WEGeuro.

A toda a equipa do SAQE na WEGeuro por toda a disponibilidade, boa disposição, ajuda e partilha de conhecimento, sempre me fizeram sentir em casa com o fantástico ambiente de trabalho.

À WEGeuro, por me terem recebido muito bem, disponibilizado todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste projeto.

À equipa da WEG Automação no Brasil, muito obrigado por toda a disponibilidade apresentada e orientação para a realização deste projeto.

A todos os meus amigos que a FEUP me deu, Kevin, André e Diogo que sendo tão diferentes são tão iguais. Agradeço por todo o companheirismo, a ajuda, os momentos de alegria e de partilha que passamos juntos.

Uma palavra de apreço para o meu grande amigo "Chefinho", obrigado por acreditares sempre em mim, por todo o apoio, disponibilidade e exemplo de superação pessoal.

A todos os outros que não referi, que tornaram possível a concretização desta visão, um muito obrigado.

Em último, e que por sua vez o mais importante, agradeço à Ana Marta. Ser-te-ei eternamente grato, obrigado!

João Barbosa

*“Tell me and I forget.
Teach me and I remember.
Involve me and I learn.”*

Benjamin Franklin

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
1.4	Desenvolvimento da dissertação em ambiente empresarial	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Princípio de funcionamento dos Inversores de frequência PWM	5
2.2	Ensaio de Dupla Frequência	6
2.2.1	Artigos científicos relativos a ensaios de dupla frequência	7
2.2.2	Princípio de Funcionamento	9
2.3	Apresentação genérica do MVW3000	10
2.3.1	Transformador de Entrada	11
2.3.2	Células de Potência	14
2.3.3	Conexão das Células	15
2.3.4	Controlo	18
2.4	Motor de Indução Trifásico	19
2.4.1	Aspetos Construtivos	20
2.4.2	Princípio de Funcionamento do MIT	21
2.4.3	Variação de velocidade de motores de indução trifásicos	21
2.4.4	Ensaio de elevação de temperatura e Normas IEC	23
3	Simulação <i>MATCAD</i>	27
4	Ensaio e Resultados	33
4.1	Arquitetura do Laboratório	33
4.2	Bancada do Laboratório de ensaios WEG	34
4.2.1	Tensões, Correntes e Temperatura	34
4.3	Atualização Software	40
4.4	Características do MVW3000 e do Motor	41
4.5	Ensaio à carga nominal - DOL	43
4.6	Ensaio de Dupla Frequência	45
4.6.1	Introdução da Segunda Frequência	45
4.6.2	Ensaio preliminares	46
4.6.3	Ensaio e Resultados	49
4.7	Ensaio DOL Validação	49
4.8	Comparação Resultados	50

5	Conclusões e Trabalhos Futuros	53
5.1	Conclusões	53
5.2	Trabalhos Futuros	54
A	Tabelas de dados dos ensaios	55
B	Imagens Medições	57
	Referências	63

Lista de Figuras

2.1	Princípio de Funcionamento dos Inversores de Frequência PWM [11]	6
2.2	Ilustração das possíveis fontes para ensaios em Dupla Frequência	10
2.3	Ilustração geral do painel do MVW3000	11
2.4	Diagrama do transformador desfasador de entrada	11
2.5	Número de enrolamentos secundários isolados por nível de tensão	12
2.6	Número de pulsos possíveis de se obter relativo ao número de células	13
2.7	Transformador de entrada do MVW3000 de 18 células (mecânica B6)	13
2.8	Região de conexão das células de cada fase	13
2.9	Esquema básico de uma célula de potência	14
2.10	Esquema de conexão das células nas fases	15
2.11	Diagrama simplificado do MVW3000 para n células de potência	16
2.12	Forma de onda da tensão de fase para um CHB de 3 células por fase	17
2.13	Diagrama simplificado do controlo central	18
2.14	Rack de controlo padrão do MVW3000	19
2.15	MIT Componentes [14]	20
2.16	Curva da relação V_1/f_1 [11]	23
2.17	Curva binário x velocidade do motor [11]	23
2.18	Curva da relação da potência com a frequência [11]	23
2.19	Sistema de recuperação de energia até 2MW [4]	24
2.20	Sistema de recuperação de energia para motores acima dos 2MW [4]	25
2.21	Sistema do Ensaio em Dupla Frequência	25
3.1	Rotação em função do Tempo-Vazio	28
3.2	Rotação em função do Tempo-Dupla Frequência	28
3.3	Rotação em função do Tempo-Dupla Frequência	28
3.4	Binário Eletromagnético no Vazio	29
3.5	Binário Eletromagnético em Dupla Frequência	29
3.6	Binário Eletromagnético em Dupla Frequência	30
3.7	Correntes no Estator Vazio	30
3.8	Correntes no Estator Dupla Frequência	31
4.1	Esquemático da arquitetura do laboratório WEGeuro - Maia [11]	33
4.2	Bancada do Laboratório de ensaios WEGeuro	35
4.3	Esquema relativo à obtenção da tensão e corrente por fase	35
4.4	ZIMMER HST	36
4.5	ZIMMER PCTSIU-4-1U e Wattímetro Digital YOKOGAWA WT1806E respetivamente	36
4.6	Esquema da ligação dos PT100	37

4.7	Unidade de aquisição de temperatura de 60 canais	37
4.8	Unidade de aquisição de dados YOKOGAWA MW100	38
4.9	Ligações servidor do Laboratório	38
4.10	Aquisição das temperaturas no Excel	39
4.11	Rack de Controlo do MVW3000	40
4.12	Chapa de características MVW3000	41
4.13	Chapa de características WEG W60 630 L 4	41
4.14	Ligação nos terminais do estator - W60 630 L 4	42
4.15	Motor de indução trifásico WEG W60 630 L 4	42
4.16	Acoplamento motor freio	43
4.17	Temperatura diversos pontos do motor ao longo do ensaio	44
4.18	Elevação de Temperatura	44
4.19	Arquitetura do laboratório WEGeuro - Maia [11] - Dupla Frequência	45
4.20	Resultados preliminares ensaio Dupla Frequência	47
4.21	Falha de sobretensão na célula V3	47
4.22	Resultados ensaio teste segunda frequência a 60 Hz	48
4.23	Osciloscópio no controlo dos barramentos das fases U, V e W	48
4.24	Ensaio de DF a 60 Hz com os diferentes pontos de medição	49
4.25	Curva elevação da temperatura DF a 60 Hz	50
4.26	Ensaio DOL com os diferentes pontos de medição	50
4.27	Curva elevação da temperatura DOL	51
4.28	Elevação de temperatura DOL vs DF	51
4.29	Comparação consumo de potência aparente (S)	52
A.1	Tabela dos valores recolhidos do ensaio DOL	55
A.2	Tabela dos valores recolhidos do ensaio DF a 60 Hz	55
A.3	Tabela dos valores recolhidos do ensaio DOL Final	55
A.4	Tabela comparação DF (60Hz) vs DOL	56
B.1	Valores adquiridos ensaio vazio Entrada e Saída MVW3000	57
B.2	Gráficos adquiridos ensaio em vazio Entrada e Saída MVW3000	58
B.3	Valores adquiridos ensaio DF (60 Hz) Entrada e Saída MVW3000	58
B.4	Gráficos adquiridos ensaio em vazio Entrada e Saída MVW3000	59
B.5	Valores adquiridos ensaio DOL Entrada e Saída MVW3000	59
B.6	Gráficos adquiridos ensaio em DOL Entrada e Saída MVW3000	60
B.7	Tensão nominal no freio	60
B.8	Corrente RMS no freio	61

Acrónimos

AC	Corrente Alternada
CVVF	Tensão Constante Frequência variável
DC	Corrente Contínua
DF	Dupla Frequência
DOL	Direct-Online
HMI	Interface Homem-Máquina
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor
MIT	Motor de Indução Trifásico
PC	Personal Computer
PWM	Pulse Width Modulation
rad	Radianos
RMS	Valor Eficaz (Root mean square)
TI	Transformador de Corrente
THD	Taxa Harmónica de Distorção
TT	Transformador de Tensão
Vdc	Tensão corrente contínua
VSD	Variador
V	Volt
VVVF	Tensão Variável Frequência variável

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será realizada uma contextualização do tema da dissertação, bem como serão apresentados os aspectos que motivaram o estudo e ensaio do motor de indução trifásico em diferentes condições. São descritos os objetivos propostos bem como a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização e Motivação

Os motores de indução têm sido amplamente usados na indústria desde há cerca 170 anos. Estas máquinas elétricas são relativamente baratas havendo aplicações de baixa a elevada potência (desde as centenas de W a dezenas de MW). Geralmente utilizados como motores para converter energia elétrica em energia mecânica, estes, podem também operar como geradores. Naturalmente, estas máquinas quando alimentadas, dissipam energia. Esta energia dissipada é proveniente de perdas elétricas e mecânicas (perdas joule no rotor e estator, perdas no ferro e perdas mecânicas). Esta energia dissipa-se na forma de calor, fazendo aumentar a temperatura de operação da máquina elétrica. Com isto, o ensaio de temperatura de uma máquina para determinar a curva de aquecimento bem como a energia dissipada torna-se importante, tanto para o fabricante como para o cliente, pois, afeta os materiais de isolamento, o sistema de refrigeração e a eficiência da máquina elétrica.

Para efetuar um ensaio de temperatura numa máquina de indução, o método mais utilizado e implementado nos laboratórios implica o acoplamento ao eixo de carga plena. Aplicar carga numa máquina elétrica de potência consideravelmente elevada requer equipamento de ensaio igualmente de grande porte ou uma segunda máquina idêntica. Em muitos casos, uma carga de proporções suficientes não está disponível, sendo que, a disponibilidade de métodos alternativos de ensaio que permitam a simulação da condição de carga nominal é, sem dúvida, muito importante para o laboratório, tendo em consideração o ensaio de máquinas de grande porte.

Uma máquina de indução conduz correntes de carga quer quando transmite força para o eixo, bem como quando transforma a energia cinética armazenada no eixo. Quando a velocidade do rotor é inferior à velocidade de sincronismo, a máquina irá comportar-se como um motor e, como esperado, quando a velocidade do rotor for superior à velocidade de sincronismo vai operar como

um gerador. Quando a velocidade do rotor oscila em torno da velocidade síncrona, a máquina irá variar alternadamente entre motor e gerador. Aquando este fenómeno, flui corrente adicional para aumentar e diminuir a velocidade do rotor, sem fornecer qualquer conjugado ao eixo. Relativamente às perdas, a máquina funciona como se estivesse acoplada a uma carga equivalente.

Para criar este tipo de operação na máquina elétrica foram concebidos diferentes esquemas. O mais abordado bibliograficamente é o método de conexão de duas fontes de tensão, de frequências distintas, em série, a uma máquina de indução fazendo com que a velocidade síncrona da onda de tensão oscile em torno da velocidade do rotor. Este procedimento é denominado por Ensaio de Dupla Frequência.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho incide no estudo do método de ensaio de Dupla Frequência utilizando o inversor WEG MVW3000, abordando aspetos que contribuam para o conhecimento, realização de ensaios e conclusões, analisando a possibilidade da implementação futura deste método como válido no laboratório da WEG. Como objetivos deste trabalho pretende-se:

- Apresentar o principal método de ensaio utilizado pela indústria na avaliação térmica de uma máquina de indução trifásica e a respetiva norma.
- Apresentar o conceito do método de ensaio de Dupla Frequência, respetiva norma, bem como o estudo detalhado de bibliografia e análise das conclusões obtidas por outros autores.
- Atualizar e alterar parâmetros no MVW3000 para permitir a introdução da segunda frequência, através da manipulação da ponte de IGBTs.
- Efetuar um estudo do laboratório de ensaios da WEGeuro, bem como dos equipamentos presentes que tornarão os ensaios válidos através do resultado dos mesmos.
- Realizar os ensaios necessários, comparando os resultados obtidos com o ensaio padrão.
- Apresentar aspetos importantes de desempenho, de operação e de adversidades encontradas bem como possíveis implementações futuras.

Este trabalho recorre à implementação do MVW3000, Inversor de Frequência da WEG, como fonte para o ensaio de dupla frequência. O método de aplicação de um inversor é pouco abordado noutras bibliografias, sendo que não se encontram registos bibliográficos da sua implementação em média tensão.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação apresenta-se organizada em cinco capítulos.

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema, com o seu devido enquadramento, motivação, objetivos e estrutura da dissertação. O desenvolvimento do trabalho em ambiente empresarial é detalhado neste capítulo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos conteúdos mais relevantes para a realização desta dissertação, como o princípio de funcionamento dos inversores de frequência PWM, estudo dos ensaios de Dupla Frequência, apresentação genérica do MVW3000 e uma pequena abordagem ao motor de indução trifásico e às normas associadas à validação dos ensaios de elevação de temperatura.

No capítulo 3 é apresentada uma simulação no *MATCAD* de auxílio ao entendimento do ensaio de Dupla Frequência comparativamente ao ensaio em vazio num MIT.

No capítulo 4 é abordado o laboratório de ensaios e o material de medição associado, são apresentados os resultados relativos ao ensaio DOL e dupla frequência.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho realizado e apontados possíveis trabalhos futuros.

1.4 Desenvolvimento da dissertação em ambiente empresarial

O desenvolvimento da presente dissertação foi efetuado na WEGeuro – Indústria Elétrica, S.A com parceria estabelecida pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

A WEGeuro, foi fundada em 2002 com a abertura de uma unidade fabril no concelho da Maia, tendo recentemente, em 2017, expandido através de uma nova unidade fabril em Santo Tirso. É uma filial da WEG, “casa mãe”, presente no Brasil no estado de Santa Catarina. A WEGeuro é uma referência nacional da indústria dedicada ao fabrico de motores elétricos, projeto e implementação de soluções de automação, energia e serviços. A empresa tem procurado reforçar a sua posição competitiva no mercado global, apostando em estratégias de internacionalização, através de transações, investimento direto e envolvimento em projetos específicos. Para a entidade, a abertura ao “mercado internacional” permite acesso a tecnologias inovadoras, possibilitando a continuidade e implementação do que define a WEG, qualidade dos seus produtos e processos. Por fim, importante referir que enquanto empresa de enorme escala e implementação global, preocupe-se com a inovação, qualidade, produtividade e sustentabilidade.

No desenvolvimento deste trabalho, foi efetuado um contrato entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, WEGeuro e o Mestrando, possibilitando ao Mestrando trabalhar no dia a dia em ambiente empresarial nas instalações WEGeuro na Maia, com o intuito de adquirir conhecimentos e “know-how” para o seu desenvolvimento pessoal e para o desenvolvimento do trabalho que deu origem a esta dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Princípio de funcionamento dos Inversores de frequência PWM

Os inversores estáticos de frequência com tensão imposta PWM são atualmente os equipamentos com maior utilização para a alimentação de motores de baixa tensão em aplicações industriais que requerem variação de velocidade. Os inversores de frequência PWM operam como uma interface entre a fonte de energia e o motor de indução [11].

Para obtenção da tensão e frequência desejadas por meio de inversores de frequência PWM, tem-se três fases:

- Retificador.
- Filtro.
- Inversor.

O retificador tem como função, através de uma ponte de díodos, efetuar a retificação do sinal alternado, de tensão e frequência constantes, provenientes da rede de alimentação, num sinal contínuo. O filtro, têm como objetivo a regulação e o alisamento da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de condensadores. O inversor, constituído por uma ponte de transístores IGBT, têm como papel a ondulação da tensão contínua, proveniente do filtro, convertendo-a em tensão alternada com tensão e frequência variáveis. A figura 2.1, apresenta um esquema simplificado da operação do inversor estático de frequência [11].

Relativamente ao modo de controlo dos inversores eletrónicos, poderemos ter controlo vetorial ou controlo escalar.

O controlo vetorial permite atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controlo do binário e da velocidade do motor. Neste tipo de controlo decompõe-se a corrente do motor em dois vetores: fluxo magnetizante e binário, permitindo assim uma regulação independente. O controlo vetorial pode ser realizado em malha aberta (*sensorless*) ou em malha fechada (com realimentação). O controlo em malha aberta, apresenta limitações relativamente ao binário, principalmente a

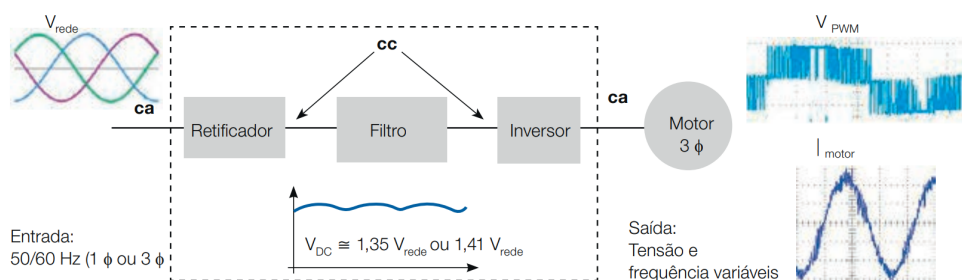


Figura 2.1: Princípio de Funcionamento dos Inversores de Frequência PWM [11]

baixas rotações. Quando opera a velocidades superiores, estas limitações são inexistentes. O controlo em malha fechada, permite a maior precisão possível no controlo da velocidade e do binário, inclusive com uma velocidade de rotação nula [11].

O controlo escalar impõe no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter esta relação constante, isto é, o motor trabalha com o fluxo aproximadamente constante. O controlo escalar é aplicado para configurações que não necessitem de respostas rápidas a comandos de binário e velocidade, e é também uma configuração interessante para implementações de múltiplos motores usando um único inversor. O controlo é realizado em malha aberta, sendo que, a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, que varia em função da carga, já que a frequência no estator é imposta [11].

O controlo escalar é o mais utilizado devido à sua simplicidade e ao facto que a maior parte das aplicações não requer grande exatidão e/ou rapidez no controlo da velocidade [11].

As principais diferenças entre os dois tipos de controlo são que o controlo escalar apenas considera as amplitudes das grandezas elétricas instantâneas (fluxos, tensões e correntes), referindo-as ao estator, sendo que o equacionamento baseia-se no circuito equivalente do motor, ou seja, são equações de regime permanente. Relativamente ao controlo vetorial, este admite a representação das grandezas instantâneas por vetores, tendo como base as equações espaciais dinâmicas da máquina, com as grandezas referidas ao fluxo enlaçado pelo rotor, ou seja, o motor de indução é visto pelo controlo vetorial como um motor de corrente contínua, sendo que existe regulação independente do binário e fluxo [11].

2.2 Ensaio de Dupla Frequência

O método de ensaio de dupla frequência foi apresentado, no ano de 1921, por Ytterberg. Este método, surgiu como opção de avaliação de motores verticais, de difícil acoplamento e como alternativa de menor custo para ensaios em motores de grande porte. Este método pode ser aplicado a motores com rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado.

