

**LEVANTAMENTO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO
COM ENROLAMENTO DAHLANDER**

Tiago José dos Santos Moraes

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing
(Orientador)

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D

Prof. Walter Suemitsu, Dr.Ing

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2012

Agradecimentos:

Primeiramente, agradeço minha mãe, Maria Angélica dos Santos Moraes, que me deu todo o suporte ao longo de todo o meu ensino até a graduação para que eu conseguisse me formar, me tornando um cidadão e um profissional. Assim como meus familiares, principalmente minha irmã, Camila Maria dos Santos Moraes, e meus avós Shirley de Figueiredo Moraes e José de Figueiredo Moraes.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram ao longo dos meus estudos ao longo dos momentos de descontração e cumplicidade. Isto é, aos meus amigos do Colégio Pedro II que estão comigo desde o ensino médio em quase todos os momentos mais importantes, aos meus amigos de sala de Engenharia Elétrica na UFRJ que entraram comigo no primeiro período de 2006, aos meus amigos do ônibus Especial de Jacarepaguá que faziam das longas idas e voltas da faculdade mais prazerosas e divertidas, a todos aqueles da França que foram importantes na minha vida ao longo dos dois anos em que estive fazendo intercâmbio e aos meus amigos da Barra que tenho menos contato hoje em dia mais que a amizade é verdadeira.

Um agradecimento especial a minha namorada, Advi Catarina Barbachan Moraes, que me inspirou e me ajudou ao longo dos últimos anos, inclusive nesse período em que estive realizando e escrevendo este trabalho.

Agradeço a toda equipe do LABMAQ e do LASUP que me ajudaram na realização dos ensaios assim como todo o desenvolvimento deste trabalho, principalmente ao pós-doutorando Elkin Velandia, ao doutorando Carlos Henrique Vasconcelos e ao técnico Sérgio Ferreira dos Santos.

Agradeço o professor Richard Magdalena Stephan pelo apoio e orientação ao longo de todo o meu projeto.

Agradeço também aos professores Walter Suemitsu e Antônio Carlos Ferreira que aceitaram participar da minha banca examinadora contribuindo com observações que enriqueceram este trabalho.

Resumo:

Este trabalho possui como objetivo levantar experimentalmente as curvas características de Torque x Velocidade e Corrente de Partida x Tempo de um motor do tipo Dahlander.

Este motor de indução trifásico possui a qualidade que permite a comutação de polos de seu enrolamento numa razão de 1:2, modificando a suas ligações. Deste modo, permite um controle discreto de velocidade.

Apresentam-se conceitos construtivos e de funcionamentos de motores de indução para posteriormente identificar quais propriedades permitem a operação do motor nas duas ligações, bem como a identificação dos diferentes tipos de motores Dahlander na indústria.

Para a realização deste projeto foi necessária a concepção de uma bancada com os medidores de torque, velocidade e corrente, além de equipamentos que enviem as medidas a um computador onde os dados são tratados resultando nas curvas características. O computador está munido do *software* LabView que se comunica com diferentes equipamentos de medidas e possui uma interface gráfica que permite a apresentação das curvas características diretamente.

Os resultados obtidos comprovam o que a teoria expõe. As curvas Torque x Velocidade levantadas correspondem às de um motor Dahlander de torque constante. As curvas de Corrente de Partida x Tempo confirmam as vantagens deste motor em aplicações industriais.

Validaram-se os resultados a partir do levantamento analítico das curvas de Torque x Velocidade a partir do modelo do motor de indução. Os parâmetros do motor foram calculados através dos ensaios de corrente contínua, a vazio e de rotor bloqueado.

Palavras-chave:

Motor Dahlander; Comutação de polos; Motor de indução; Curvas características; Bancada de teste.

Índice:

1.	Introdução	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Organização do trabalho	1
2.	Motor de Indução.....	3
2.1	Definição	3
2.2	Princípio de Funcionamento	3
2.2.1	Campo Girante	3
2.2.2	Indução	4
2.2.3	Escorregamento	4
2.3	Aspectos construtivos	5
2.3.1	Estator	5
2.3.2	Rotor.....	7
2.4	Modelo	8
2.4.1	Modelo equivalente de Thévenin	9
2.5	Fluxo de Potência	9
2.6	Definição dos parâmetros do motor	11
2.6.1	Ensaio de corrente contínua	11
2.6.2	Ensaio a vazio	12
2.6.3	Ensaio de rotor bloqueado.....	13
3.	Motor Dahlander.....	16
3.1	Definição	16
3.2	Comutação de polos.....	16
3.3	Curvas características.....	19
(a)	Conjugado Constante:.....	20
(b)	Potência Constante:	20
(c)	Conjugado Variável:	21
4.	Bancada de teste	22
4.1	Descrição	22
4.2	Equipamentos:	22
4.3	Sistema de controle de torque.....	23
4.4	Sistema de medição de Velocidade	24
4.5	Sistema medidor de torque	26
4.6	Sistema medidor de corrente.....	28

4.7 Sistema de aquisição e tratamento de dados.....	28
4.8 Programa	29
4.8.1 Modo X-Y	32
4.8.2 Concatenado	32
4.9 Procedimento do teste.....	34
5. Resultados obtidos.....	35
5.1 Motor de teste	35
5.2 Curvas características do motor.....	35
5.3 Ensaio e levantamento do modelo.....	37
5.3.1 Ensaio de corrente contínua	37
5.3.3 Ensaio de Rotor Bloqueado.....	38
5.4 Análise dos resultados.....	39
6. Conclusão	42
BIBLIOGRAFIA.....	43
ANEXOS	44
ANEXO I: E-mail da WEG	44

Índice de figuras:

Figura 1: Estator	5
Figura 2: Enrolamento em espiral ou concêntrico	5
Figura 3: Enrolamento imbricado ou em diamante	6
Figura 4: Enrolamento imbricado de passo pleno	6
Figura 5: Enrolamento imbricado de passo encurtado	7
Figura 6: Rotor bobinado	7
Figura 7: Rotor gaiola de esquilo.....	8
Figura 8: Modelo simplificado do motor de indução	8
Figura 9: Modelo do motor de indução com equivalente de Thévenin.....	9
Figura 10: Fluxo de potência de motores de indução	10
Figura 11: Curvas características de Torque x Velocidade; em (a) com variação da tensão de alimentação; em (b) com variação da resistência rotórica	11
Figura 12: Montagem para o ensaio DC de motores de indução	12
Figura 13: Montagem para o ensaio a vazio de motores de indução	13
Figura 14: Modelo de motor de indução simplificado para o ensaio a vazio	13
Figura 15: Montagem para o ensaio de rotor bloqueado de motores de indução	14
Figura 16: Modelo simplificado de motores de indução para o ensaio a vazio	14
Figura 17: Enrolamentos do 1º caso em série.....	17
Figura 18: Enrolamento 1º caso em paralelo	18
Figura 19: Enrolamento 2º caso em série	18
Figura 20: Enrolamento 2º caso em paralelo	18
Figura 21: Conexão e curva Torque x Velocidade do motor Dahlander na configuração conjugado constante.....	20
Figura 22: Conexão e curva Torque x Velocidade do motor Dahlander na configuração potência constante.....	21
Figura 23: Conexão e curva Torque x Velocidade do motor Dahlander na configuração conjugado variado.....	21
Figura 24: Bancada de teste	22
Figura 25: Gerador de corrente contínua	23
Figura 26: Variac e retificador	24
Figura 27: Banco de resistores	24
Figura 28: Encoder	25
Figura 29: Circuito conversor de frequência em tensão	25
Figura 30: Osciloscópio digital USB DSO-2090	26
Figura 31: Fonte de corrente contínua	26
Figura 32: Sensor de torque	27
Figura 33: Display 7550	27
Figura 34: Amprímetro alicate	28
Figura 35: Exemplo de um diagrama de blocos do programa	29
Figura 36: Exemplo de interface do programa.....	29
Figura 37: Coluna de conversão	30
Figura 38: Parte do diagrama de blocos responsável pela comunicação com o osciloscópio....	31

Figura 39: Parte do diagrama de blocos responsável pela comunicação com o Display 7550...	31
Figura 40: Interface do modo X-Y.....	32
Figura 41: Interface do modo concatenado.....	33
Figura 42: Curva Torque x Velocidade em Excel	34
Figura 43: Motor Dahlander.....	35
Figura 44: Curva Torque x Velocidade nas duas velocidades síncronas	36
Figura 45: Corrente de partida na ligação de 4 polos	36
Figura 46: Corrente de partida na ligação de 8 polos	37
Figura 47: Curvas Torque x Velocidade obtidos a partir dos parâmetros da máquina e da bancada	39
Figura 48: Curvas de Torque x Velocidade obtidos a partir dos parâmetros modificados e da bancada	40

1. Introdução

1.1 Objetivo

Este projeto final tem o intuito de mostrar experimentalmente o funcionamento de um motor do tipo Dahlander e, deste modo, comprovar o que se apresenta na teoria. Esta configuração de motor possui um enrolamento de estator que permite a comutação de polos, numa razão de 1:2, através da modificação de suas conexões. Isto o torna uma solução simples e barata no controle discreto de velocidade e uma solução em partidas de motores para cargas específicas.

Dois outros trabalhos desenvolvidos no mesmo laboratório analisaram o comportamento do motor do tipo Dahlander. O primeiro (TELLES – 2010), objetivava uma compreensão deste motor a partir de uma análise eletromagnética da formação dos polos e assim simular as curvas características do motor. O segundo (FERREIRA – 2011), pretendia desenvolver experiências práticas para o curso de engenharia elétrica, em que uma se verificava o funcionamento de um motor Dahlander nas duas velocidades síncronas, usufruindo apenas de equipamentos já existentes no laboratório.

Similar aos trabalhos supracitados, para conhecer o comportamento do motor, deseja-se levantar as curvas características de Torque x Velocidade e Corrente de Partida x Tempo. Encontram-se tais curvas na literatura referenciada, no entanto, não há uma justificativa para o comportamento demonstrado. Em vista disto, este projeto pretende analisar este motor através da obtenção direta e experimental destas curvas, validando-as a partir do modelo de máquinas de indução.

A realização deste projeto se deu a partir da instrumentação de uma bancada que faz a aquisição das grandezas necessárias para a análise e trata os dados adquiridos de modo a representá-los em forma de curva. A bancada se mantém no laboratório como ferramenta de testes e ensaios para futuros trabalhos.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho se apresenta da seguinte forma:

O capítulo 2 retrata todos os principais aspectos construtivos e princípios de funcionamento de motores de indução, para posteriormente identificar as propriedades necessárias para a concepção do motor do tipo Dahlander. Apresentam-se, ainda, o modelo matemático de motores de indução e o seu fluxo de potência, o que permite equacionar a curva característica de Torque x Velocidade. Os ensaios que permitem a definição dos valores dos parâmetros do modelo finalizam este capítulo.

O capítulo 3 explica as principais características do objeto de teste deste projeto, o motor do tipo Dahlander, incluindo os seus aspectos construtivos específicos para o seu funcionamento em alta e baixa velocidade, como se comutam os polos e os diferentes tipos de motores Dahlander em uso na indústria.

O capítulo 4 descreve a bancada que foi instrumentada para a realização dos testes. Incluindo a identificação dos componentes e os equipamentos que a compõem, com as suas respectivas funções e funcionamento, bem como a descrição do programa desenvolvido em LabView, que manipula os dados para levantar diretamente as curvas características do motor. Concluindo este capítulo, apresenta-se o procedimento dos testes a serem realizados na bancada.