Geralmente este método é usado para ensaios de aquecimento da máquina, visto que, para o cálculo das perdas da máquina, com os avanços tecnológicos e poder computacional disponíveis, estas podem ser estimadas com alguma precisão [5].

Os ensaios de dupla frequência têm uma ampla definição na literatura anglo-saxónica, podendo estar definido como *Mixed Frequency*, *Dual Frequency* e também são encontrados textos em que este método é referido como Carga Equivalente. Estes ensaios têm como característica a introdução de um padrão de tensão não sinusoidal consistindo em duas (ou mais) componentes harmónicas aplicadas aos terminais da máquina de indução. Este ensaio irá provocar um fluxo de corrente de carga total no motor, em velocidade nominal, sem a necessidade de acoplamento mecânico de uma carga. Com isto a potência à entrada do sistema será equivalente às perdas totais do sistema em situação de carga total do motor, sendo que nestas condições o aumento da temperatura da máquina pode ser medido com precisão [5].

2.2.1 Artigos científicos relativos a ensaios de dupla frequência

Apesar de o método de ensaio de dupla frequência ser um método estabelecido há muito tempo, o número de publicações é baixo sendo que este ensaio é pouco adotado na indústria de máquinas.

Hill (1965) [15] refere que o método de ensaio de dupla frequência oferece uma elevada exatidão relativamente ao ensaio de elevação de temperatura pois garante as seguintes condições:

- O valor da corrente à máxima carga e o valor da tensão no valor nominal estavam presentes no mesmo instante.
- Estavam presentes, no mesmo momento, perdas no fluxo e o fluxo principal.
- As perdas totais do sistema foram medidas com um wattímetro verificando-se uma diferença residual entre o ensaio de acoplamento do veio à carga máxima e o ensaio de dupla frequência.

Em 1976, Radic e Strupp [12] analisaram os ensaios de dupla frequência. Os autores referem que este método de ensaio pode ser aplicado a todo tipo de motores de indução até aos 12 MVA. Foi feito um estudo em diferentes motores para verificar a exatidão do ensaio de temperatura utilizando o método da Dupla Frequência. Referem que quando a diferença entre as frequências é inferior a 5 Hz, a instrumentação analógica torna-se imprecisa para efetuar medidas pois a exatidão do método é reduzida. O autor recomenda a utilização de instrumentação digital para manter a exatidão nos valores obtidos. Além disso, concluíram que o método garante com precisão a determinação da curva de aquecimento dos enrolamentos do motor.

Schwenk (1977) [13] testou um motor de aproximadamente 8 MW aplicando o método de dupla frequência. O autor refere que a aplicação das duas tensões de valores de magnitude e frequência específicos ao estator de um motor de indução, mostra que as perdas obtidas são aproximadamente iguais às obtidas num ensaio em carga máxima. Foi também verificado que, durante o ensaio de aquecimento da máquina, os resultados relativos ao ensaio de dupla frequência têm valores uns Graus Celcius acima dos registados em condições normais. O autor refere que a vantagem principal deste tipo de ensaios é a eliminação do acoplamento do veio.

O Ensaio de dupla frequência têm sido um método em que a empresa do autor (Westinghouse Electric Corporation) recorre há muitos anos no teste de grandes motores de indução de dois polos para ensaios de aquecimento e para verificação das vibrações à temperatura nominal. O autor refere que, apesar de ser um método valioso para prever a curva de aquecimento do motor, os testes de eficiência, fator de potência e da curva de binário não podem ser estudados.

Por fim, no conhecimento do autor, não existe uma investigação teórica restrita ao estudo de máquinas a operar em dupla frequência aplicada ao estator.

Jordon (1977) [5] recomenda o uso do método de dupla frequência para determinar a curva de temperatura dos motores de indução. O autor refere que as perdas no ensaio de dupla frequência (4292 Watts) estão muito perto dos 4078 Watts obtidos através do método de carga máxima num motor de indução trifásico de aproximadamente 225kW. Por fim, concluiu que o ensaio de dupla frequência apenas pode ser utilizado para ensaios de temperatura, pois não é possível determinar a eficiência ou o fator de potência das máquinas de indução.

Meyer e Lorenzen (1979) [1] efetuaram e retiraram valores de ensaios de temperatura utilizando o método de dupla frequência e compararam com os resultados obtidos no método convencional de acoplamento do veio do motor. Como conclusão, os autores mencionam que o método de dupla frequência é adequado para a determinação do aumento da temperatura dos enrolamentos do motor e permite que a eficiência do motor seja determinada com um grau elevado de precisão.

Em 1980, Palit [3], observou que o método de dupla frequência é equivalente ao método convencional de acoplamento de carga, a nível de ensaios de temperatura. Contudo, Palit refere que as vibrações da máquina eram anormais e que a movimentação do veio do motor na direção axial provocava uma indesejada pressão na chumaceira do motor.

Plevin (1988) [8] analisou o método de dupla frequência ao detalhe. Refere que o efeito dominante do teste é o "batimento" das tensões do estator. Quando a tensão do estator aumenta, ocorre um aumento do binário provocando um aproximar da velocidade do rotor para a velocidade de sincronismo. O autor explica que dependendo da velocidade do rotor, sendo esta maior ou menor que a velocidade de sincronismo, irá provocar que a máquina em teste trabalhe como gerador ou motor respetivamente. Alterar a frequência de sincronismo pode provocar que a máquina opere como motor ou gerador. Por fim o autor refere que os resultados relativamente ao ensaio de temperatura excederam os valores obtidos no ensaio de carga total do mesmo e que os níveis de vibração eram anormais devido à oscilação do binário.

Peebles Electrical Machines [5] refere que as perdas totais num ensaio de dupla frequência são superiores às perdas num ensaio de carga total. Concluíram que o teste não pode ser usado para calcular com precisão a eficiência do motor visto não ser possível medir o fator de potência

com carga máxima.

Em 2008, Glauco Andre [4] refere que o método de ensaio em dupla frequência pode ser utilizado, com elevada precisão, como um método alternativo aos ensaios em carga total pois verifica a classificação térmica à qual a máquina estudada foi projetada. Refere também que este método pode ser uma boa alternativa devido ao menor investimento necessário em equipamentos de laboratório comparativamente ao ensaio de carga total. Com alguma importância, o autor refere que as máquinas que irão ser avaliadas no laboratório de ensaio devem ter os seus acoplamentos e bases projetadas para suportar oscilações de binário, garantindo que não irão ocorrer quebras e acidentes durante a realização do ensaio.

Todas as publicações referidas anteriormente focam ensaios de dupla frequência recorrendo a mais do que uma fonte. Em 1993, Grantham e Rahman testaram um motor de indução com recurso a um inversor controlado por um micro processador. Este micro processador tinha como objetivo fazer um controlo sobre o inversor para evitar a necessidade de recorrer a mais do que uma fonte para o ensaio de dupla frequência bem como a capacidade de alteração rápida da frequência da fonte que alimenta a máquina.

Çolak em 1994 [5] efetuou ensaios de dupla frequência recorrendo a Inversores. Os resultados obtidos relativos ao ensaio do motor de indução de gaiola de esquilo foram comparados ao ensaio de carga total. As perdas no cobre do estator de ambos os ensaios foram aproximadamente iguais, as perdas mecânicas em ambos os ensaios foram iguais.

Relativamente ao ensaio de temperatura, num ensaio de dupla frequência em VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) verificou-se um crescimento constante da temperatura. As temperaturas no núcleo da máquina demonstraram ser inferiores aos valores obtidos no ensaio de carga total, mas as temperaturas no rotor da máquina estavam um pouco superiores (5° a 6° Celsius).

Operando em CVVF (Constant Voltage Variable Frequency) obteve-se uma curva de temperatura com um crescimento constante, sendo que neste teste as temperaturas no estator da máquina foram as mesmas que as obtidas no ensaio de referência e as temperaturas no rotor foram inferiores.

2.2.2 Princípio de Funcionamento

Considerando um motor de indução a operar em vazio com tensão, frequência e rotação nominais, se a fonte de tensão deste motor aumentar a frequência, consequentemente, o motor irá aumentar a sua velocidade de rotação e, após esse tempo de aceleração, continuará a operar em vazio mas com uma velocidade de rotação superior. Durante o período de aceleração, o motor irá consumir potência por parte da fonte de alimentação com o objetivo de acelerar a massa do rotor, aumentando consequentemente a corrente. Esta variação de frequência da fonte, deve ser adequadamente rápida de modo a que se drene a corrente nominal no estator deste motor durante o período de aceleração. Se subsequentemente a frequência da fonte de alimentação for alterada,

mas com o objetivo de reduzir o seu valor, consequentemente a velocidade do motor irá reduzir e o rotor irá retornar a energia de rotação para a fonte de alimentação durante o período de desaceleração, operando neste período como um gerador de indução [4].

Considerando o referido anteriormente, se houver continuidade na oscilação da frequência da fonte de alimentação de forma sucessiva e adequada, a máquina, apesar de estar a operar em vazio, com tensão e correntes nominais, altera a sua operação entre motor e gerador. Esta condição de funcionamento é também atingida aplicando-se duas frequências no motor a ser testado [4].

Mesmo não havendo acoplamento de carga no veio do motor, a aplicação simultânea de duas frequências pode simular uma condição de carga sendo que pode ser implementado para ensaios de temperatura.

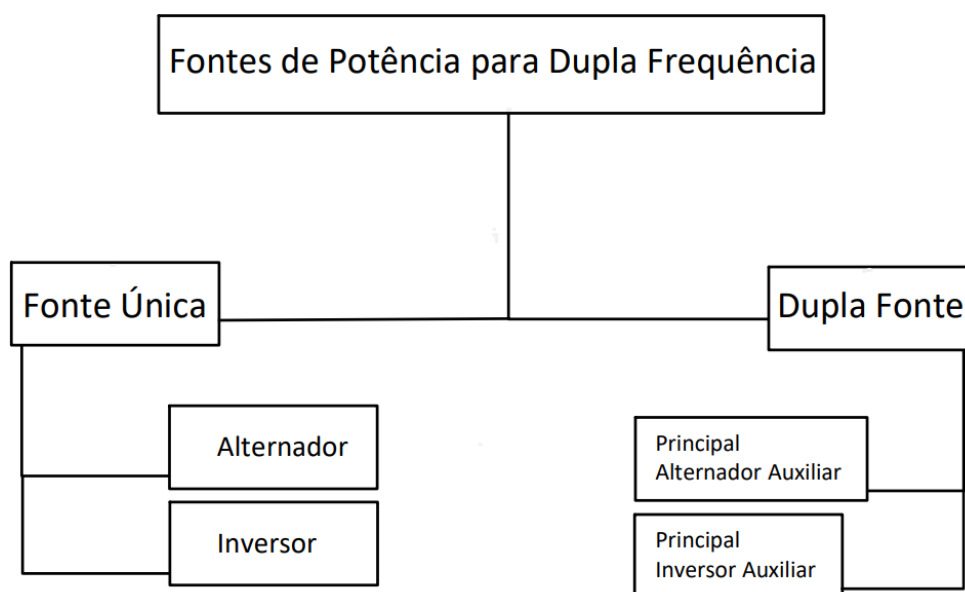


Figura 2.2: Ilustração das possíveis fontes para ensaios em Dupla Frequência

Na figura 2.2, podemos observar várias possibilidades para efetuar ensaios de dupla frequência. No trabalho que conduziu a esta dissertação usou-se uma fonte única de potência que foi um inversor (MVW3000). O uso de um inversor de frequência como fonte de potência para alimentar o motor com dupla frequência, providencia uma variedade de controlo sobre a tensão e frequência de saída bem como a eliminação de outra fonte necessária para introdução da segunda frequência comparativamente com outros processos [5].

2.3 Apresentação genérica do MVW3000

O MVW3000, figura 2.3, é um inversor de frequência destinado ao controlo de motores de média tensão com valores nominais de 1,15 kV a 13,8 kV e para um intervalo de potência de 65 kW a 12085 kW. Baseado numa topologia de células de baixa tensão (<1000V) conectadas

em série com o intuito de formar cada fase do inversor, a sua montagem modular permite várias configurações caso, seja necessário, accionar motores de elevada potência.



Figura 2.3: Ilustração geral do painel do MVW3000

2.3.1 Transformador de Entrada

O inversor MVW3000 possui um transformador de entrada, pois a topologia de células em cascata exige que a alimentação de cada célula seja isolada entre si. Este transformador é constituído de forma a atender várias funções para o MVW3000, como o isolamento necessário para as células de potência, cancelamento de harmónicos de corrente proveniente dos retificadores de entrada das células e também possui um enrolamento auxiliar, responsável pela pré-carga do sistema.

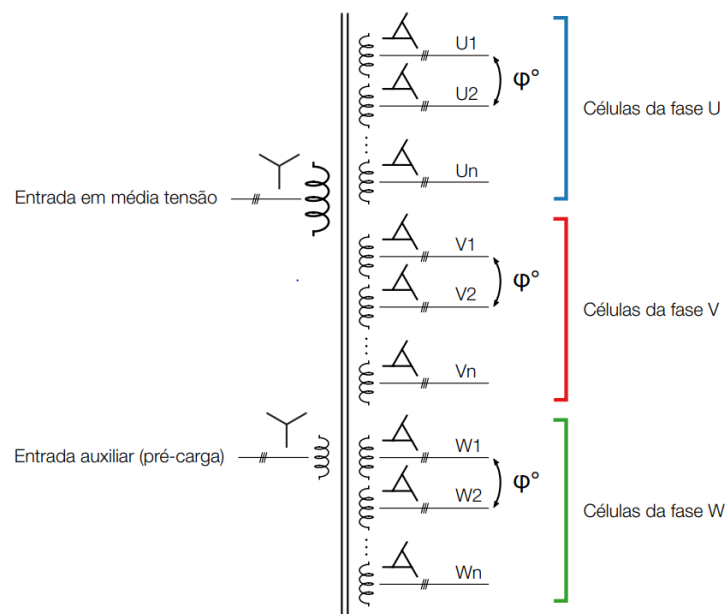


Figura 2.4: Diagrama do transformador desfasador de entrada

A configuração do transformador é efetuada em estrela-triângulo estendido com ângulos de defasagem φ° entre os enrolamentos secundários de uma fase, figura 2.4. Os enrolamentos principais do primário (ligados em estrela) e os enrolamentos da entrada auxiliar (ligados em estrela), não possuem defasagem entre si.

O transformador é projetado de acordo com o número de células usadas no inversor. São $3 \times 3 \times n$ enrolamentos (número de fases do motor $\times$ número de fases de entrada da célula $\times$ número de células por fase) formando n secundários isolados, que processam $1/(3n)$ da potência nominal do inversor totalizando um secundário por célula.

A quantidade de enrolamentos secundários depende da quantidade de células. A figura 2.5 apresenta a quantidade de secundários do transformador principal necessários para a alimentação das células.

Tensão de saída [kV]	1,15	2,3	3,3	4,16	5,5	6,3-6,9	7,2-8	9	10	11	12	13,2-13,8
Secundários quantidade	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36

Figura 2.5: Número de enrolamentos secundários isolados por nível de tensão

Os enrolamentos secundários do transformador apresentam defasagens projetadas de acordo com a quantidade de células e especificação de nível dos harmónicos desejados. A defasagem auxilia no cancelamento das componentes harmónicas provenientes dos dispositivos semicondutores não controlados. Pelo facto de cada célula possuir na entrada um retificador a díodos de seis pulsos e os secundários estarem desfasados entre si, o primário do transformador reconhece múltiplos de seis pulsos nos seus enrolamentos.

Quanto maior for o número de pulsos, menor será o ângulo de defasagem entre os secundários e menor será a taxa de distorção harmónica vista pelo primário do transformador. Menores ângulos de defasagem implicam uma maior dificuldade de fabrico e controlo dos parâmetros do transformador durante a produção. Tendo em consideração o referido, procura-se uma boa relação entre complexidade e desempenho.

Na figura 2.6 apresentam-se as possíveis configurações do transformador de entrada para diferentes números de células instaladas no painel do MVW3000

Na figura 2.7 estão indicados os pontos de conexão para as entradas das células de potência, no caso, as fases R, S e T. Os enrolamentos, de tensão nominal de 690 ou 710 Vrms, processam $1/18$ da potência nominal do inversor, no caso do MVW3000 de 18 células.

As células de fase U, V e W estão conectadas fisicamente ao transformador principal, conforme apresentado na figura 2.8. Estas configurações podem variar dependendo do modelo.

O transformador possui o seu próprio painel, ficando totalmente integrado no MVW3000.

Tensão do motor	Células por fase	Total de células	Número de pulsos padrão	Número de pulsos redundante N+1
1150 V	1	3	18 ⁽¹⁾	36 ⁽¹⁾ , 18
2300 V	2	6	36 ⁽¹⁾ , 18	54, 18 ⁽¹⁾
3300 V	3	9	54, 18 ⁽¹⁾	72, 36, 24 ⁽¹⁾
4160 V	4	12	72, 36, 24 ⁽¹⁾	90, 30 ⁽¹⁾
5500 V	5	15	90, 30 ⁽¹⁾	108, 54, 36 ⁽¹⁾
6000-6900 V	6	18	108, 54, 36 ⁽¹⁾	126, 42 ⁽¹⁾
7200-8000 V	7	21	126, 42 ⁽¹⁾	144, 72, 48 ⁽¹⁾
9000 V	8	24	144, 72, 48 ⁽¹⁾	162, 54 ⁽¹⁾
10000 V	9	27	162, 54 ⁽¹⁾	180, 90, 60 ⁽¹⁾
11000 V	10	30	180, 90, 60 ⁽¹⁾	180, 90, 60 ⁽¹⁾
12000 V	11	33	198, 66 ⁽¹⁾	216, 108, 72 ⁽¹⁾
13200-13800 V	12	36	216, 108, 72 ⁽¹⁾	216, 108, 72 ⁽²⁾

(1) Opção padrão;
(2) Redundância de célula (N+1) apenas para o modelo 13200 V, modelo 13800 V sem redundância.