O capítulo 5 apresenta todos os resultados obtidos, o levantamento do modelo e a sua análise, feita a partir dos capítulos anteriores. Deste modo, permitindo validar a bancada como uma ferramenta de testes do laboratório e confirmando o funcionamento do motor do tipo Dahlander apresentado na literatura.

2. Motor de Indução

2.1 Definição

Em grande maioria dos motores elétricos, a máquina entra em movimento a partir da interação de dois campos magnéticos: o do rotor e o do estator. Em motores de indução, também chamados de motores assíncronos, a corrente alternada que alimenta o estator gera um campo magnético, semelhantemente aos motores síncronos, outro motor elétrico de corrente alternada. A diferença entre estes dois tipos de motores está na geração do campo magnético do rotor. Este não se alimenta em motores assíncronos, pois o campo magnético do estator induz uma tensão nos condutores do rotor e, por eles estarem curto-circuitados, tem-se o segundo campo magnético.

Motores de indução possuem custo mais reduzido e maior robustez quando comparados a outros motores elétricos na mesma faixa de potência nominal. Estes partem através de alimentação direta dos terminais. O fato de não haver alimentação no rotor, evita a necessidade do uso de equipamentos que demandam manutenção constante, como anéis e escovas, ou de materiais caros, como ímãs permanentes.

Este motor apresenta algumas desvantagens, dentre elas se destacam as altas correntes de partida e a não operação em velocidade fixa como os síncronos, sua velocidade varia de acordo com a carga aplicada. Diferentes equipamentos solucionam tais problemas. Para a redução da corrente de partida pode-se listar: chaves estrela-triângulo, autotransformadores e *soft-starters*. O controle de velocidade, por sua vez, se tornou possível após o surgimento da eletrônica de potência, mesmo assim, esta solução sofre com o alto custo dos equipamentos.

2.2 Princípio de Funcionamento

2.2.1 Campo Girante

Motores de indução trifásicos funcionam a partir do campo girante do estator. As correntes alternadas que passam pelas bobinas do motor criam um campo magnético que varia proporcionalmente à corrente. Um motor trifásico, alimentado por correntes trifásicas, equilibradas e defasadas de 120° elétricos, com as bobinas igualmente defasadas no espaço, possui um campo resultante de intensidade e velocidade de rotação constantes. Chama-se velocidade síncrona a velocidade do campo girante, calculada pela equação (1).

$$n_s = 120 \frac{f}{p} \quad (1)$$

Em que:

- n_s : a velocidade síncrona em rpm.
- f : a frequência de alimentação Hz.
- p : o número de polos.

2.2.2 Indução

O rotor percebe o campo girante como uma variação de campo, o que induz uma tensão em seus condutores, como descrita pela equação (2). Essa tensão gera correntes que circulam pelos condutores do rotor, criando um campo magnético resultante próprio, que interage magneticamente com o campo girante do estator.

$$E_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2)$$

Em que:

- E_{ind} : a tensão induzida
- v : a velocidade relativa entre o rotor e a velocidade do campo girante
- B : o vetor densidade de fluxo magnético
- l : o comprimento dos condutores sob o campo magnético

Quando o motor se encontra em repouso, a tensão induzida possui um valor elevado, devido à proporcionalidade deste à velocidade relativa entre campo girante e o rotor. Isto implica em correntes induzidas no rotor de maior intensidade, visto que condutores de baixa resistência compõem o rotor, tendo assim torque suficiente para a partida do motor. Na medida em que a velocidade do rotor se aproxima da velocidade síncrona, a variação do campo diminui, até se atingir a velocidade síncrona, em que se tem torque nulo.

2.2.3 Escorregamento

Este rotor em movimento não atinge a velocidade síncrona, porque um rotor girando nesta velocidade não percebe a variação de campo. Assim, não há tensão induzida para gerar torque suficiente para manter o rotor girando.

Em vista disto, o rotor sempre se encontra a uma velocidade abaixo da síncrona, por este efeito, recebe o nome de motor assíncrono. Denomina-se escorregamento (s) o percentual da diferença de velocidade do motor (ω_r) em relação à síncrona (ω_s), como demonstrado na equação (3).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3)$$

O que permite concluir a equação (4) da velocidade do rotor de um motor de indução.

$$n_r = (1 - s)n_s = (1 - s)120 \frac{f}{p} \quad (4)$$

2.3 Aspectos construtivos

2.3.1 Estator

Motores de indução, como citado anteriormente, possuem um estator bobinado para a criação dos polos do motor e do campo girante.



Figura 1: Estator

Um grupo de espiras enroladas no mesmo sentido, constituindo assim uma bobina, e alimentadas por corrente alternada geram um campo magnético, que define um polo do motor. A bobina canaliza os campos magnéticos de cada espira, de modo a se obter um campo magnético resultante de intensidade proporcional ao número de espiras e à intensidade de corrente. O seu sentido depende do sentido da corrente instantânea e do sentido de enrolamento da bobina.

Com intuito de gerar um campo girante, posicionam-se as bobinas no estator do motor, de modo a intercalar as fases. No entanto, o enrolamento pode se apresentar de diferentes modos.

Identifica-se enrolamento em espiral, quando as espiras se encontram nas ranhuras de forma concêntrica. Esta configuração não apresenta vantagens ou propriedades específicas ao motor, o que justifica a sua pouca utilização na indústria.