Figura 2.6: Número de pulsos possíveis de se obter relativo ao número de células

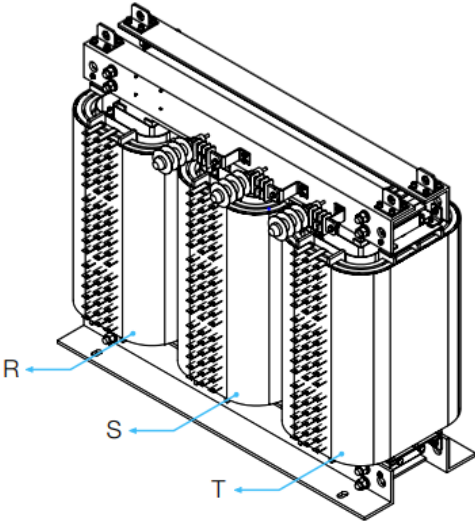


Figura 2.7: Transformador de entrada do MVW3000 de 18 células (mecânica B6)

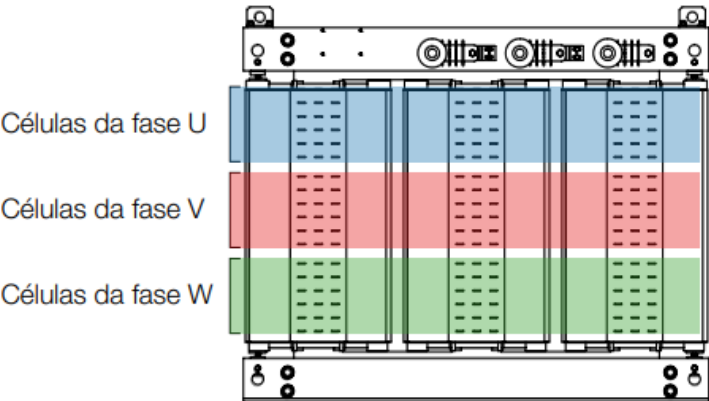


Figura 2.8: Região de conexão das células de cada fase

2.3.2 Células de Potência

As células de potência utilizadas nos braços do MVW3000, são inversores monofásicos de baixa tensão (tensão de saída de 690 ou 710 Vrms), numa topologia conhecida por ponte em H ou ponte completa. Na figura 2.9 podemos observar um esquema básico do circuito da célula de potência. Cada célula conta com a alimentação de um secundário próprio (trifásico) do transformador principal, que garante o isolamento de média tensão do inversor.

As tensões trifásicas de entrada dos módulos são então retificadas por uma ponte de *Graetz* utilizando dispositivos semicondutores não controlados (diodos), formando um barramento DC próprio com adição dos condensadores à célula (representado por C1).

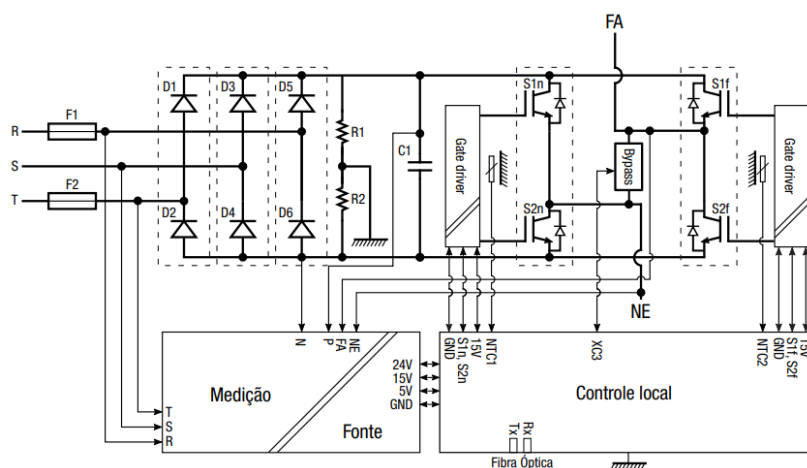


Figura 2.9: Esquema básico de uma célula de potência

Dispositivos semicondutores controlados por IGBT são utilizados para implementar a ponte inversora em H, assim, cada célula de potência apresenta na sua configuração quatro IGBTs como se pode verificar na figura 2.9. Durante a operação, a tensão entre os terminais de saída FA e NE possui três níveis. Considerando que a tensão no barramento DC de cada célula é V_{dc} e que apenas dois IGBTs podem estar a comutar simultaneamente, quando S1f e S2n estão a operar, a tensão em FA e NE será $+V_{dc}$, ao passo que se S1n e S2f estiverem a operar, a tensão FA e NE será $-V_{dc}$. Se S1n e S1f ou S2n e S2f estiverem ligados, a tensão, em ambos os casos, será igual a zero.

Cada célula de potência conta com um módulo de controlo local. Este módulo comunica com o módulo de controlo principal por meio de uma interface de fibra ótica, necessária para se obter, além do grau de isolamento necessária para a comunicação, imunidade a ruídos, maior robustez e confiabilidade, características necessárias para a aplicação. O controle local faz aquisições e monitoriza grandezas relevantes para o funcionamento da célula.

O controle local também é responsável por acionamentos locais, como a comutação dos IGBTs e o disparo do sistema de bypass. Caso a célula apresente leituras fora dos padrões esperados para operação, como por exemplo, temperaturas próximas de danificar os semicondutores, sobretensão no barramento DC, ou outras falhas previstas pelo controle, o sistema de bypass poderá ser acionado para proteger uma possível falha da célula ou retirar de operação uma célula já danificada.

2.3.3 Conexão das Células

Para formar uma saída trifásica, um número n de células de potência, que operam com 690 ou 710 Vrms, são agrupadas em série por fase. Na figura 2.10 podemos observar os conjuntos de células que representam as fases U, V e W, que são conectadas em estrela com um neutro flutuante comum às fases.

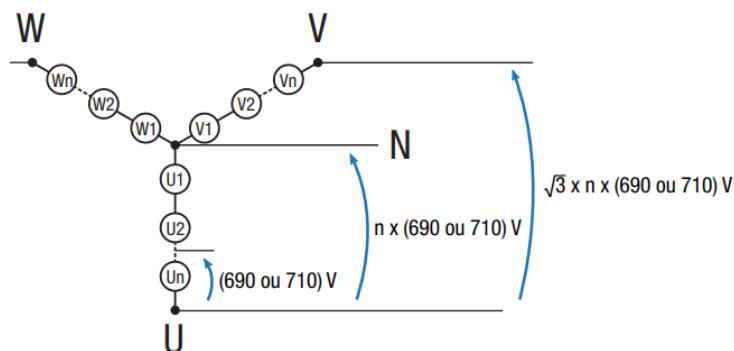


Figura 2.10: Esquema de conexão das células nas fases

A figura 2.11 apresenta o transformador, o cubículo de entrada e o secundário conectados a cada uma das células. A associação em série das células de potência faz com que seja possível obter mais níveis de tensão à saída do inversor. Localmente cada célula produz três níveis de tensão, porém, na saída trifásica do inversor é possível obter $2n+1$ níveis de tensão de fase e $4n+1$ níveis de tensão de linha.

Este efeito ocorre, pois instantaneamente a tensão de cada fase é dada pela soma das tensões nos terminais FA e NE de cada uma das células pertencentes à fase analisada. A figura 2.12 ilustra a soma das tensões de cada célula para formar a tensão de fase num MVW3000 de 9 células (3 por fase).

Desta forma, aumentando o número de células por fase, além de possibilitar o acionamento de motores com tensões e potências mais elevadas, obtém-se uma melhor aproximação a uma forma de onda perfeitamente sinusoidal na saída. Assim, o conversor proporciona uma menor THD, redução de ruídos e vibrações no motor, operando com alta eficiência.

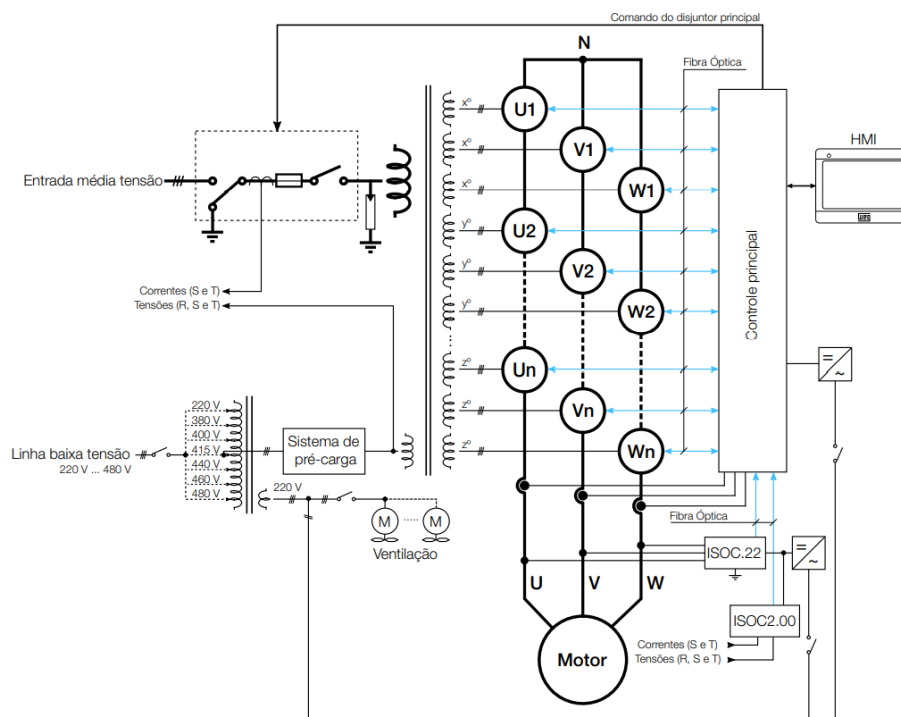


Figura 2.11: Diagrama simplificado do MVW3000 para n células de potência

Podemos também observar na figura 2.11 o cubículo de entrada de média tensão, o enrolamento auxiliar de baixa tensão para a realização da pré-carga dos condensadores das células, bem como a interface da fibra ótica entre o controle principal e o controle local das células de potência.

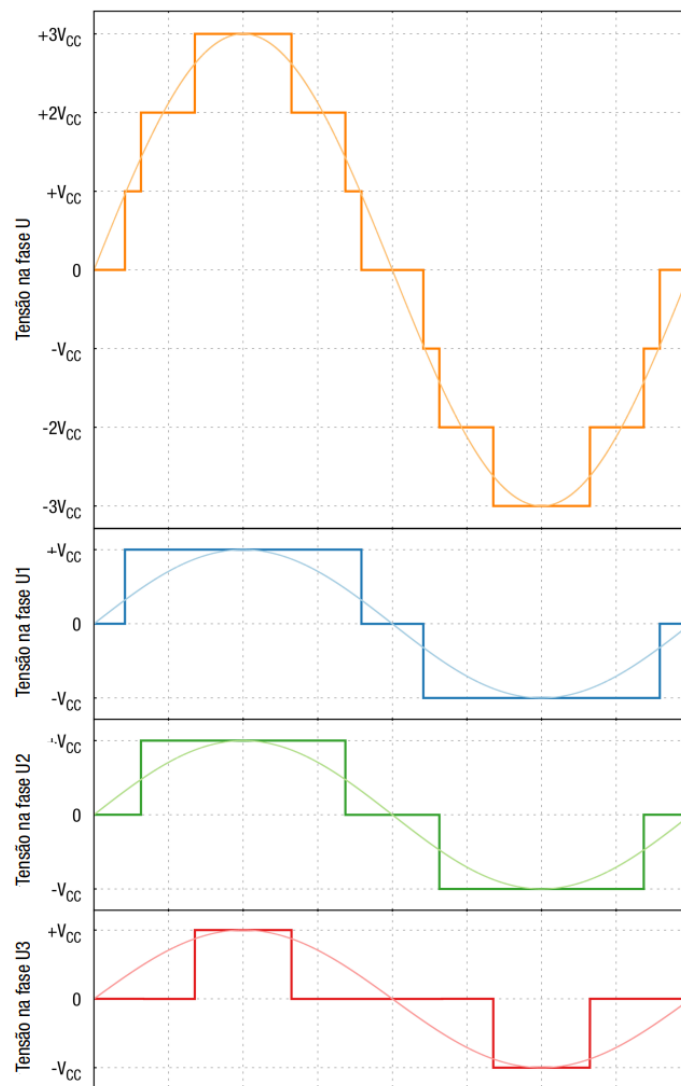


Figura 2.12: Forma de onda da tensão de fase para um CHB de 3 células por fase

2.3.4 Controle

O MVW3000 possui proteções de sobrecarga, curto-circuito, limitação de corrente, sub e sobretensão, sobre temperatura, descargas à terra e monitorização das falhas individuais de cada célula de potência. O tipo de controle pode ser definido pelo utilizador entre: controle escalar ou controle vetorial.

O inversor MVW3000 utiliza a técnica de modulação PWM, a partir da tensão contínua de cada um dos barramentos DC independentes, sintetiza uma tensão alternada, com frequência e amplitude variáveis nos terminais de saída. O nível de média tensão é obtido nos terminais de saída do inversor a partir da associação de "n" células de baixa tensão em série.

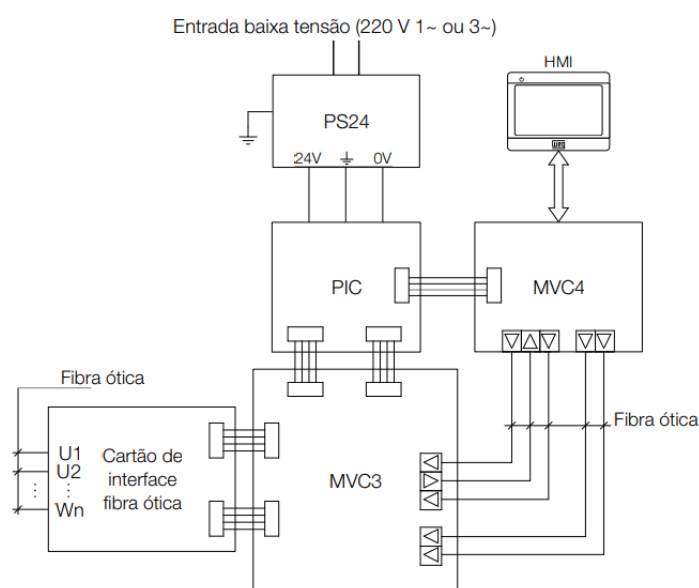


Figura 2.13: Diagrama simplificado do controlo central

As correntes de saída das três fases (correntes do motor) são medidas utilizando-se TIs de efeito Hall. Estes sinais de corrente são enviados para a carta de controlo central. A medida é realizada com o objetivo da implementação das funções de controlo e proteção do inversor, bem como da indicação na HMI.

A pré-carga é realizada por meio de um sistema de limitadores de corrente e um enrolamento auxiliar do transformador de entrada, o qual é acionado na inicialização do MVW3000. Esta pré-carga dos condensadores das células servirá para evitar sobrecargas de corrente de arranque do inversor, acionar sistemas de proteção ou mesmo danificar os seus próprios componentes. A alimentação auxiliar também é responsável por alimentar o circuito de controlo e os ventiladores para o arrefecimento do painel.

Na figura 2.14 podemos observar uma ilustração da montagem do rack de controlo. O rack de controlo é composto pela carta de fontes e interface (PCI2), a carta de controlo (MVC3), uma carta

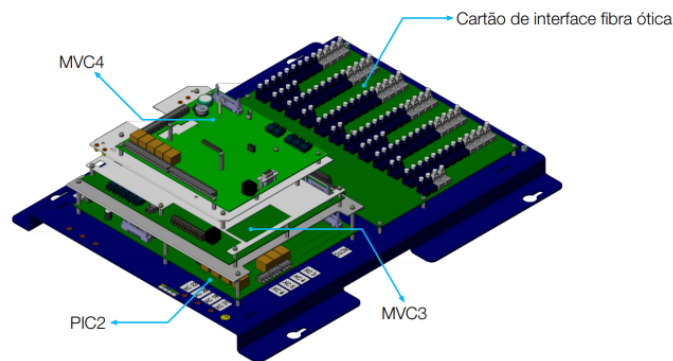


Figura 2.14: Rack de controle padrão do MVW3000

de funções do utilizador (MVC4) e uma carta de interface de fibra ótica (FOI3, FOI4 ou CIB). A carta MVC3 é responsável pelo controlo do motor e do inversor e a carta MVC4 realiza as tarefas de interface com o utilizador.

Na carta de controlo MVC4 podem ser ligadas, opcionalmente, cartas de comunicação Field-bus e/ou cartas de expansão de funções (EBA, EBB ou EBC). As conexões de sinais entre a carta MVC3 e as células de potência são realizadas por cabos de fibra ótica através da carta de interface (FOI3, FOI4 ou CIB).

2.4 Motor de Indução Trifásico

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é uma máquina elétrica de corrente alternada com uma vasta utilização em sistemas de acionamento eletromecânicos. Tendo as seguintes características principais:

- Circuito indutor bobinado localizado no estator.
- Circuito induzido localizado no rotor.
- Circuito magnético totalmente laminado.
- Característica mecânica tipo *shunt*.

Nos anos recentes, através de um crescimento gradual, o MIT têm sido a principal escolha para a substituição de outros motores convencionais, como são os casos do motor de corrente contínua e o motor síncrono. O MIT apresenta uma vasta aplicação devido à sua capacidade para apresentar elevadas velocidades de rotação, construção mais robusta, baixos custos de produção e baixa manutenção. [6]

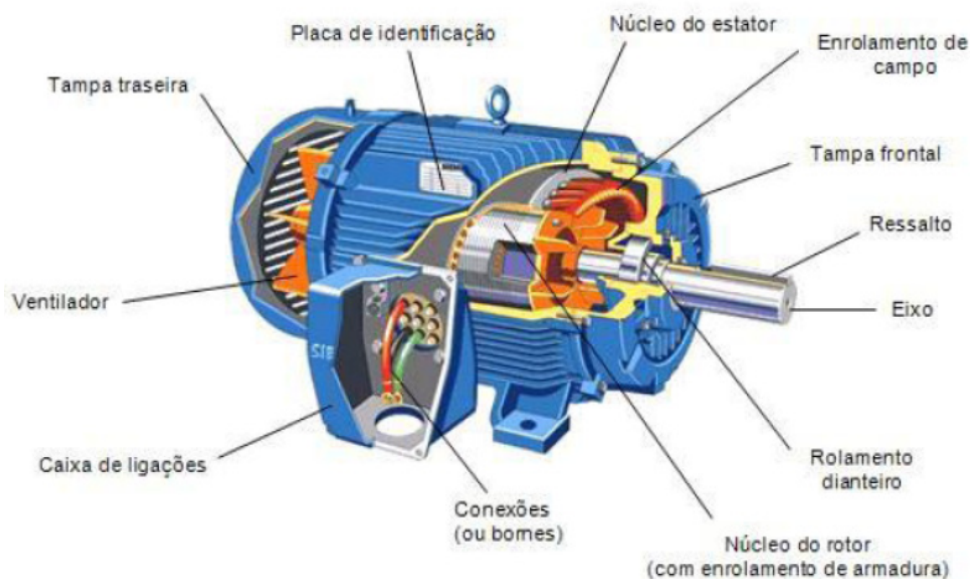


Figura 2.15: MIT Componentes [14]

2.4.1 Aspetos Construtivos

O MIT é constituído por três grandes elementos: estator, rotor e a estrutura mecânica (figura 2.15).

O estator é constituído por um circuito elétrico e um circuito magnético. O circuito elétrico é formado por três bobinas. Estas encontram-se defasadas no espaço de $\frac{2\pi}{3}$ rad elétricos e destinam-se a ser alimentadas por cada uma das fases do sistema. O circuito magnético do estator é formado por chapas de aço magnético (ferro, dopagem de silício e vestígios de carbono), com formato de coroa circular, ranhuras alinhadas axialmente e igualmente espaçadas na periferia, revestidas por um verniz isolante. Entre estas, podem existir canais de passagem de ar com vista à ventilação da máquina [7].

O rotor é constituído por um núcleo magnético e por um circuito elétrico. O núcleo magnético apresenta chapas magnéticas com formato de coroas circulares que possuem ranhuras na vizinhança da periferia exterior. O circuito elétrico rotórico pode apresentar duas topologias: rotor bobinado ou rotor em gaiola de esquilo. O rotor em gaiola de esquilo, é constituído por uma gaiola em alumínio, contendo um nível baixo de impurezas, configurando um circuito elétrico polifásico em curto-circuito permanente. Visto que é constituído por um material com uma baixa resistividade relativamente ao material ferromagnético em que se encontra envolvido, não existe a necessidade de aplicação de um material isolante [7]. O rotor bobinado contacta com um sistema coletor de anéis - escovas, permitindo modelar o valor dos parâmetros, relativos à resistência rotórica, durante o funcionamento da máquina.

Relativamente a assegurar a proteção dos componentes internos (rotor e estator) do meio exterior e o bom funcionamento da máquina, temos a estrutura mecânica. A carcaça do motor pode ter 3 tipos de composição: Alumínio injetado a baixa ou alta pressão, ferro fundido ou chapas de

ação soldado. O veio apoia-se em chumaceiras, colocadas na tampa da carcaça, sendo que é sobre este que é montado e enchavetado o núcleo rotórico. [6]

2.4.2 Princípio de Funcionamento do MIT

O princípio de funcionamento do motor de indução trifásico baseia-se na alimentação do circuito elétrico estatórico por um sistema de tensões trifásico, provocando a circulação de corrente elétrica nos condutores das bobinas das fases que formam o enrolamento. Com a passagem das correntes elétricas nas espiras das bobinas de fase do enrolamento resulta um campo girante de força magnetomotriz, que roda no espaço do entreferro à velocidade de sincronismo [7] traduzida pela expressão 2.1.

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (2.1)$$

Onde n_s representa a velocidade de sincronismo expressa em rotações por minuto (rpm), f é a frequência de alimentação (Hz) e p o número de polos.

Como o circuito rotórico encontra-se curto-circuitado, o movimento deste campo magnético girante induz forças eletromotrizes alternadas dando origem a correntes elétricas que circulam nos condutores do enrolamento rotórico. Pela lei de Lenz, o rotor irá girar em torno do seu eixo com a mesma velocidade e sentido do campo girante estatórico. Devido à existência de binário resistente no veio do motor, o rotor irá girar com uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade de sincronismo. O deslizamento, que representa a diferença entre a velocidade de sincronismo e a velocidade de rotação, traduz-se pela expressão 2.2.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

Onde n representa a velocidade do rotor em rotações por minuto (rpm), n_s representa a velocidade de sincronismo expressa em rotações por minuto (rpm) e s o deslizamento em rotações por minuto (rpm).

O assincronismo presente na operação do motor, deve-se ao facto de não existir uma relação constante entre a velocidade de rotação e a frequência de alimentação [7].

2.4.3 Variação de velocidade de motores de indução trifásicos

Analisando as expressões 2.1 e 2.2 podemos obter a expressão 2.3

$$n = \frac{120 * f_1}{n_s} (1 - s) \quad (2.3)$$

onde f_1 representa a frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz).

A análise da fórmula demonstra que se pode atuar sobre três parâmetros, com o intuito de variar a velocidade de um motor:

- Variação do número de polos.
- Deslizamento.
- Frequência da tensão estatórica.

Atualmente, o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução é através de inversores estáticos de frequência. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, numa tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando a frequência da tensão de alimentação, varia também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina [11].

O binário desenvolvido pelo motor de indução é traduzido pela expressão 2.4:

$$T = k_1 * \phi_m * I_2 \quad (2.4)$$

Desprezando a queda de tensão provocada pela resistência e reatância dos enrolamentos estáticos, o fluxo magnético é traduzido pela expressão 2.5:

$$\phi_m = k_2 * \frac{V_1}{f_1} \quad (2.5)$$

Onde T representa o binário disponível na ponta do eixo (N.m), ϕ_m o fluxo de magnetização (Wb), I_2 a corrente rotórica (A), V_1 tensão estatórica (V), por fim k_1 e k_2 são constantes que dependem do material e do projeto da máquina [11].

Admitindo que a corrente depende da carga e que esta é constante, entende-se, que variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação, o fluxo e consequentemente o binário permanecem constantes. O motor fornece assim um ajuste contínuo de velocidade e conjugado em relação à carga mecânica. Para a mesma carga, mantendo-se constante o escorregamento da máquina em qualquer velocidade, as perdas, de acordo com as condições de carga, podem ser minimizadas.

Através das equações 2.4 e 2.5 obtemos os gráficos apresentados nas figuras 2.16, 2.17 e 2.18:

Na figura 2.16, podemos observar que a variação de V_1 é feita linearmente com f_1 até à frequência base (nominal) do motor. Acima desta, a tensão é máxima, permanecendo constante, havendo apenas variação da frequência aplicada ao enrolamento estatórico do motor.

Acima da frequência base, encontra-se a chamada região de enfraquecimento de campo, e através da análise da figura 2.17, observamos que com estas características é provocada uma redução do binário.

Por fim na figura 2.18, como $P_1 = T_1 * V$, sendo V a velocidade de rotação, em rotações por minuto, a potência útil do motor cresce linearmente até à frequência base e permanece constante acima desta.

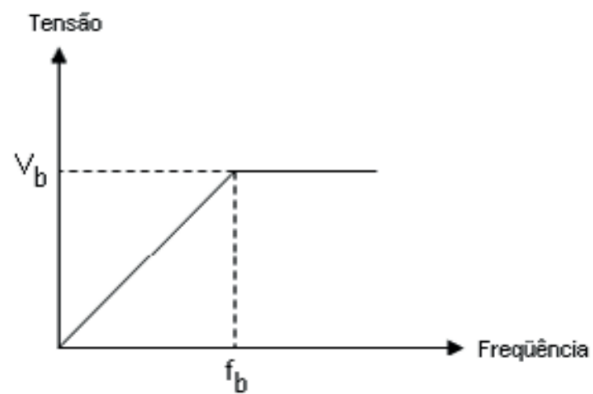
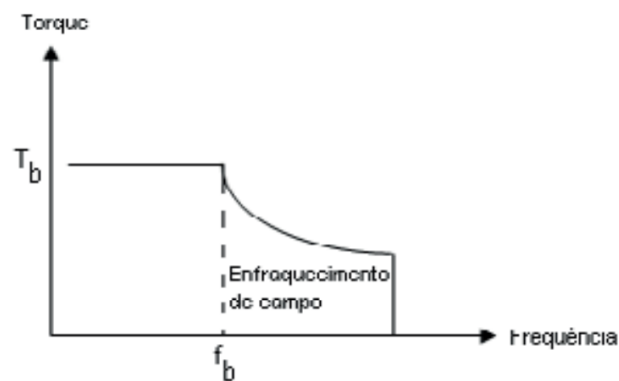
Figura 2.16: Curva da relação V_1/f_1 [11]

Figura 2.17: Curva binário x velocidade do motor [11]

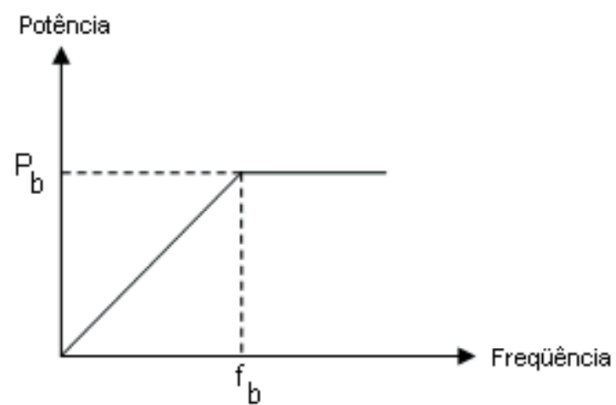


Figura 2.18: Curva da relação da potência com a frequência [11]

2.4.4 Ensaio de elevação de temperatura e Normas IEC

O ensaio de elevação de temperatura tende a replicar as condições de funcionamento do motor à plena carga sem que efetivamente isto ocorra. O motor irá operar numa condição pré-

determinada de binário, frequência e tensão até ao momento que o mesmo atinja o equilíbrio térmico. Segundo a norma IEC 60034-1 [10], o equilíbrio térmico é atingido quando a oscilação da temperatura é igual ou inferior a 1°C num intervalo de 30 minutos. Através de uma análise precisa da norma IEC 60034-29 [9], foi possível encontrar variados processos que permitem a obtenção da curva de elevação de temperatura. Neste caso, este trabalho vai-se focar no ensaio de acoplamento direto da carga bem como no ensaio de dupla frequência.

2.4.4.1 Acoplamento direto de carga

O ensaio de acoplamento direto de carga, é o método de ensaio que proporciona maior precisão para se determinar a elevação de temperatura do motor de indução. Este ensaio consiste em acoplar o veio do motor a uma carga, alimentando o motor à tensão e frequência nominal. A carga acoplada ao motor normalmente é equivalente à potência nominal do motor, permitindo assim reproduzir as condições de funcionamento nominais do motor, tornando precisas as medições de temperatura.

Entidades referem que para motores superiores a 350 kW, realizar este tipo de ensaio acarreta despesas elevadas uma vez que todo o equipamento a ser utilizado necessita de ser dimensionado para potências iguais ou superiores à da máquina em teste [2].

Com ensaios de motores de elevada potência, vem a necessidade de elevados consumos energéticos. Por norma, nos dias de hoje, os laboratórios trabalham com sistemas de regeneração de energia diminuindo assim a energia elétrica necessária à realização do ensaio.

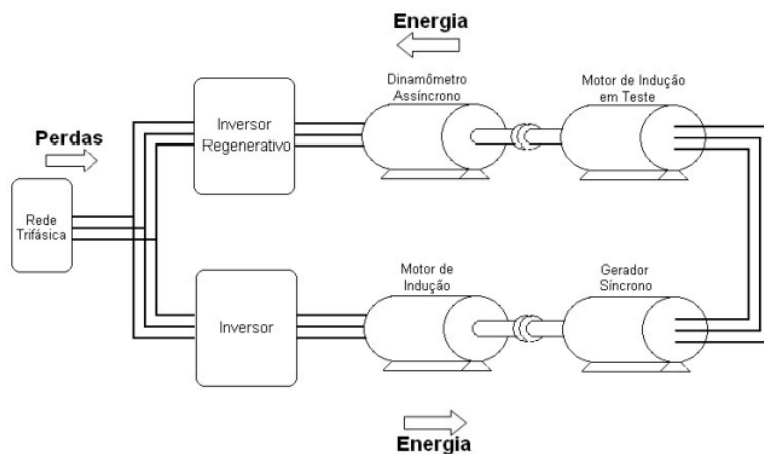


Figura 2.19: Sistema de recuperação de energia até 2MW [4]

Nas figuras 2.19 e 2.20 podemos observar dois diagramas com exemplos distintos de aplicação para laboratórios de ensaios com regeneração.

Como podemos observar em ambas as figuras, considerando a operação estabilizada, as perdas do sistema irão ser complementadas com a rede, tendo o sistema capacidade para recuperação de cerca de 80% da energia. O diagrama apresentado na figura 2.19 é aconselhado para laboratórios com capacidade até 2MW pois, acima dos 2MW, os custos associados aos inversores são elevados.

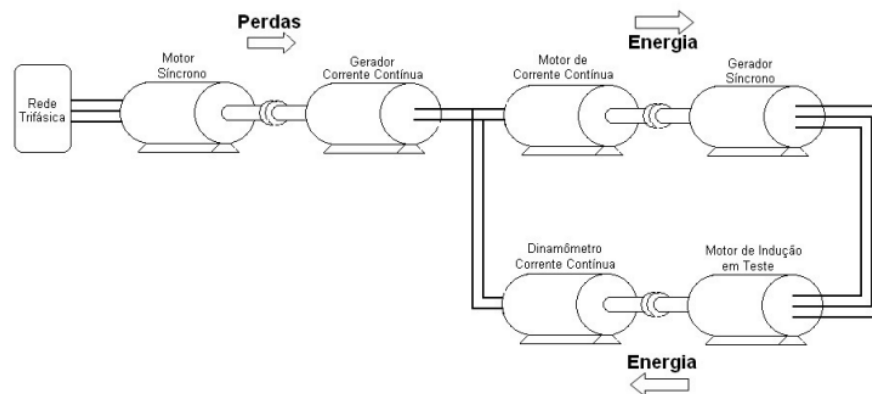


Figura 2.20: Sistema de recuperação de energia para motores acima dos 2MW [4]

e desaconselha-se a sua utilização, sendo normalmente implementados sistemas de recuperação com máquinas DC conforme indicado na figura 2.20.

2.4.4.2 Dupla Frequência

Analisando a norma [9] não existe referência nem indicação de procedimentos associados a ensaios de dupla frequência, utilizando como fonte de potência inversores de frequência. Contudo, estão definidas regras para realizar estes ensaios que podem ser aplicadas no ensaio através de um inversor de frequência.

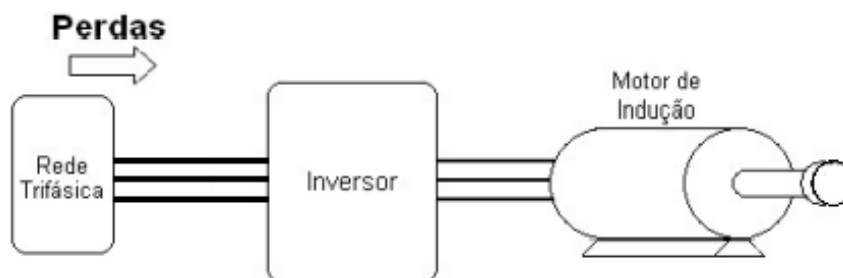


Figura 2.21: Sistema do Ensaio em Dupla Frequência

O motor, deve estar ligado ao inversor de frequência e a operar em vazio como se pode observar na figura 2.21. Quando este se encontrar a operar em vazio com tensão e frequência nominal, deve ser introduzida a segunda frequência, sendo esta entre 0,8 a 1,2 vezes o valor relativo à frequência nominal. A frequência deve ser modelada até serem alcançadas as seguintes condições:

- O valor rms da corrente flutuante do motor for igual ao valor nominal da corrente.
- O valor rms da tensão flutuante do motor for igual ao valor nominal da tensão.
- A velocidade de rotação for igual à velocidade nominal.

Em alguns casos pode ser complicado ajustar de forma precisa os valores rms da corrente e tensão durante a operação de forma a serem iguais aos valores nominais. A entidade normativa refere que nestes casos o ensaio pode ser realizado com valores de tensão e corrente perto dos valores nominais e à velocidade nominal ajustando a potência de entrada de modo a que as perdas do motor sejam iguais às perdas do motor num ensaio à carga nominal [9].

Capítulo 3

Simulação *MATCAD*

Neste capítulo pretende-se analisar uma simulação efetuada, com recurso à ferramenta de cálculo matemático *MATCAD* da *PTC*, de modo a comparar os diferentes pontos de funcionamento do motor, em vazio, antes e durante o funcionamento em Dupla Frequência. Importante referir que o desenvolvimento da base deste programa de simulação foi realizado pelo Professor Doutor Engenheiro Fredemar Runcos, Consultor em Máquinas Eléctricas Triásicas na *WEG* (Brasil).

Foi efetuada uma comparação dos seguintes parâmetros:

- Rotação da Máquina em função do Tempo
- Binário Eletromagnético
- Correntes no Rotor Estator

Nas figuras 3.1 e 3.2 podemos observar que a rampa de aceleração do motor até atingir a estabilidade em vazio é idêntica. Aos 20 segundos podemos observar que, figura 3.2, foi introduzida a segunda frequência no sistema, provocando uma destabilização na rotação da máquina.

Na figura 3.3 podemos observar, de forma mais detalhada, a flutuação da rotação da motor elétrico, sendo que se verifica a flutuação da velocidade nominal tendo em conta o fundamento teórico obtido no capítulo 2.