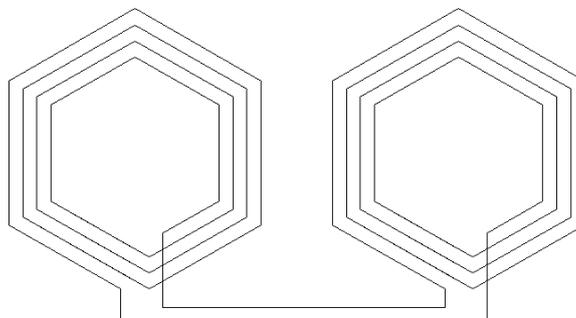


Figura 2: Enrolamento em espiral ou concêntrico

O bobinamento imbricado, ou diamante, possui todas as espiras de mesmo tamanho. Este modo de enrolamento se subdivide em duas categorias: enrolamento imbricado de passo pleno e de passo encurtado.

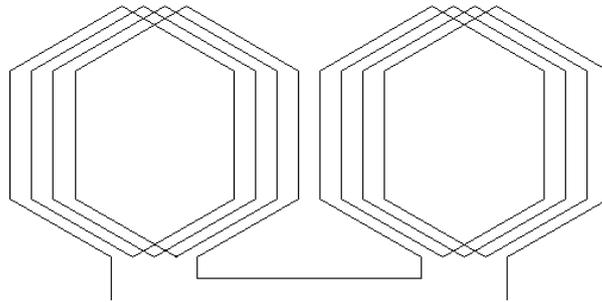


Figura 3: Enrolamento imbricado ou em diamante

O enrolamento de passo pleno se caracteriza por bobinas com 180° elétricos de largura. Neste caso, se um lado da espira está no centro de um polo, o outro lado se encontra no centro de um polo oposto vizinho. Em estatores de camada dupla, quando há dois lados de bobina por ranhura, certifica-se de que não haverá dois lados de espiras de fases diferentes na mesma ranhura, o que reduz a necessidade de maiores isolantes nos condutores.

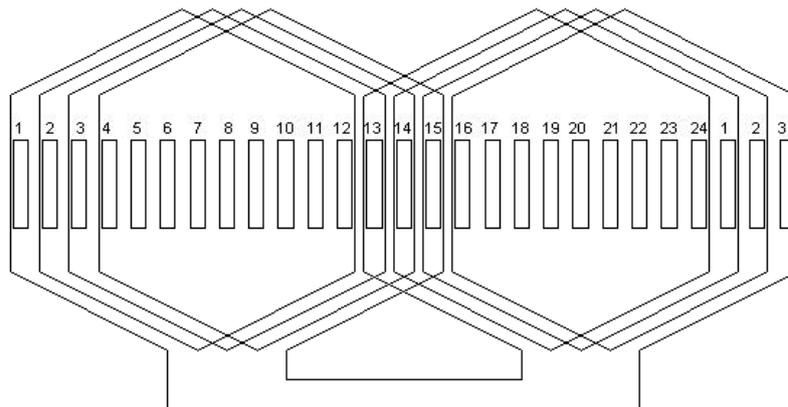


Figura 4: Enrolamento imbricado de passo pleno

O enrolamento encurtado possui espiras de largura menores que 180° elétrico. A redução de harmônicos espaciais e das bobinas, que por consequência reduzem o custo, a resistência e a indutância do estator, justificam o uso deste enrolamento. Este enrolamento normalmente se encontra com passo de 80% (80% da largura da bobina de passo pleno). Por outro lado, para se obter uma força eletro motriz (f.e.m.) resultante igual a um motor de enrolamento de passo pleno necessita-se de uma f.e.m. maior em cada bobina, o que resulta em um aumento da corrente nas mesmas.

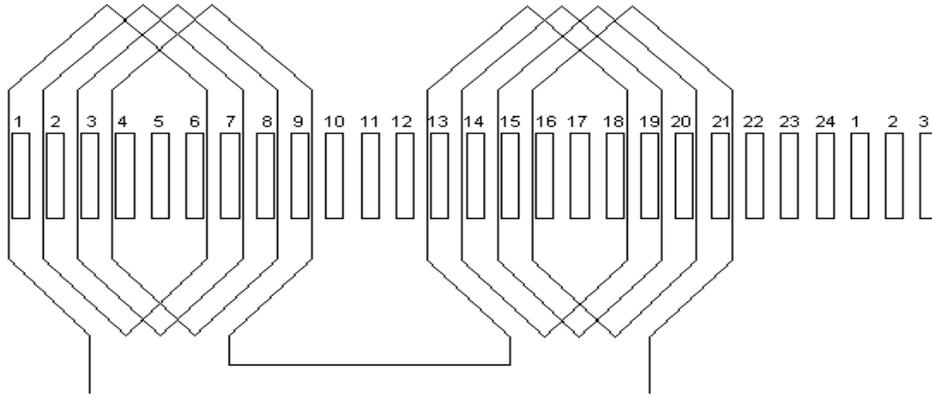


Figura 5: Enrolamento imbricado de passo encurtado

2.3.2 Rotor

Em motores de indução, alimenta-se o rotor através da indução eletromagnética. Deste modo não há a necessidade do uso de anéis e escovas, o que evita problemas de centelhamento e de desgaste do carvão da escova, o que necessita de manutenção frequente e gera ruído.

Existem dois tipos de rotores de motores de indução: bobinado e tipo gaiola de esquilo.

O rotor bobinado possui bobinas de arranjo trifásico e deve ter o número de polos igual ao do estator. As bobinas se encontram conectadas em Y e suas pontas ligadas a 3 anéis condutores.

As principais vantagens do enrolamento bobinado estão no acesso às correntes do rotor e que, com o intuito de na partida reduzir a corrente e elevar o torque, ele permite a conexão de resistências em série com o rotor. Este método aumenta as perdas do motor, no entanto esta solução se apresenta como uma das mais simples e baratas para o controle de corrente e torque de partida.