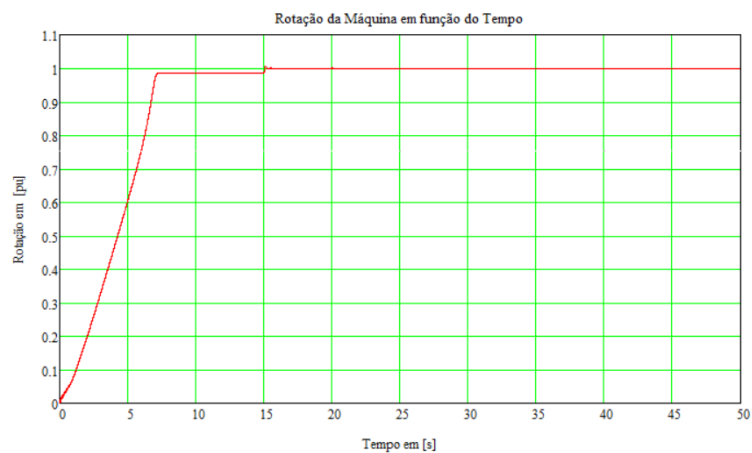


Figura 3.1: Rotação em função do Tempo-Vazio

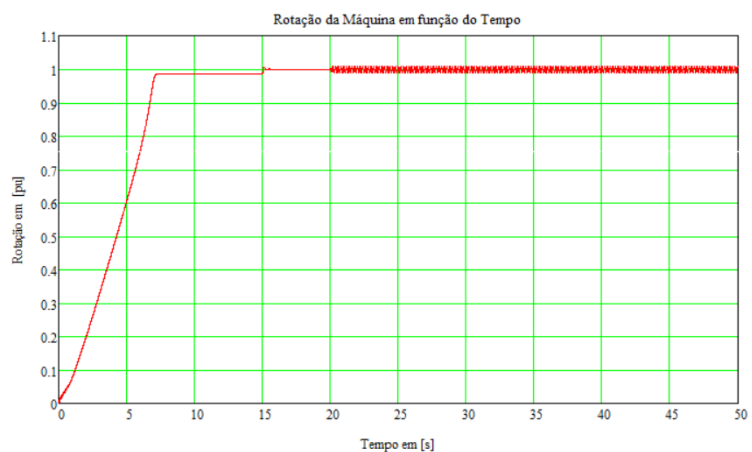


Figura 3.2: Rotação em função do Tempo-Dupla Frequência

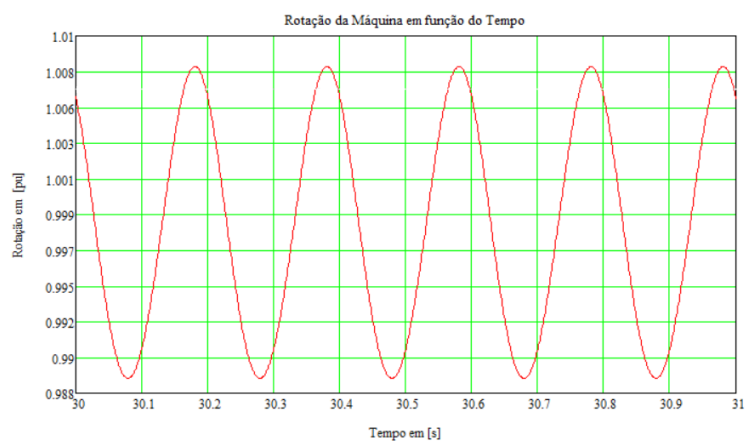


Figura 3.3: Rotação em função do Tempo-Dupla Frequência

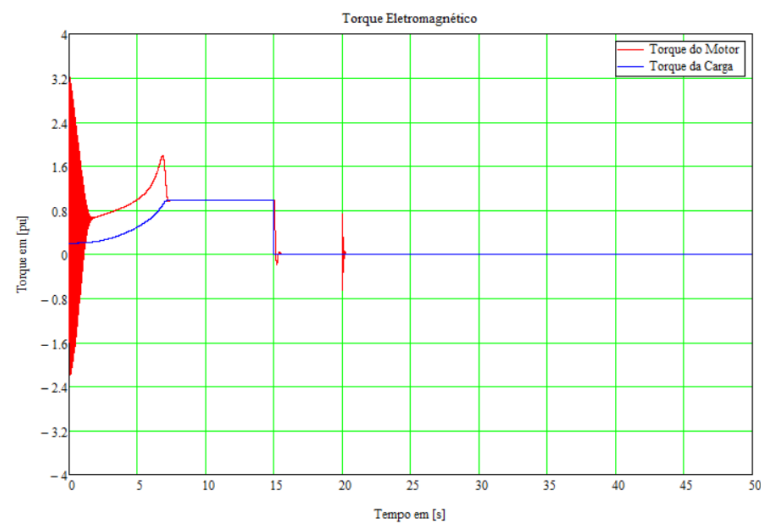


Figura 3.4: Binário Eletromagnético no Vazio

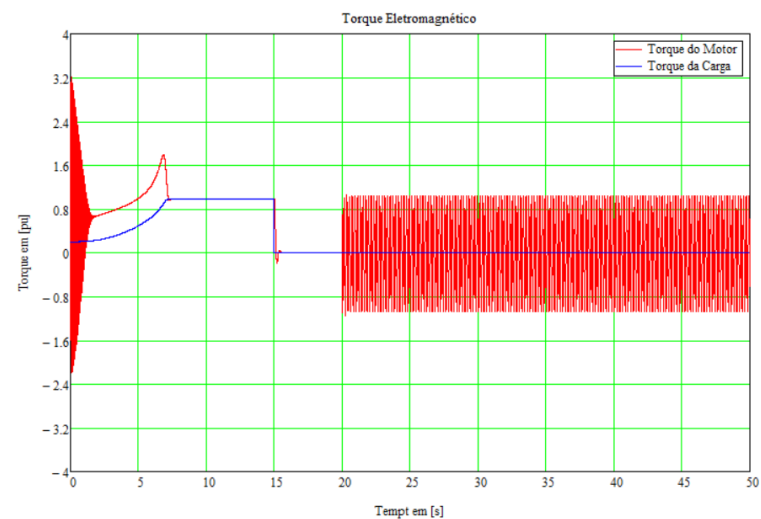


Figura 3.5: Binário Eletromagnético em Dupla Frequência

Nas figuras 3.4 e 3.5, observa-se que antes dos 20 segundos, momento em que é introduzida a segunda frequência, existe uma similaridade entre os dois gráficos. Após a introdução da segunda frequência aos 20 segundos, na figura 3.6 podemos verificar a existência de uma perturbação no binário do motor, concluindo que este está a operar como motor/gerador, algo esperado tendo em consideração o fundamento teórico obtido no capítulo 2, justificando assim as vibrações adicionais que se esperam encontrar durante o ensaio laboratorial no veio do motor.

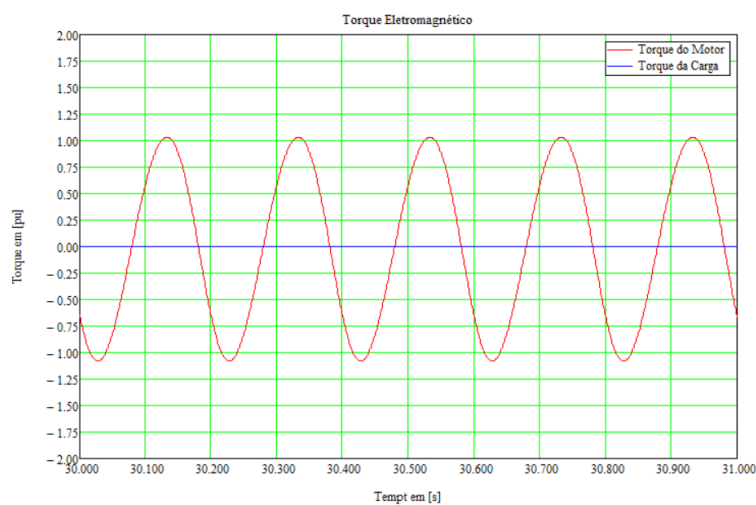


Figura 3.6: Binário Eletromagnético em Dupla Frequência

Na figura 3.7 podemos observar as correntes no estator, sendo estas equilibradas, picos idênticos entre fases e um valor baixo de corrente, relativamente ao nominal, como esperado por parte de um motor a operar em vazio.

Na figura 3.8 podemos observar a perturbação provocada pela segunda frequência, o aumento significativo da corrente por fase como indicava na bibliografia estudada no capítulo 2, permitindo assim o aquecimento, durante o ensaio laboratorial, do estator do MIT.

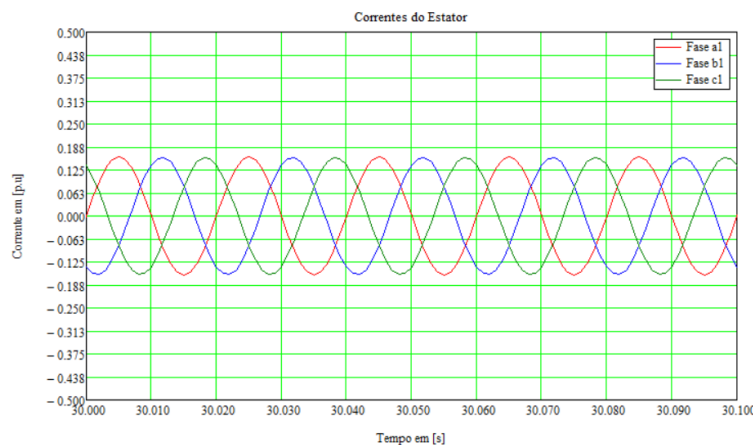


Figura 3.7: Correntes no Estator Vazio

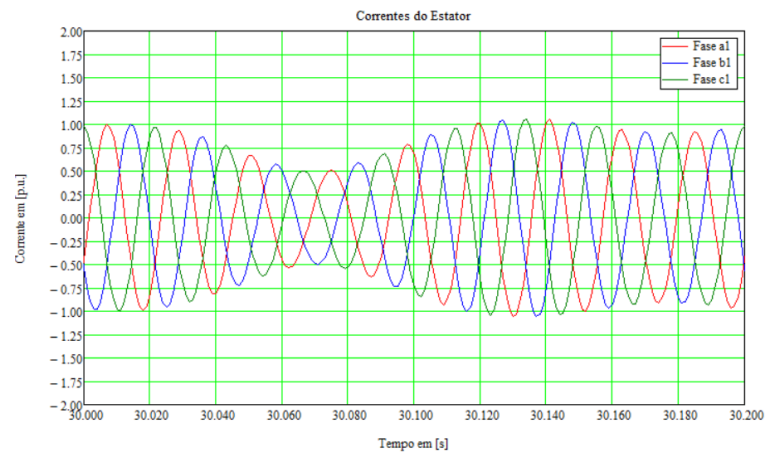


Figura 3.8: Correntes no Estator Dupla Frequência

Capítulo 4

Ensaaios e Resultados

Com o intuito de comparar e validar o ensaio de Dupla Frequência como uma alternativa ao ensaio à carga nominal, foi realizado um ensaio "real" com recurso a um conversor de frequência em MT da WEG e respetivo motor. Numa primeira fase foi efetuado um estudo detalhado da arquitetura do laboratório, bem como da bancada de ensaios. Numa segunda fase procedeu-se ao ensaio propriamente dito, iniciando-se por um ensaio à carga nominal para servir de referência e, posteriormente, ensaios de Dupla Frequência e a ensaio DOL para comparação de valores em situação idêntica.

4.1 Arquitetura do Laboratório

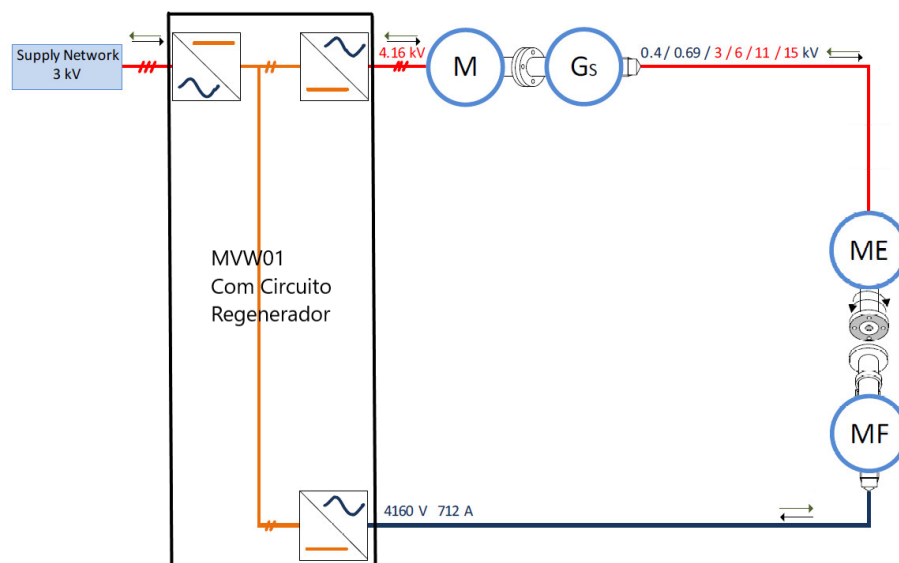


Figura 4.1: Esquemático da arquitetura do laboratório WEGeuro - Maia [11]

A arquitetura do laboratório da WEGeuro, apresentada na figura 4.1, têm dois objetivos globais no que diz respeito à alimentação dos equipamentos.

A plataforma de ensaios da WEGeuro foi projetada para ensaios a diferentes tensões, de forma a alimentar, à tensão nominal, os diversos produtos que fabrica. A potência aparente disponível para ensaio encontra-se nos 4 MVA. Para tal, a base do sistema assenta num motor (M) acoplado a um gerador (Gs). Esse motor é alimentado por um variador de velocidade (MVW01) em diversos regimes. Por sua vez, o gerador irá gerar a tensão com o valor pretendido (até 15 kV) fornecendo uma onda sinusoidal pura. Podemos então dizer que este inversor (MVW01) e o motor (M) servirão para gerar as várias tensões necessárias e eliminar a componente harmónica. Neste caso, e utilizando o nosso inversor MVW3000 para a alimentação do motor, o gerador irá alimentar diretamente o inversor. Desta forma, o motor em ensaio alimentado pelo nosso inversor estará também acoplado a um freio (MF) que lhe criará a carga real para que o sistema funcione em condições nominais. Por último, este freio irá comportar-se como um gerador AC e estará ligado a um módulo retificador do variador de velocidade (MVW01) que irá converter em DC e injetar esta energia no link DC, para que seja reaproveitada novamente para a realimentação do sistema. Assim, do lado da rede, iremos consumir o equivalente a todas as perdas do sistema, uma vez que grande parte da energia estará a ser reaproveitada.

4.2 Bancada do Laboratório de ensaios WEG

A bancada do laboratório da WEGeuro, figura 4.2, terá uma enorme importância para aquisição de dados, garantindo veracidade nos valores recolhidos. Esta bancada foi desenvolvida com o intuito de testar, satisfazer e superar os requisitos de ensaio das máquinas dos clientes, bem como dos protótipos desenvolvidos pela WEG. Inclusive, a entidade refere que "os laboratórios da WEGeuro são uma peça importante na estratégia do Grupo WEG cujo objetivo é ser o maior fabricante mundial de motores elétricos".

4.2.1 Tensões, Correntes e Temperatura

Na figura 4.3 podemos observar o esquema que ilustra como são recolhidos os valores da tensão e corrente por fase, que irá alimentar o motor (DOL), o inversor (VSD) ou o quadro.

Relativamente à medição das tensões, é colocado um TT em cada fase à saída do gerador (Gs) logo após ao sistema de proteções. As tensões são recolhidas pelo equipamento *ZIMMER HST*, figura 4.4.

Na aferição dos valores associados à corrente, é instalado em cada fase um TI que se encontram conectados ao leitor *ZIMMER PCTSIU-4-1U*, figura 4.5.

Os valores medidos podem ser observados em tempo real através do wattímetro digital *YO-KOGAWA WT1806E*, figura 4.5, sendo que o equipamento permite, através da tensão e corrente, calcular vários parâmetros relativos ao ensaio como a potência instantânea, frequência, torque e velocidade do motor (quando aplicáveis) bem como outros parâmetros analíticos importantes para



Figura 4.2: Bancada do Laboratório de ensaios WEGeuro

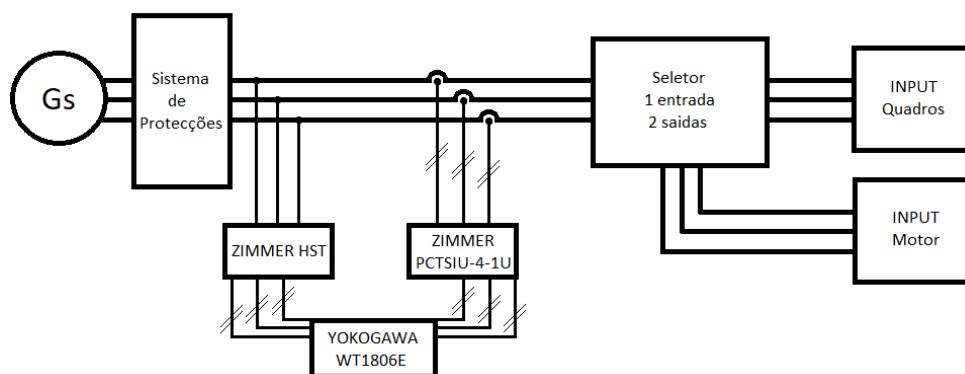


Figura 4.3: Esquema relativo à obtenção da tensão e corrente por fase

o estudo do ensaio desejado. Importante referir que o equipamento *YOKOGAWA WT1806E* é dotado de uma enorme taxa de precisão de 5 casas decimais.

Relativamente à aquisição dos valores da temperatura em diferentes pontos do motor elétrico, este é dotado de unidades de termorresistências PT100 instaladas na bobinagem e chumaceiras. A pedido do cliente é possível colocar mais unidades em diferentes pontos da máquina.

No esquema simplificado da figura 4.6 podemos observar, na caixa de terminais a ligação de terminais do motor bem como a ligação de termorresistências PT100 na unidade de aquisição de temperatura de 60 canais, figura 4.7.

Como podemos observar na figura 4.7, existem terminais no lado esquerdo da caixa, e nestes



Figura 4.4: ZIMMER HST



Figura 4.5: ZIMMER PCTSIU-4-1U e Wattímetro Digital YOKOGAWA WT1806E respectivamente

terminais são conectadas as termorresistências PT100. Dentro da caixa podemos observar as 60 ligações bem como uma unidade de aquisição de dados que recebe estas ligações.

Na figura 4.8 podemos observar a unidade de aquisição de dados *YOKOGAWA MW100* que está conectada através de ethernet ao servidor do laboratório, figura 4.9.

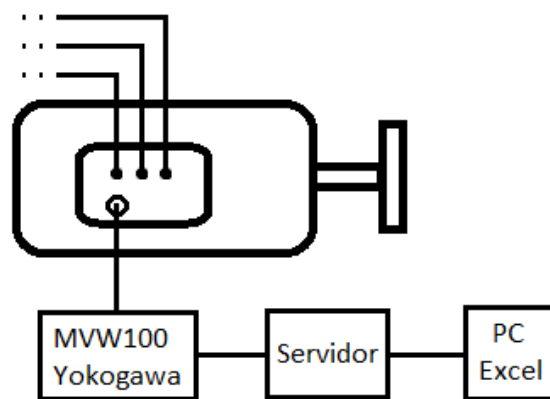


Figura 4.6: Esquema da ligação dos PT100



Figura 4.7: Unidade de aquisição de temperatura de 60 canais

Após a ligação ao servidor, os dados serão processados e apresentados diretamente no PC na aplicação *Excel*, como podemos observar na figura 4.10, cumprindo a temporização estabelecida pela norma referida no sub capítulo 2.4.4 para a aquisição dos dados.