Figura 6: Rotor bobinado

Chama-se rotor tipo gaiola de esquilo, o rotor composto de barras de material condutor paralelas entre si e curto-circuitadas por anéis condutores entre si. Neste rotor, geram-se os polos por indução, o que certifica a igualdade do número de polos do rotor e do estator.



Figura 7: Rotor gaiola de esquilo

Com a evolução dos motores de indução, verificou-se que o formato das barras de material condutor age diretamente sobre o comportamento do motor e, por consequência, na curva de Torque x Velocidade. Por isto, classificam-se os motores de indução pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) em classes de acordo com a sua curva torque e velocidade (CHAPMAN – 2004).

2.4 Modelo

O modelo matemático de motores de indução utilizado neste trabalho não se formou a partir das equações eletromecânicas do motor, como os motores de CC e síncronos normalmente se apresentam. Isto se deve à alta complexidade de equacionar o efeito indutivo devido às indutâncias mútuas entre as fases e entre o rotor o estator. Tais indutâncias agem diretamente sobre o fluxo enlaçado e, por consequência, no comportamento do torque do motor.

Segundo diversas referências bibliográficas (CHAPMAN – 2004; FITZGERALD – 2006), utiliza-se o modelo apresentado na figura 8 para o funcionamento em regime permanente.

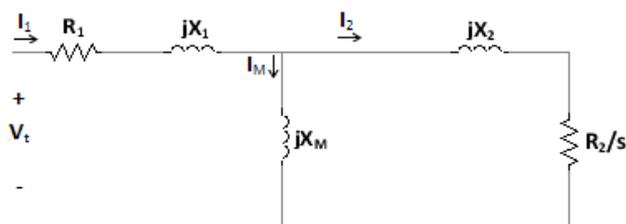


Figura 8: Modelo simplificado do motor de indução

Neste modelo, o rotor e o estator são representados por uma resistência e uma indutância e ainda há uma indutância de magnetização. Observa-se que o efeito de escorregamento age sobre o modelo, em que a resistência rotórica está dividida por este.

2.4.1 Modelo equivalente de Thévenin

Para cálculos de corrente e potência, o modelo equivalente de Thévenin pode se apresentar mais conveniente, devido ao fato que o modelo anteriormente apresentado se simplifica a um laço único, por onde flui apenas a corrente do rotor (I_2).

Assim tem-se:

$$V_{th} = \frac{X_m V_t}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \quad (5)$$

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{[R_1 + j(X_1 + X_m)]} \quad (6)$$

Com os valores calculados de V_{th} e Z_{th} , chega-se ao modelo Thévenin da figura 9.



Figura 9: Modelo do motor de indução com equivalente de Thévenin

2.5 Fluxo de Potência

Uma máquina de indução trifásica tem a sua potência de entrada (P_{ent}) expressa pelos valores de tensão de alimentação entre fases (V_L) e corrente do estator (I_1) e o fator de potência, como apresentado na equação (7).

$$P_{ent} = \sqrt{3} V_L I_1 \cos \theta \quad (7)$$

No estator há dois tipos de perda: perdas ôhmicas no estator (P_{os}) e perdas no núcleo de ferro por histerese e Foucault (P_{hfs}). Calculam-se as perdas ôhmicas no núcleo pela equação (8).

$$P_{os} = 3 R_1 I_1^2 \quad (8)$$

As perdas no núcleo dependem da característica do ferro, do espaço entre o estator e o rotor do motor, denominado *gap*, entre outros parâmetros. Tornando assim, complexo o equacionamento destas perdas.

Portanto se obtém a potência transmitida ao rotor (P_g) a partir da equação (9).

$$P_g = P_{ent} - P_{os} - P_{hfs} \quad (9)$$

O rotor possui perdas ôhmicas rotóricas, expressas pela equação (10), equacionada equivalente às perdas ôhmicas no estator (P_{os}), e perdas de histerese e Foucault no rotor (P_{hfr}), que, igualmente às do estator, dependem de parâmetros construtivos e de material.

$$P_{or} = 3R_2 I_2^2 \quad (10)$$

Obtém-se a potência mecânica (P_{mec}), através da potência induzida subtraída das perdas no rotor.

$$P_{mec} = P_g - P_{or} - P_{hfr} \quad (11)$$

Por último se tem perdas mecânicas por atrito e ventilação (P_{av}). Aspectos construtivos geram estas perdas, como pontos de contato do mancal que atritam com o a carcaça do motor e a ventilação que, com o intuito de aumentar o valor da corrente nominal do motor, gera um torque resistivo.

Subtraindo as perdas mecânicas da potência mecânica se obtém a potência entregue a carga no eixo (P_{eixo}).

$$P_{eixo} = P_{mec} - P_{av} \quad (12)$$

Assim conclui-se o fluxo de potência representado pela figura 10.

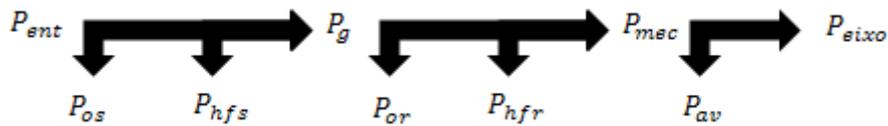


Figura 10: Fluxo de potência de motores de indução

Por convenção, se expressa o torque induzido por:

$$T_{ind} = \frac{P_{eixo}}{\omega_r} \quad (13)$$

Para facilitar os cálculos, desprezam-se as perdas por histerese e Foucault, tanto no estator quanto no rotor, e as perdas mecânicas. Assim tem-se:

$$P_{eixo} = P_g - P_{or} \quad (14)$$

Pelo modelo anteriormente descrito tem-se:

$$P_g = \frac{3R_2}{sI_2^2} \quad (15)$$

Logo:

$$P_g = \frac{P_{or}}{s} \quad (16)$$

Por isso pode-se considerar a equação (17).

$$T_{ind} = \frac{(1-s)P_g}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (17)$$

A partir do modelo equivalente de Thévenin pode-se expressar o torque induzido da seguinte forma:

$$T_{ind} = \frac{3(R_2/s)I_2^2}{\omega_s} \quad (18)$$

Sendo:

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{[(R_{th}+R_2/s)^2 + (X_{th}+X_2)^2]}} \quad (19)$$

$$T_{ind} = \frac{3(R_2/s)V_{th}^2}{[\omega_s((R_{th}+R_2/s)^2 + (X_{th}+X_2)^2)]} \quad (20)$$

Esta expressão permite levantar a curva teórica do torque induzido pela velocidade do motor e assim obter a curva característica do motor de indução.