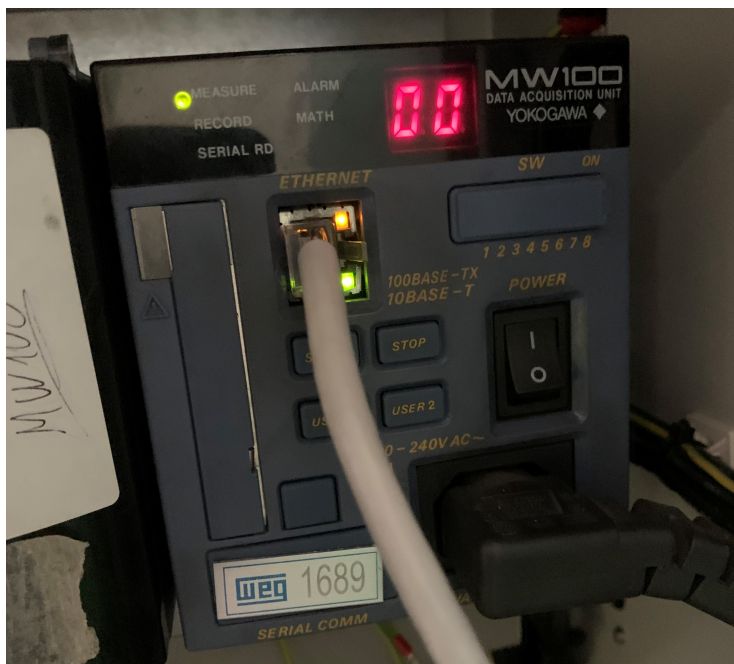


Figura 4.8: Unidade de aquisição de dados YOKOGAWA MW100

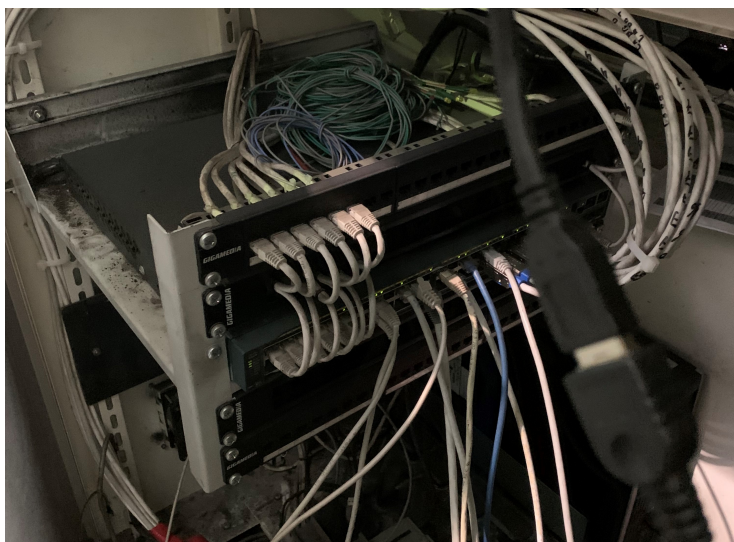


Figura 4.9: Ligações servidor do Laboratório

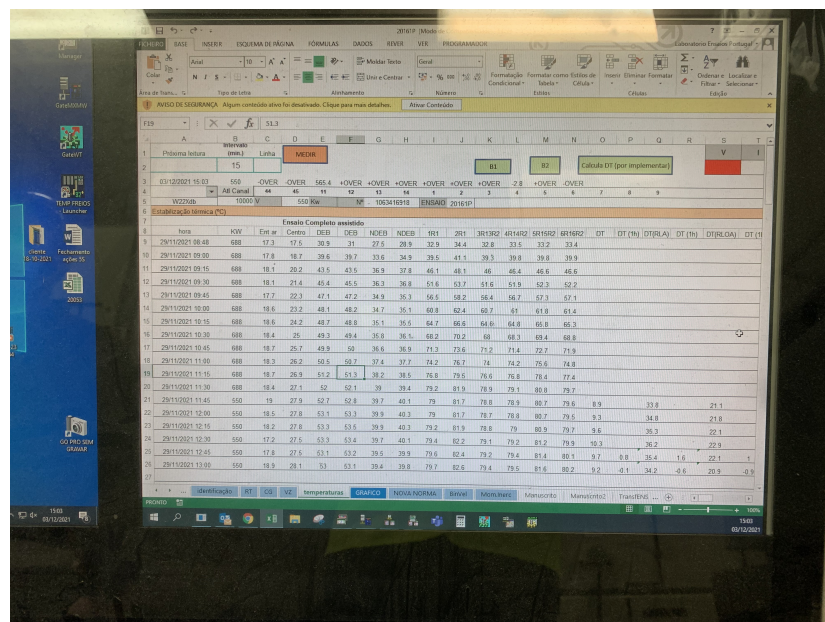


Figura 4.10: Aquisição das temperaturas no Excel

4.3 Atualização Software

Neste subcapítulo serão apresentadas as placas da Rack de Controlo do MVW3000 que necessitam de alteração de software de modo a que seja possível a alteração dos parâmetros relativos à operação do motor. O software foi desenvolvido pelo Engenheiro Guilherme Augusto Pangratz do Departamento de Desenvolvimento de Automação da WEG Brasil em Jaraguá do Sul.

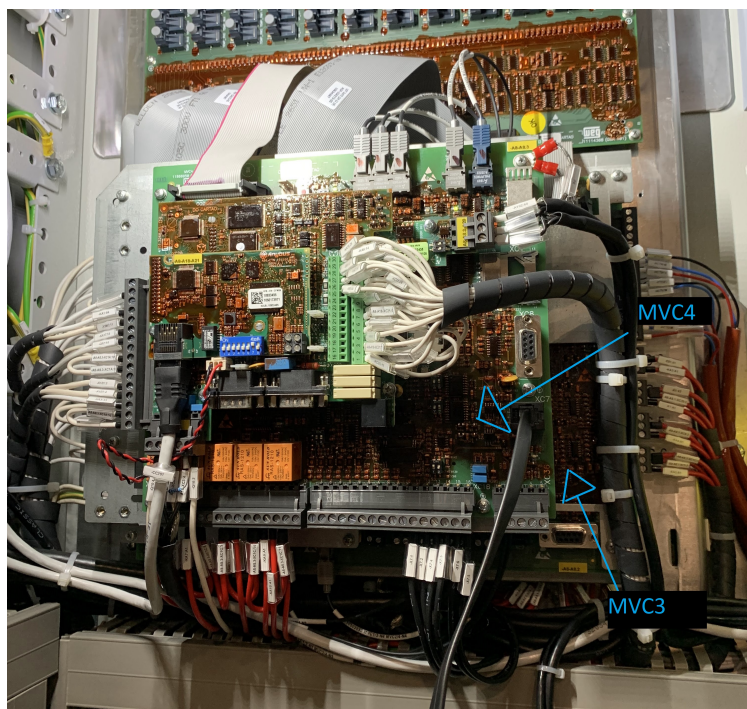


Figura 4.11: Rack de Controlo do MVW3000

Na figura 4.11 podemos observar a Rack de Controlo do MVW3000 disponível para ensaio, sendo que se procedeu à alteração do software da carta de controlo (MVC3), responsável pelo controlo do motor e do inversor, como referido no subcapítulo 2.3.4, e à alteração da carta de funções do utilizador (MVC4) permitindo assim a possibilidade de interação Homem-Máquina para poderem ser introduzidos os novos parâmetros.

4.4 Características do MVW3000 e do Motor

 UNIDADE AUTOMAÇÃO INVERSOR DE FREQUÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO	
TIPO: MVW-3000 ANO DE FABRICAÇÃO: DOCUMENTO: 10005484790 Nº SERIE: MATERIAL: 14264825 IP: 41 Ur: 7,2 kV Up: 45 kV Ud: 19 kV Ik: 2,19 kA Ip: 5,69 kA PESO: 5500 kg	ENTRADA: 6,6 kV, 3 F, 50 Hz, 100 A SAÍDA: 0-6,6 kV, 3 F, 50 Hz, 100 A POTÊNCIA NOMINAL: 1345 HP SOBRECARGA: 115 % ALIMENTAÇÃO AUXILIAR: 380 V, 3 F, 50 Hz, 24 A ALIMENTAÇÃO VIA FONTE SEGURA: N.A. TENSÃO DE COMANDO: 220 Vca
WEG, CP420 - 89256-900 JARAGUÁ DO SUL - BRAZIL	

Figura 4.12: Chapa de características MVW3000

Na figura 4.12 podemos observar a indicação da tensão, variável entre 0 V e 6.6 kV à saída do MVW3000 com uma corrente nominal de 100A e potência nominal de 1 MW.

Na figura 4.13 podemos observar a chapa de características do motor de indução trifásico WEG W60 630 L 4, motor que foi sujeito aos ensaios de elevação de temperatura.

1572080

MADE IN PORTUGAL

WEG

Rua Eng. Frederico Ulrich, Sector V
4470-605 Maia, Portugal

THREE PHASE INDUCTION MOTOR

IEC 60034-1

W60 630 L 4

Date 22SET21

☒ SQUIRREL CAGE

Nr. 1060436090

☐ WOUND ROTOR

V	CON.	Hz	RPM	A	kW	IP	PF	100%	75%	50%
11000	Y	50	1491	183.5	3000	24	0.89	96.4	96.5	96.2
IL/IN: 7	SF: 1.00	INSUL.: H	NOISE: 82 ± 3 dB(A)	COOLING: IC06						
WEIGHT: 11089 kg	AMB: 0°C to +40°C	DUTY: S1	ALT: 1000 m.a.s.l.	DESIGN: N	RISE: B					
$\begin{matrix} \text{V} & \text{U} & \text{W} \\ \text{Y} & \text{L2} & \text{L1} & \text{L3} \end{matrix}$	DE Sleeve Bearing:	6238 C3	94 g	3400 h	Lubricant:					
	NDE Sleeve Bearing:	6236 C3	83 g	3800 h	POLYREX EM 103					

READ CAREFULLY THE INSTRUCTIONS ON THE INSTALLATION AND
MAINTENANCE MANUAL TO ENSURE A SAFE AND CONTINUOUS OPERATION

CAUTION

Figura 4.13: Chapa de características WEG W60 630 L 4

Observando com maior detalhe as características deste motor, verificamos que a tensão nominal é de 11 kV e potência nominal de 3 MW com ligação nos terminais em estrela. Sendo um motor de fabrico especial com diferentes possibilidades de ligações nos terminais do estator, procedeu-se à alteração da ligação para a ligação em triângulo, apresentada na figura 4.14. Com esta alteração o motor passou a operar a uma tensão de 6 kV com 100 A de corrente nominal e 1.4 MW de potência nominal e fator de potência de 0.8.

Na figura 4.15 apresenta-se o motor já no laboratório preparado para os ensaios.



Figura 4.14: Ligação nos terminais do estator - W60 630 L 4



Figura 4.15: Motor de indução trifásico WEG W60 630 L 4

4.5 Ensaio à carga nominal - DOL

Foi realizado um ensaio em carga através do acoplamento do motor (ME) a um freio (MF), recordando a figura 4.1, que impôs uma carga garantindo a operação com carga nominal.



Figura 4.16: Acoplamento motor freio

Durante o ensaio foram adquiridos dados relativos à temperatura do motor, num intervalo de 15 em 15 minutos. Estes valores foram retirados de diferentes pontos do motor, envolvendo o estator, entrada de ar e chumaceiras. Os valores foram adquiridos até que a máquina elétrica atingisse o equilíbrio térmico, como refere a norma IEC indicada no subcapítulo 2.4.4. Na figura 4.17 podemos observar um gráfico com os diferentes pontos de medição ao longo do tempo.

Na figura 4.18 podemos observar a curva da elevação da temperatura do motor em ensaio.

Para cada amostra, foi calculada a elevação da temperatura através da diferença entre a temperatura máxima medida pelas termoresistências PT100 e a temperatura da entrada de ar no mesmo instante.

Os gráficos foram obtidos a partir dos dados da tabela A.1 presente nos Anexos.

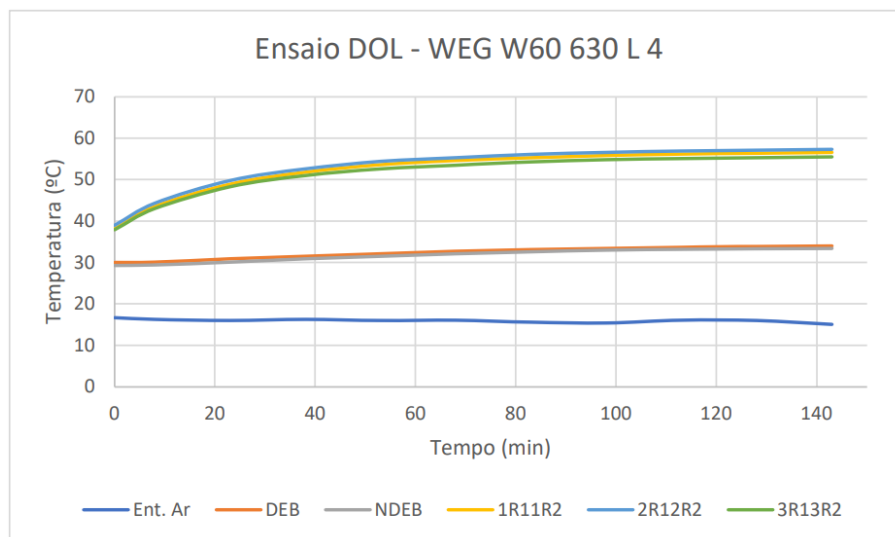


Figura 4.17: Temperatura diversos pontos do motor ao longo do ensaio

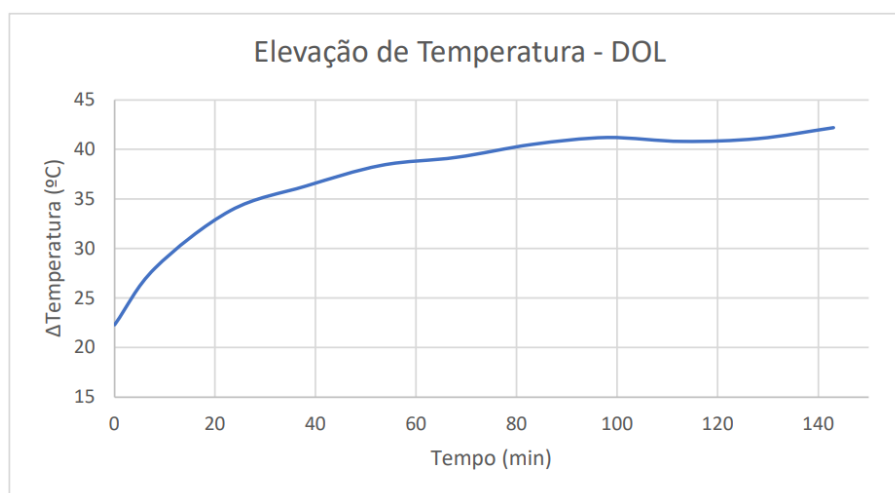


Figura 4.18: Elevação de Temperatura

4.6 Ensaio de Dupla Frequência

Relativamente à realização dos ensaios em dupla frequência, recordando a figura 2.21, não existe acoplamento de carga ao veio do motor.

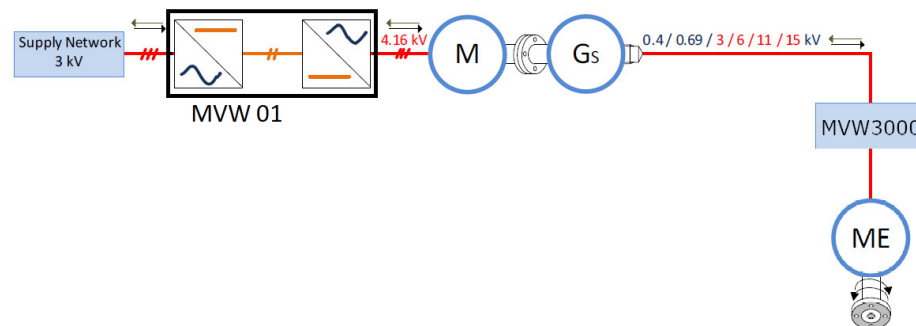


Figura 4.19: Arquitetura do laboratório WEGeuro - Maia [11] - Dupla Frequência

Na figura 4.19 podemos observar o esquema da arquitetura do laboratório relativamente ao ensaio de Dupla Frequência com o veio desacoplado. Por motivos de segurança, recorrendo à figura 4.16, apesar do cardan se encontrar desacoplado (conexão motor-freio), o veio do motor encontra-se protegido.

Todos os ensaios foram realizados cumprindo as normas abordadas no subcapítulo 2.4.4. Nos primeiros minutos de cada ensaio foi garantido que o motor em vazio operava à tensão e frequência nominal, sendo que a corrente medida pelos transformadores de corrente foi de 18 A nos terminais do motor.

4.6.1 Introdução da Segunda Frequência

A “segunda frequência” é uma função da componente fundamental (frequência e amplitude), que tem origem no controlo do motor e dos parâmetros associados no inversor. O resultado da imposição da segunda frequência é a presença de ambas as componentes na tensão de saída do inversor, de acordo com os parâmetros de configuração e do ponto de operação do inversor. Com isto, foi necessário ter em consideração que a “segunda frequência” poderia ter influência no desempenho dos reguladores de tensão das células de potência do inversor e na qualidade das medições por parte do mesmo.

O parâmetro para controlo da frequência no MVW3000 permite a escolha da frequência desejada, multiplicando a frequência fundamental pelo valor definido. Neste caso, segunda a norma, entre 0,8 a 1,2 da frequência nominal.

O parâmetro para introdução da amplitude da tensão da segunda frequência, dando assim início ao ensaio, permite, através de uma relação direta entre a tensão da frequência fundamental e o valor do parâmetro, que varia entre 0 a 0,5, obter uma amplitude máxima na segunda frequência de 50% da fundamental.

Tendo em conta as perturbações e impacto nas máquinas elétricas envolvidas, o ensaio foi realizado da seguinte forma:

- Acelerar o motor até atingir a velocidade de rotação nominal em vazio.
- Indicar no parâmetro o valor desejado da segunda frequência.
- Incrementar gradualmente o valor da amplitude da segunda frequência até ser atingida uma corrente RMS de 100 A.
- Verificar se todas as condições são válidas e iniciar o ensaio de estabilização térmica do motor.

Após a introdução da segunda frequência, verificou-se perturbação na rotação do motor e subsequentemente vibrações acrescidas. Por sua vez estas vibrações e perturbações eram mais intensas quanto maior a amplitude da segunda frequência.

Relativamente à corrente, tratando-se de uma ligação em triângulo no motor, a corrente máxima permitida pelo drive é de 57,8 A. Acima deste valor o MVW3000 encontra-se em sobrecarga.

4.6.2 Ensaaios preliminares

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo obter informação relativa ao comportamento do MVW3000 e respetivo motor em ensaio de dupla frequência, para depois se proceder aos ensaios de estabilidade térmica com valores da segunda frequência pré-definidos.

Sendo a primeira vez que foi efetuado com recurso a um inversor de média tensão e atendendo a que não existe bibliografia de auxílio para definição inicial das frequências, definiram-se várias frequências iniciais a ser testadas que foram: 45 Hz, 47,5 Hz, 52,5 Hz e 55 Hz.

O ensaio preliminar serviu também de teste para entender qual seria o limite real da amplitude que se conseguiria atingir até se chegar ao limite dos reguladores de tensão das células de potência. Recordando a figura 2.10, sendo o MVW3000, utilizado para ensaio, dotado de 6 células por fase, teria capacidade para regular aproximadamente 7,3 kV. Na expressão 4.1 obtivemos a percentagem de amplitude máxima que podemos introduzir na segunda frequência relativamente à tensão nominal de 15 %.

$$Amplitude(\%) = \frac{7.3 * 100}{6.35} - 100 = 15\% \quad (4.1)$$

4.6.2.1 Resultados

Na figura 4.20 temos uma tabela com os resultados obtidos alterando o parâmetro da amplitude momentos antes do aviso de sobretensão no barramento DC das células observado na figura 4.21. Com disponibilidade do laboratório, também foram efetuados ensaios às frequências de 40 Hz e 60 Hz com o intuito de ter mais valores e possibilidade de melhores resultados.

Com isto, verifica-se que a melhor "segunda frequência" é a de 60 Hz, mas a corrente RMS, com valor de 64 A, encontrava-se aquém da corrente desejada de 100 A (facto esperado pois, como referido anteriormente, a partir dos 57.8 A o drive encontrar-se-ia em sobrecarga).

Hz	Vin (V)	Iin (A)	Vout RMS (V)	Iout RMS(A)
40	6600	6	6000	57
45	6600	7	6000	41
47,5	6600	5	6000	30
52,5	6600	14	6000	46
55	6600	12,5	6000	23
60	6600	6,7	6000	64

Figura 4.20: Resultados preliminares ensaio Dupla Frequência

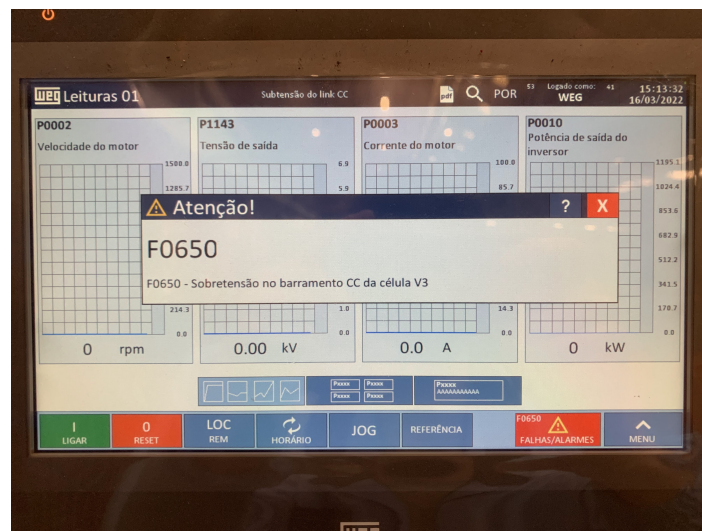


Figura 4.21: Falha de sobretensão na célula V3

Com os resultados obtidos e a conclusão de que 60 Hz seria a melhor frequência de ensaio, foram estudadas várias possibilidades para conseguir aumentar a corrente RMS no motor. As possibilidades foram as seguintes:

- Diminuir a tensão de entrada no transformador do MVW3000 em 5% para dar uma maior margem de tensão no barramento DC.
- Alterar o fluxo magnético do motor, relembrando a expressão 2.5, diminuindo a tensão do motor mantendo uma frequência nominal de 50 Hz.

A solução optada foi a de alteração de fluxo. Para a alteração de fluxo do motor, foi diminuída a tensão para 80% da tensão nominal, ou seja, 4.8 kV.

Para auxílio e controlo das tensões no barramento CC das células foram colocadas pontas de prova na carta MVC3 (responsável pelo controlo do circuito de potência do MVW3000) de forma a medir as tensões em tempo real no circuito de células de cada fase.

Procedeu-se ao ensaio de teste com as seguintes condições:

- 4.8 kV como tensão nominal
- 50 Hz como frequência fundamental
- 60 Hz como segunda frequência

Como indicado anteriormente, aumentou-se gradualmente a amplitude da segunda frequência até se atingir o limite admissível de tensão por parte do barramento CC, controlado no osciloscópio observado na figura 4.23, obtendo assim os resultados presentes na tabela da figura 4.22.

Na figura 4.23 podemos observar a amarelo a tensão no barramento DC da fase U, a laranja no barramento DC da fase V e a verde a tensão no barramento DC da fase W. Importante referir que esta não era a tensão real no barramento, 1V equivale a 170V no barramento DC da fase medida. Observando e comparando a tensão máxima entre fases vemos que a fase V é a mais elevada, o que vai de encontro ao facto de a ocorrência das falhas nos testes anteriores ter ocorrido sempre na fase V. O pico atingido na fase V era de 1080 V sendo que o limite para disparo do alarme era de 1100V.

Hz	Vin (V)	Iin (A)	Vout RMS (V)	Iout RMS(A)
60	6600	6,2	5000	71

Figura 4.22: Resultados ensaio teste segunda frequência a 60 Hz

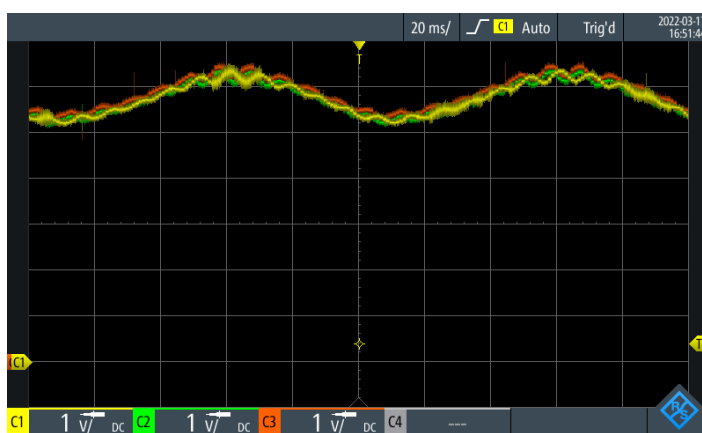


Figura 4.23: Osciloscópio no controlo dos barramentos das fases U, V e W

4.6.3 Ensaio e Resultados

Com os resultados obtidos na tabela da figura 4.22, apesar de não se ter atingido uma corrente RMS superior a 71 A, com a estabilidade apresentada após operar por mais de 30 min, procedeu-se ao ensaio de estabilização de temperatura do motor em regime de dupla frequência com as mesmas características impostas.

Durante o ensaio foram adquiridos dados relativos à temperatura em intervalos de 15 em 15 minutos. Estes valores foram retirados de diferentes pontos do motor, envolvendo o estator, entrada de ar e chumaceiras. Os valores foram adquiridos até que a máquina elétrica atingisse o equilíbrio térmico, como refere a norma IEC indicada no subcapítulo 2.4.4. Na figura 4.24 podemos observar um gráfico com os diferentes pontos de medição ao longo do tempo. Na figura 4.25 temos o gráfico com a curva de elevação de temperatura, validando assim o nosso ensaio. A tabela recolhida do ensaio de dupla frequência pode ser consultada nos anexos na figura A.2.

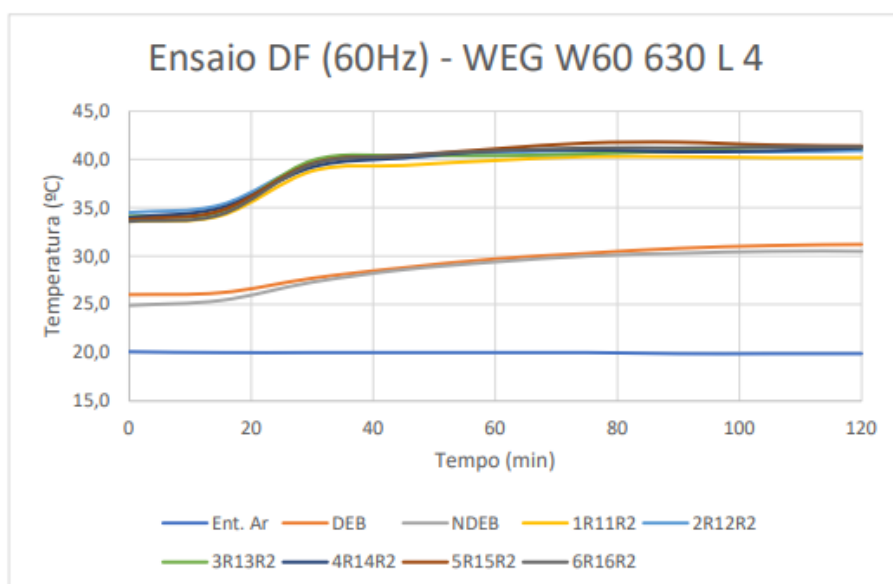


Figura 4.24: Ensaio de DF a 60 Hz com os diferentes pontos de medição

4.7 Ensaio DOL Validação

Com o objetivo de validar o ensaio de dupla frequência, foi efetuado um ensaio em DOL replicando os parâmetros conseguidos no ensaio de dupla frequência.

Durante o ensaio foram adquiridos dados relativos à temperatura em intervalos de 15 em 15 minutos. Estes valores foram retirados de diferentes pontos do motor, envolvendo o estator, entrada de ar e chumaceiras. Os valores foram adquiridos até que a máquina elétrica atingisse o equilíbrio térmico, como refere a norma IEC indicada no subcapítulo 2.4.4. Na figura 4.26 podemos observar um gráfico com os valores das temperatura, em diferentes pontos de medição, ao longo do tempo. Na figura 4.27 temos o gráfico com a curva de elevação de temperatura, validando

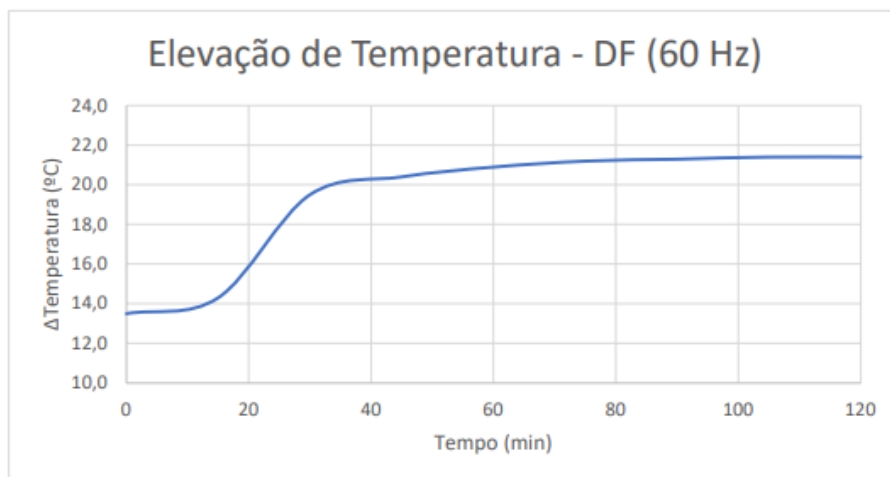


Figura 4.25: Curva elevação da temperatura DF a 60 Hz

assim o nosso ensaio. A tabela com os dados recolhidos no ensaio DOL pode ser consultada nos anexos na figura A.3.

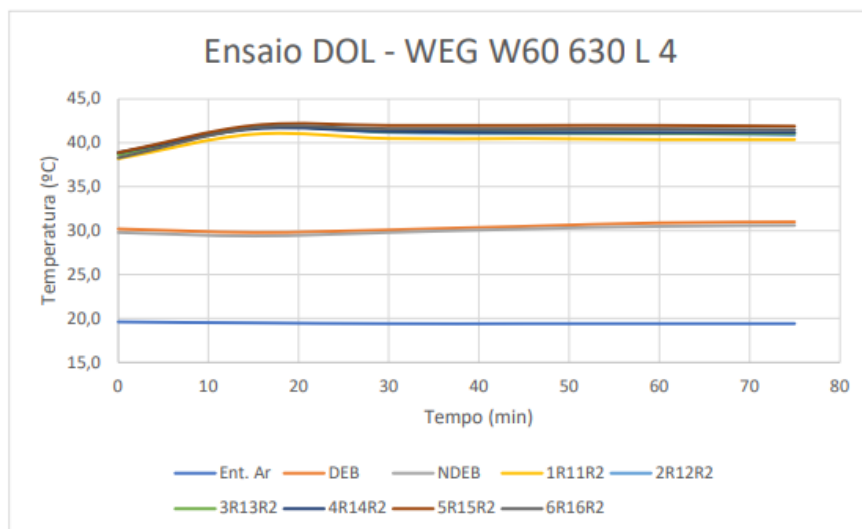


Figura 4.26: Ensaio DOL com os diferentes pontos de medição

4.8 Comparação Resultados

Na figura 4.28 podemos observar uma comparação da elevação de temperatura do ensaio em dupla frequência (azul) e o DOL (laranja). Podemos observar que o DOL só começa a partir dos 45 min. Na realidade, o ensaio DOL foi de 75 minutos, pois o motor já tinha sido pré aquecido. Como era importante verificar a estabilização térmica, apenas foi introduzida desta forma para ser

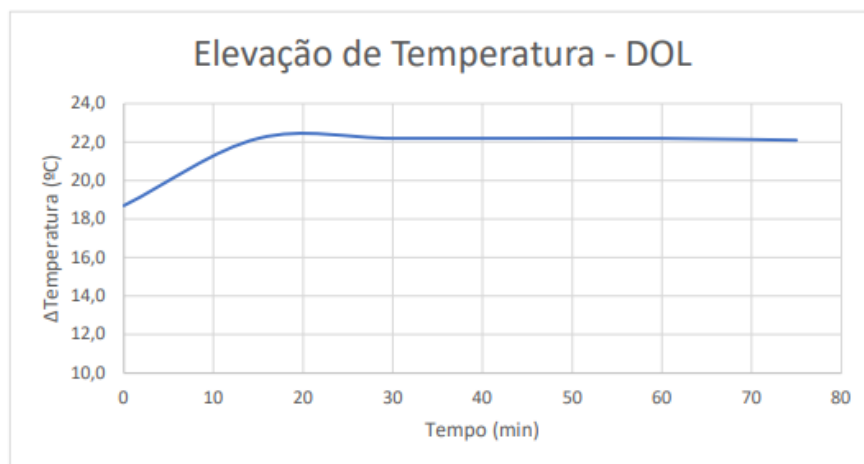


Figura 4.27: Curva elevação da temperatura DOL

mais fácil de observar a curva de estabilização. Consultando a tabela representada na figura A.4 podemos verificar que a diferença máxima entre dois enrolamentos foi de 0,5 °C.

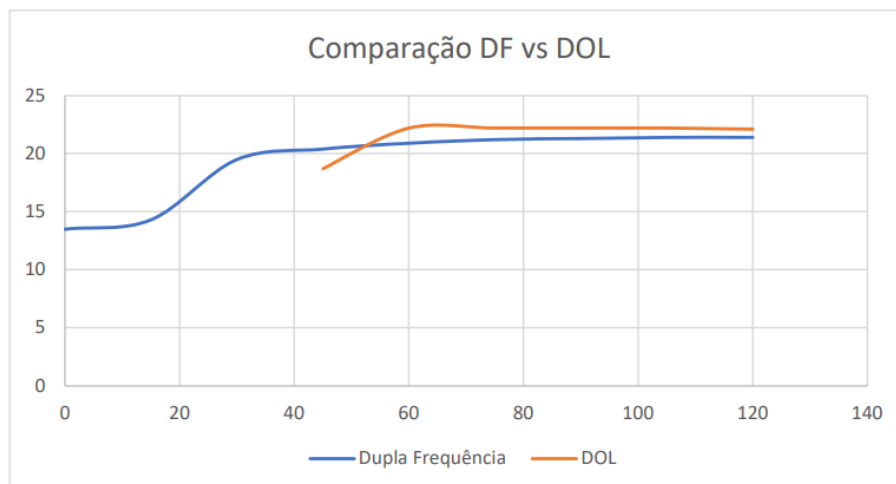


Figura 4.28: Elevação de temperatura DOL vs DF

Na tabela da figura 4.29 estão indicados 4 ensaios com o intuito de comparação e avaliação de consumo da potência aparente. Importante referir que no ensaio de dupla frequência e ensaio em vazio, a tensão e a corrente referem-se à entrada do MVW3000. O ensaio denominado de Freio, na tabela, corresponde ao consumo do freio quando se aplicou carga ao motor para realizar o ensaio em DOL. Com isto importa referir que o consumo total de potência aparente no ensaio DOL será a soma do consumo do motor mais o consumo do freio, sendo no total 1990,2 kVA. No anexo B podem ser consultadas todas as imagens de valores retirados no equipamento de medição YOKOGAWA. Importa também referir que nos gráficos relativos às ondas de tensão o YOKOGAWA inverte a onda de tensão da fase 1 em 180° por questões de parâmetros internos.

Ensaio	V RMS (kV)	I RMS (A)	S (kVA)
Vazio	6,6	1,7	19,4
DOL	5	69,56	1043,4
Freio (DOL)	4,16	131,4	946,8
DF (60 Hz)	6,6	6,2	70,9

Figura 4.29: Comparação consumo de potência aparente (S)

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo da realização desta dissertação, bem como referenciados os trabalhos futuros a desenvolver.

5.1 Conclusões

O desenvolvimento da indústria mundial leva, cada vez mais, à procura de motores de elevada potência. Por consequência, o dimensionamento de um laboratório capaz de efetuar ensaios de temperatura a motores de tal dimensão torna-se muito dispendioso e, muitas vezes, mecanicamente impossível. Como indicado no estudo bibliográfico há vários registos do recurso a ensaios de dupla frequência utilizando o método de duas fontes distintas. Apesar de ser dispendiosa a implementação desta solução, mostra-se válida.

O método de dupla frequência foi estudado, mostrando as suas particularidades. Com o intuito de ter uma boa base teórica para fundamentar as conclusões, efetuou-se uma abordagem profunda a bibliografias relativas a ensaios de dupla frequência com o intuito de fazer uma análise às conclusões retiradas por outros autores ao longo dos anos.

Tendo como objetivo principal o ensaio de dupla frequência recorrendo ao MVW3000 da WEG, procedeu-se ao estudo prévio de inversores de frequência, passando por uma apresentação breve do MVW3000 obtendo conhecimento sobre o seu funcionamento e controlo.

Foi também efetuado um levantamento do funcionamento da máquina de indução, suas generalidades e efetuada uma abordagem aos ensaios de temperatura e às respetivas normas de validação.

O ensaio foi proposto e montado no laboratório da WEGeuro. Os resultados, validados pelo laboratório foram apresentados na forma de gráficos e tabelas, com análise de valores de elevação de temperatura.

Verificou-se, com os resultados obtidos nos ensaios, que foram cumpridos todos os pontos relativos à norma e, comparando com o ensaio DOL, como se obteve uma variação inferior a 1°C, torna-se válido como metodologia alternativa.

Importante referir que o ensaio de dupla frequência provocou um aumento das vibrações por parte do motor relativas à sua operação como motor gerador no decorrer do ensaio.

Mais importante que ser um método alternativo, é o consumo que apresentou comparativamente ao ensaio em DOL. Como observado nos resultados tivemos um consumo médio no ensaio de DOL de 1990.2 kVA e, no ensaio de dupla frequência, obtivemos um consumo de 70.9 kVA. Isto o equivalente a 3,5 % relativamente ao ensaio DOL. A poupança energética possível é enorme, permitindo assim ser um ensaio energeticamente mais sustentável, tanto para a fábrica como para o planeta.

No ensaio de dupla frequência evidenciou-se também um aumento na produtividade do laboratório, o que se traduz numa melhoria da capacidade de ensaio. O tempo necessário entre o final de um teste e o início de outro é consideravelmente menor, dado que não é efetuada a montagem e acoplamento de carga. Este ensaio também traz vantagens relativamente aos ensaios de vibração do motor quando este se encontra à temperatura de operação, pois não existe a necessidade de parar o motor, desacoplar o veio e arrancar o motor novamente para efetuar essas verificações.