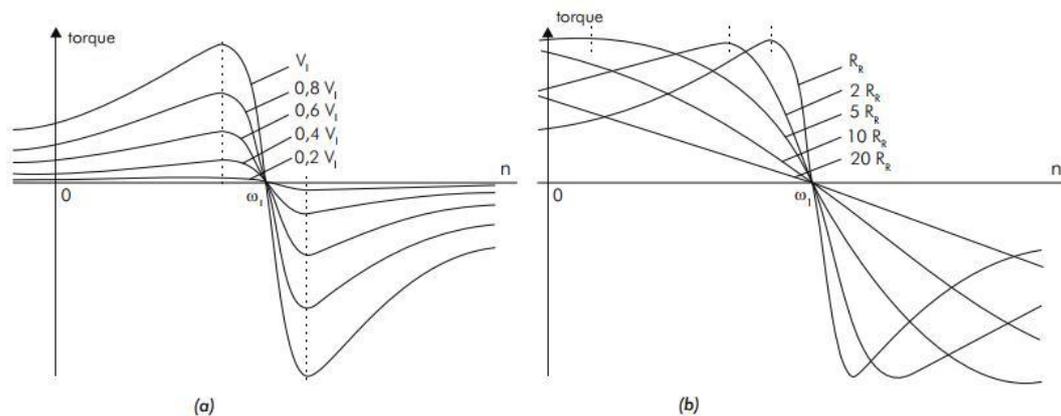


Figura 11: Curvas características de Torque x Velocidade; em (a) com variação da tensão de alimentação; em (b) com variação da resistência rotórica.

2.6 Definição dos parâmetros do motor

Como visto anteriormente, define-se o modelo de um motor de indução a partir de seus parâmetros. Estimam-se o valor destes parâmetros através da realização de três ensaios: de corrente contínua, a vazio e de rotor bloqueado (CHAPMAN – 2004). Cada um destes se responsabiliza pela definição de diferentes parâmetros, o que implica que apenas a realização dos três ensaios possibilita a modelagem total do motor.

2.6.1 Ensaio de corrente contínua

O ensaio de corrente contínua permite definir diretamente a resistência do estator, sem que haja qualquer influência das outras resistências e indutâncias presentes no motor.

Este ensaio necessita de uma fonte contínua de tensão, um amperímetro e um voltímetro. Estes equipamentos se encontram montados na forma representada pela figura 12.

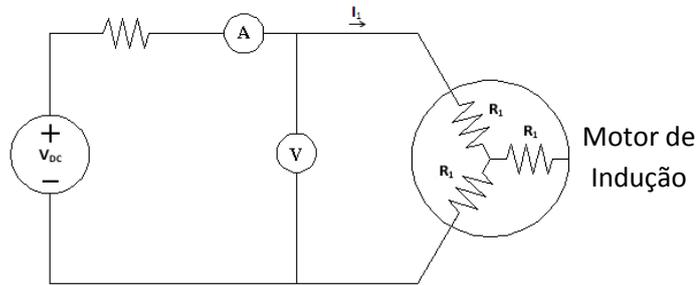


Figura 12: Montagem para o ensaio de corrente contínua de motores de indução

As indutâncias do estator alimentadas por corrente contínua, se comportam como curto-circuito quando o sistema se encontra em regime permanente. E não há interação entre o estator e o rotor, pois só há indução magnética a partir da variação da corrente. Portanto, o modelo equivalente se limita às resistências do estator.

O modelo representa uma única fase do motor, por isto considera-se que a resistência do estator esteja em estrela.

Calcula-se, então, a resistência do estator a partir da equação (21).

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{2I_{CC}} \quad (21)$$

Este teste não considera o efeito pelicular, somente presente em corrente alternada. O condutor quando alimentado em corrente contínua tem a totalidade de sua seção conduzindo corrente. Quando se alimenta o mesmo condutor com uma corrente alternada, as cargas tendem a se acumular na superfície do fio o que resulta numa redução da área de condução e, por consequência, um aumento da resistência do condutor. O efeito pelicular se torna mais significativo quanto maior a bitalo do condutor e a frequência

2.6.2 Ensaio a vazio

Através deste ensaio se define os valores das perdas mecânicas e por histerese e *Foucault* do motor e se obtém informações sobre a corrente de magnetização.

Para a sua realização necessita-se de um voltímetro, dois wattímetros e um amperímetro por fase. A montagem deve ser como apresentado na figura 13.

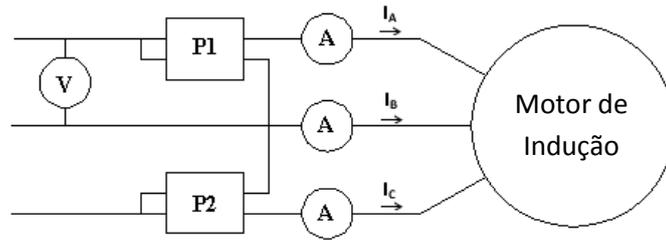


Figura 13: Montagem para o ensaio a vazio de motores de indução

Chama-se ensaio a vazio pelo fato de que não há carga aplicada ao rotor do motor. Nesta situação o escorregamento tende a zero, o que permite definir que as perdas consomem toda a potência de entrada do motor.