Quanto à capacidade de ensaio do laboratório relativamente à potência instalada, este método de ensaio mostrou-se extremamente importante porque permite o ensaio de grandes máquinas, enquanto que no método de ensaio com acoplamento de carga o laboratório está limitado a 4 MVA.

Por último, o presente estudo é de enorme interesse para a WEG e foi acompanhado pela casa mãe no Brasil, dadas as vantagens deste tipo de ensaio. Estando a WEGeuro a construir uma nova fábrica em Santo Tirso, torna-se ainda mais importante avaliar a possibilidade da sua implementação no laboratório da nova fábrica. Por ser uma solução inovadora na indústria e pela ausência de registos bibliográficos no tema, será submetido, com suporte da WEG, um artigo relativo a este estudo no PCIC Europe 2022 (Petroleum & chemical Industry Committee) que terá lugar em Londres, de 7 a 9 de junho de 2022.

5.2 Trabalhos Futuros

Ao longo da elaboração desta dissertação, foram pensadas e discutidas várias ideias que podem complementar o estudo. A seguir, são apresentados alguns dos possíveis trabalhos futuros:

- Efetuar ensaios com motores de rotor bobinado. Está indicado na bibliografia que o ensaio é valido para motores em gaiola de esquilo e rotor bobinado, no presente trabalho foi ensaiado um motor em gaiola de esquilo.
- Efetuar ensaios com um diferente leque de potências e verificar o impacto das diferentes frequências nos ensaios de dupla frequência.
- Efetuar um estudo da possibilidade de utilização de um MVW3000 para aplicação em diferentes tensões, visto que este tem capacidade de operar em diferentes tensões.

Anexo A

Tabelas de dados dos ensaios

Hora	Corrente	Ent ar	DEB	NDEB	1R11R2	2R12R2	3R13R2	ΔT (°C)
17/02/2022 18:22	100A	16,7	30	29,3	38,1	39	37,9	22,3
17/02/2022 18:30	100A	16,3	30,1	29,4	43,5	44,3	43	28
17/02/2022 18:45	100A	16	30,9	30,1	48,9	49,8	48,3	33,8
17/02/2022 19:00	100A	16,3	31,5	30,9	51,8	52,6	51	36,3
17/02/2022 19:15	100A	16	32,1	31,5	53,6	54,4	52,6	38,4
17/02/2022 19:30	100A	16,1	32,7	32,1	54,6	55,3	53,5	39,2
17/02/2022 19:45	100A	15,6	33,1	32,6	55,3	56,1	54,3	40,5
17/02/2022 20:00	100A	15,4	33,4	33	55,8	56,6	54,8	41,2
17/02/2022 20:15	100A	16,1	33,7	33,2	56,2	56,9	55,1	40,8
17/02/2022 20:30	100A	16	33,9	33,3	56,4	57,1	55,3	41,1
17/02/2022 20:44	100A	15,1	34	33,4	56,6	57,3	55,5	42,2

Figura A.1: Tabela dos valores recolhidos do ensaio DOL

Hora	D. Freq	Corrente	Ent. Ar	DEB	NDEB	1R11R2	2R12R2	3R13R2	4R14R2	5R15R2	6R16R2	DT (5R)	DT (1h)
17/03/2022 18:30	60	71 A	20,1	26	24,9	33,6	34,5	34,1	34	33,8	33,6	13,5	-
17/03/2022 18:45	60	71 A	20	26,2	25,4	34,2	35,3	34,6	35	34,7	34,3	14,3	-
17/03/2022 19:00	60	71 A	20	27,7	27,3	38,8	39,6	39,9	39,2	39,6	39,5	19,5	-
17/03/2022 19:15	60	71 A	20	28,8	28,6	39,4	40,2	40,4	40,2	40,4	40,4	20,4	-
17/03/2022 19:30	60	71 A	20	29,7	29,4	39,9	40,7	40,4	40,9	41,1	40,9	20,9	7,4
17/03/2022 19:45	60	71 A	20	30,3	30	40,3	40,9	40,6	41	41,7	41,2	21,2	6,9
17/03/2022 20:00	60	71 A	19,9	30,8	30,3	40,3	40,9	40,9	40,8	41,8	41,2	21,3	1,8
17/03/2022 20:15	60	71 A	19,9	31,1	30,5	40,2	40,8	41,3	40,9	41,5	41,3	21,4	1,0
17/03/2022 20:30	60	71 A	19,9	31,2	30,5	40,2	40,9	41,2	41,2	41,4	41,3	21,4	0,5

Figura A.2: Tabela dos valores recolhidos do ensaio DF a 60 Hz

Hora	Corrente	Ent. Ar	DEB	NDEB	1R11R2	2R12R2	3R13R2	4R14R2	5R15R2	6R16R2	DT (5R)	DT (1h)
17/03/2022 21:00	69,5 A	19,6	30,2	29,8	38,2	38,8	38,6	38,9	38,9	38,3	18,7	-
17/03/2022 21:15	69,5 A	19,5	29,8	29,4	41	41,8	41,7	41,6	42	41,7	22,2	-
17/03/2022 21:30	69,5 A	19,4	30,1	29,8	40,5	41,2	41,3	41,3	42	41,6	22,2	-
17/03/2022 21:45	69,5 A	19,4	30,5	30,2	40,5	41,1	41,2	41,2	42	41,6	22,2	-
17/03/2022 22:00	69,5 A	19,4	30,9	30,5	40,4	41,1	41,1	41,2	42	41,6	22,2	3,5
17/03/2022 22:15	69,5 A	19,4	31	30,6	40,4	40,9	41,1	41,2	41,9	41,5	22,1	-0,1

Figura A.3: Tabela dos valores recolhidos do ensaio DOL Final

Ensaio	Ent. Ar	DEB	NDEB	1R11R2	2R12R2	3R13R2	4R14R2	5R15R2	6R16R2	DT (5R)
DF (60 Hz)	19,9	31,2	30,5	40,2	40,9	41,2	41,2	41,4	41,3	0,5
DOL	19,4	31	30,6	40,4	40,9	41,1	41,2	41,9	41,5	

Figura A.4: Tabela comparação DF (60Hz) vs DOL

Anexo B

Imagens Medições



Figura B.1: Valores adquiridos ensaio vazio Entrada e Saída MVW3000

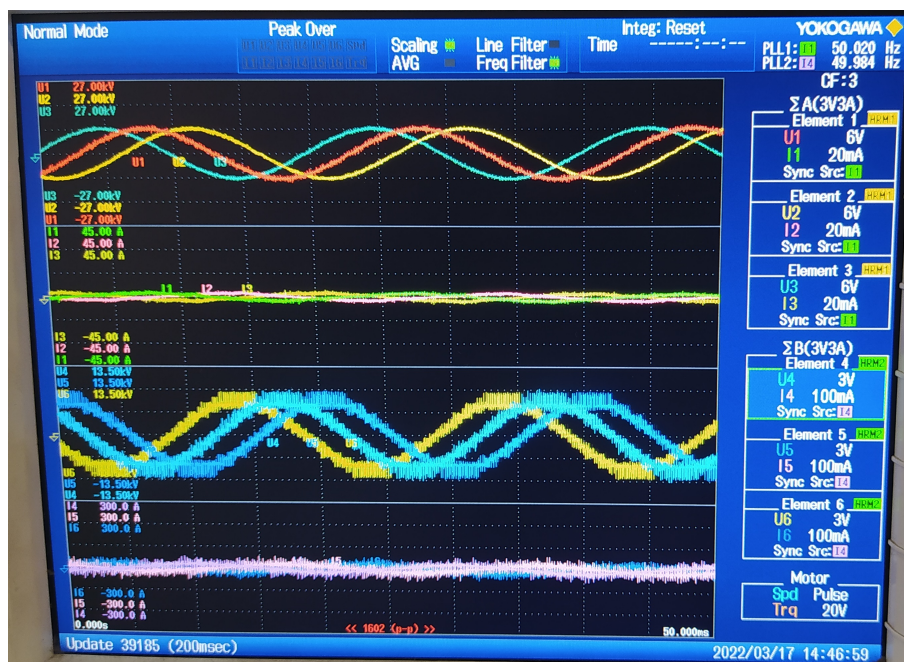


Figura B.2: Gráficos adquiridos ensaio em vazio Entrada e Saída MVW3000



Figura B.3: Valores adquiridos ensaio DF (60 Hz) Entrada e Saída MVW3000

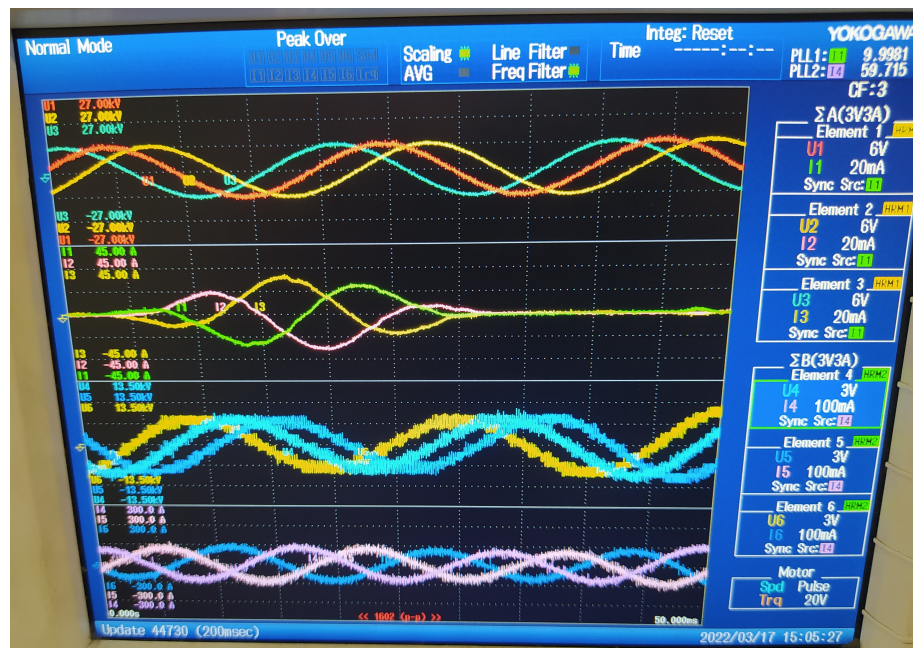


Figura B.4: Gráficos adquiridos ensaio em vazio Entrada e Saída MVW3000



Figura B.5: Valores adquiridos ensaio DOL Entrada e Saída MVW3000

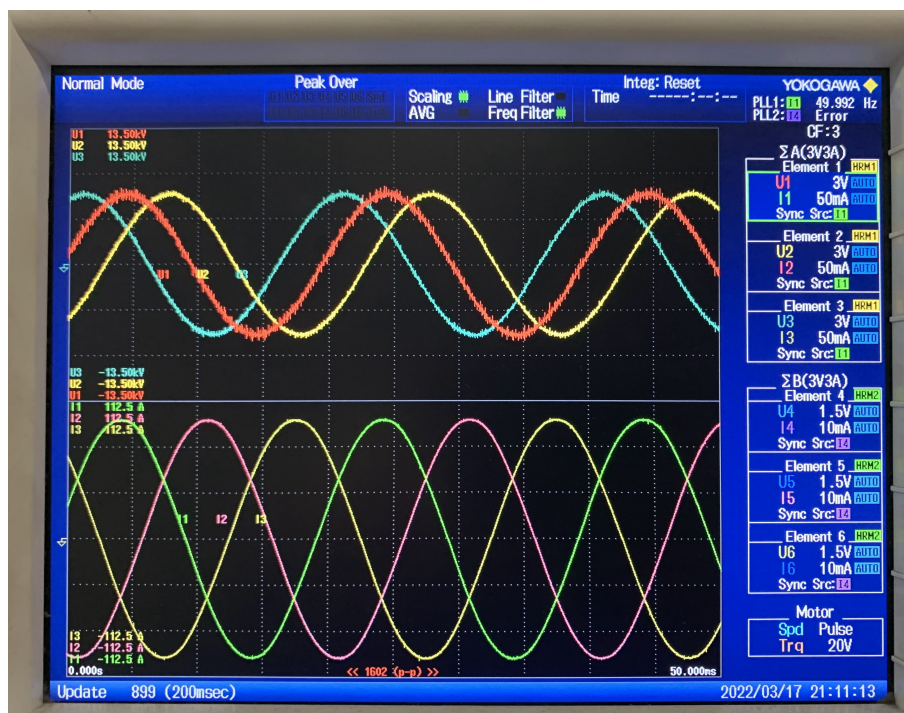


Figura B.6: Gráficos adquiridos ensaio em DOL Entrada e Saída MVW3000

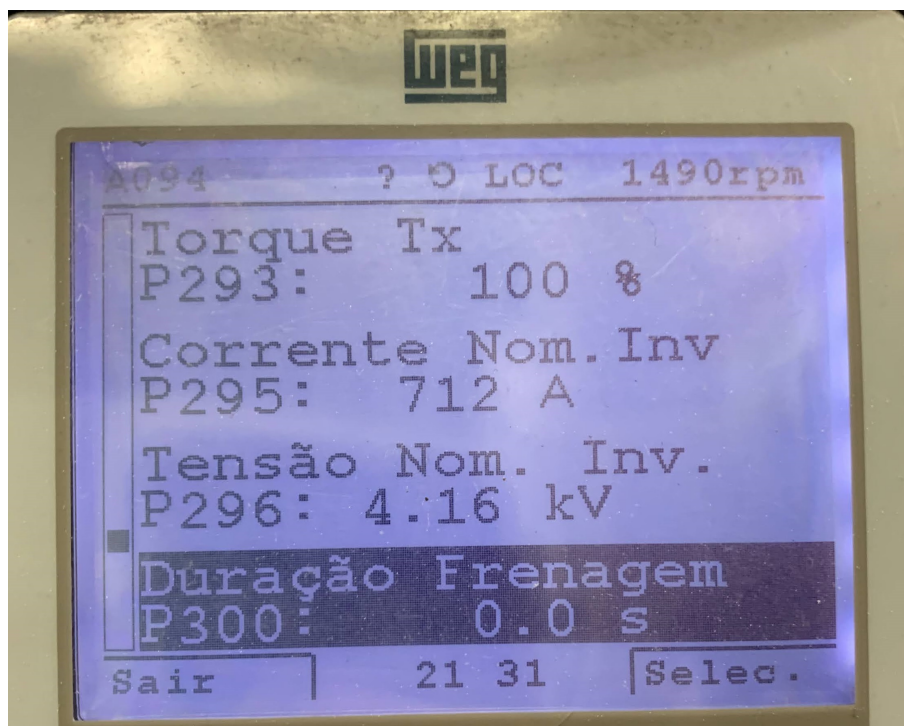


Figura B.7: Tensão nominal no freio

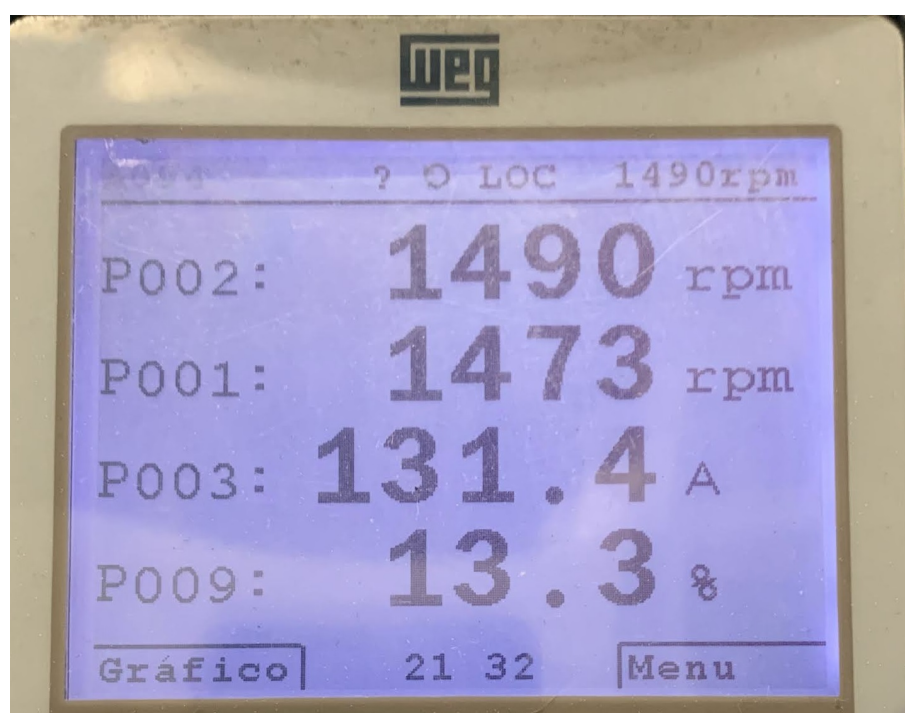


Figura B.8: Corrente RMS no freio

Referências

- [1] Meye A. e Lorenzen H. W. Two-frequency heat run - a method of examination for three-phase induction motors. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-98, November/December 1979.
- [2] ANSI/NEMA. Motors and generators. NEMA MG-1, 2016.
- [3] Palit B. B. Temperature rise in a synthetically loaded induction machine. International Conference on Electrical Machines, Athens, Greece, September 1980.
- [4] Glauco A. W. Cisz. *Ensaio de elevação de temperatura em máquinas de indução utilizando o método da dupla frequência*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- [5] Ilhami Colak. *Mixed Frequency Testing of Induction Machines Using Inverters PhD Thesis, The University of Aston in Birmingham, October 1994*. Tese de doutoramento, 01 1995.
- [6] Artur F. Costa. *MÁQUINAS ELÉTRICAS Capítulo 4: MOTORES DE INDUÇÃO Parte 1 - Motores Trifásicos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.
- [7] Manuel V. Guedes. *O Motor de Indução Trifásico: seleção e aplicação*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.
- [8] Plevin D. H. Test simulation of full load heating for large cage type induction motor, 1988.
- [9] IEC. *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. IEC 60034-29, 2008.
- [10] IEC. *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. IEC 60034-1, 2017.
- [11] Grupo WEG Unidades Motores. Motores de indução alimentados por inversores de frequência pwm - guia técnico. Disponível através de base de dados interna, 2021.
- [12] Radic P. e Strupp H. Measurement of temperature rise in induction motors using the continuously varied frequency method. Brown Boveri Rev. Vol. 63, August 1976.
- [13] Schwenk H. R. Equivalent loading of induction machines for temperature tests. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, no. 4, July/August, 1977.
- [14] LORENA MARQUES TEIXEIRA. Análise computacional do motor de indução trifásico: Regime transitório e permanente. 2009.
- [15] Hill W. Discussion on stray load losses in squirrel-cage induction motor. IEE Proc., September 1965.