Neste ensaio, desconsideram-se as perdas ôhmicas do rotor, pois a resistência R_2/s possui valor muito elevado para escorregamento nulo, resultando em uma corrente no rotor aproximadamente nula. Neste caso, considera-se a corrente de magnetização igual a corrente do estator. Deste modo, simplifica-se o modelo ao apresentado na figura 14 e define-se a equação (22).

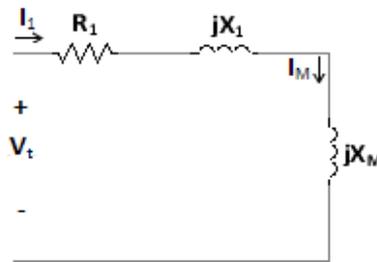


Figura 14: Modelo de motor de indução simplificado para o ensaio a vazio

$$X_1 + X_m = \frac{V_t}{I_1} \quad (22)$$

A resistência R_1 não aparece na equação, pois este possui valor muito inferior em relação às indutâncias.

Assim pode-se concluir, nesta situação, a equação (23):

$$P_{in} = P_{os} + P_{hf} + P_{av} \quad (23)$$

Calculam-se as perdas ôhmicas do estator pela equação (8), em que se utiliza o valor da corrente medida durante este ensaio e a resistência calculada pelo ensaio de corrente contínua. Deste modo, pode-se calcular um valor constante para o somatório das perdas mecânicas e por histereses *Foucault*. Perdas mecânicas possuem uma pequena variação de acordo com a velocidade que se encontra o motor, porém considera-se constante para simplificar os cálculos.

2.6.3 Ensaio de rotor bloqueado

Neste ensaio deseja-se determinar os valores da resistência rotórica e das indutâncias do rotor, do estator e de magnetização.

Para a realização deste teste necessita-se de um voltímetro, dois wattímetros e um amperímetro por fase. A montagem dos equipamentos para este teste está apresentada na figura 15.

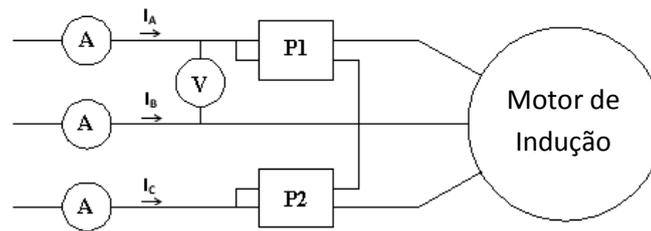


Figura 15: Montagem para o ensaio de rotor bloqueado de motores de indução

Opostamente ao ensaio a vazio, bloqueia-se o rotor mecanicamente e assim tem-se escorregamento unitário, pois se tem velocidade rotórica nula. Neste caso a resistência e a impedância do estator possuem valores significativamente inferiores à indutância de magnetização, tendo assim a corrente do rotor aproximadamente igual à do estator.

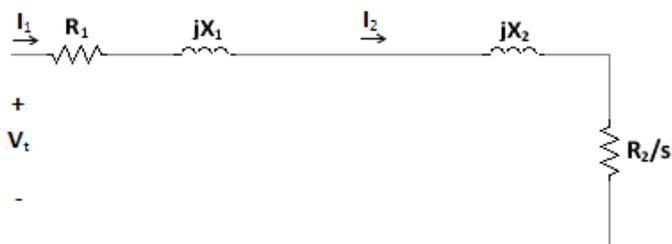


Figura 16: Modelo simplificado de motores de indução para o ensaio a vazio

Calcula-se o fator de potência através dos valores de potência, tensão e corrente medidos durante o ensaio. Este valor e o da impedância equivalente (Z_{eq}) possibilitam determinar os parâmetros R_2 , X_1 e X_2 .

$$|Z_{eq}| = \frac{V_t}{I_1} \quad (25)$$

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (29)$$

$$Z_{eq} = |Z_{eq}| \cos\theta + j|Z_{eq}| \sen\theta \quad (30)$$

Em que:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (31)$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2 \quad (32)$$

A partir do valor da resistência do estator estimado no ensaio de corrente contínua, calcula-se o valor da resistência R_2 do modelo. Para calcular os valores de cada indutância, necessita-se consultar a tabela (1), onde se encontra a relação entre os valores das impedâncias X_1 , X_2 e X_{eq} para cada classe de motor de indução.

Tabela 1: Relação entre as impedâncias do rotor e do estator em relação à impedância equivalente calculado no ensaio

Classe do motor de indução	X_1 e X_2 em função de X_{eq}	
	X_1	X_2
Rotor bobinado	$0,5 X_{eq}$	$0,5 X_{eq}$
Classe A	$0,5 X_{eq}$	$0,5 X_{eq}$
Classe B	$0,4 X_{eq}$	$0,6 X_{eq}$
Classe C	$0,3 X_{eq}$	$0,7 X_{eq}$
Classe D	$0,5 X_{eq}$	$0,5 X_{eq}$

Este teste apresenta uma dificuldade em sua execução. A frequência do rotor em operação normal varia entre 2% e 4% da frequência de alimentação do estator. Neste caso, em que se tem escorregamento unitário, a frequência do rotor se iguala a do estator. Deste modo, os valores obtidos não estão de acordo com a realidade, pois não representa uma situação real de operação. Para reduzir erros de ensaios, se prevê a sua realização com uma frequência de alimentação (f_{teste}) igual ou inferior a 25% da frequência nominal ($f_{nominal}$).

Portanto, calcula-se o X_{eq} do modelo a partir da impedância medida no teste pela equação (33):

$$X_{eq} = \frac{f_{nominal}}{f_{teste}} X_{eq_{teste}} \quad (33)$$

Obtém-se o valor da indutância de magnetização a partir do valor da indutância de estator calculado neste ensaio e o valor da soma das impedâncias do estator e de magnetização, obtida no ensaio a vazio.

3. Motor Dahlander

3.1 Definição

Chama-se motor Dahlander o motor de indução trifásico que permite a modificação do número de polos de seu único enrolamento numa razão 1:2 a partir da modificação de suas conexões externas.

Motores de indução, como dito anteriormente, tem sua velocidade regida pela equação (4). Considerando que em condições normais de operação, o escorregamento varia pouco e principalmente em relação à carga, há somente duas maneiras de variar significativamente esta velocidade: variando ou a frequência ou o número de polos.

A variação de frequência, também conhecida como controle contínuo de velocidade, se apresenta confiável e robusto quando utilizados controladores de custo elevado como, por exemplo, inversores de frequência.

Por outro lado, o método de controle de velocidade por variação ou comutação de polos se comporta de modo discreto, pois podem ser atribuídos apenas valores inteiros e pares ao número de polos. Logo, em aplicações em que haja 2, 3 ou 4 velocidades distintas de operação, esse método se mostra a solução mais indicada.

Um motor com dois enrolamentos independentes, sendo cada um com o número de polos diferente, igualmente ao motor Dahlander, pode comutar o número de polos. Para um exemplo em que haja um enrolamento de 4 e outro de 6 polos, tem-se respectivamente uma velocidade síncrona de 1800 e de 1200 rpm. As desvantagens deste método são o custo e o tamanho do motor, causados pelo enrolamento extra. Usufruindo deste método concomitantemente com o enrolamento Dahlander, pode-se obter 3 ou 4 velocidades síncronas.

O controle discreto de velocidade por comutação de polos tem como vantagem a eliminação do uso de engrenagens que, no acionamento, geram perdas por vibração. Por consequência, reduz-se o ruído e aumenta-se o rendimento do conjunto.

Já o motor Dahlander apresenta diferentes curvas de Torque x Velocidade quando opera em baixa e em alta velocidade. Esta propriedade pode solucionar os problemas de partida de motores, como elevadas correntes de partida e altos torques de carga.

Motores Dahlander se encontram em uso principalmente em situações em que se necessita de alto torque partida, como por exemplo: elevadores, guindastes, talhas e laminadores, mas também pode ser encontrados em ventiladores que possuem 2 ou 3 velocidades de operação.

3.2 Comutação de polos

O motor do tipo Dahlander possui aspectos construtivos específicos que permitem a sua comutação de polos.

Primeiramente, necessita-se que o motor possua o rotor tipo gaiola de esquilo. Como citado anteriormente, este rotor tem o seu número de polos determinado pela indução do motor. Logo, ao se comutar o número de polos do estator, se comuta os polos do rotor.

O estator, por sua vez, deve ser de enrolamento imbricado de dupla camada, para o funcionamento com os dois diferentes números de polos. Utiliza-se o método de enrolamento do estator por polos consequentes, com o número de bobinas igual ao menor número de polos do motor.

O método de enrolamento de polos consequentes permite comutar o número de polos do único enrolamento do motor. Normalmente, cada bobina gera um polo do motor, isto porque metade destes grupos está polarizada como norte e a outra metade esta polarizada como sul. No entanto, o método de enrolamento de polos consequentes permite a polarização de todas as bobinas num mesmo sentido. Isto força, por consequência, polos de sentido oposto entre as bobinas. Deste modo, o motor opera com o número de polos igual ao dobro do número de bobinas.

Para alimentar estes tipos de enrolamento, deve-se mudar a ligação das bobinas de série para paralelo e vice-versa. Dividem-se as bobinas em dois grupo, as ímpares e as pares. Cada um destes terá todas as bobinas conectadas em série de modo que todas estejam enroladas no mesmo sentido.

Num primeiro caso conectam-se os dois grupos em série de tal maneira que as bobinas dos dois grupos se encontrem todas no mesmo sentido. Logo, tem-se $2n$ polos para n bobinas. Se estes dois grupos forem conectados em paralelo a polaridade de um dos grupos se mantém, enquanto a do outro grupo inverte, de tal modo, o motor tem n polos.

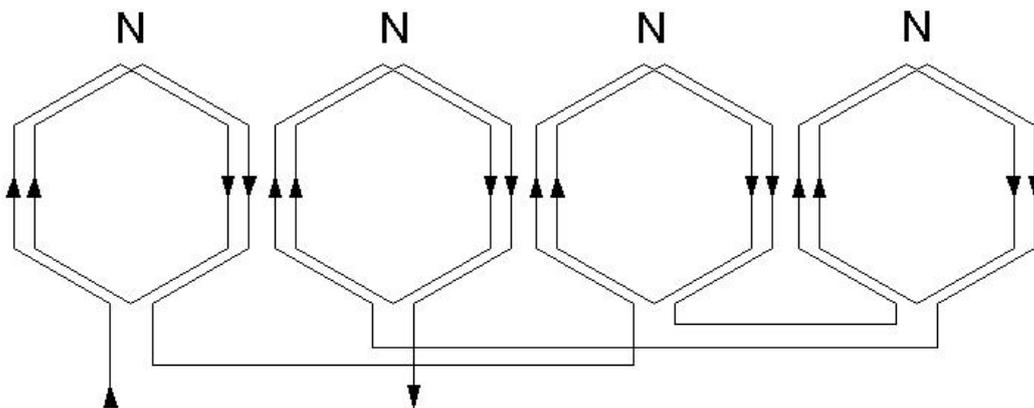


Figura 17: Enrolamentos do 1º caso em série

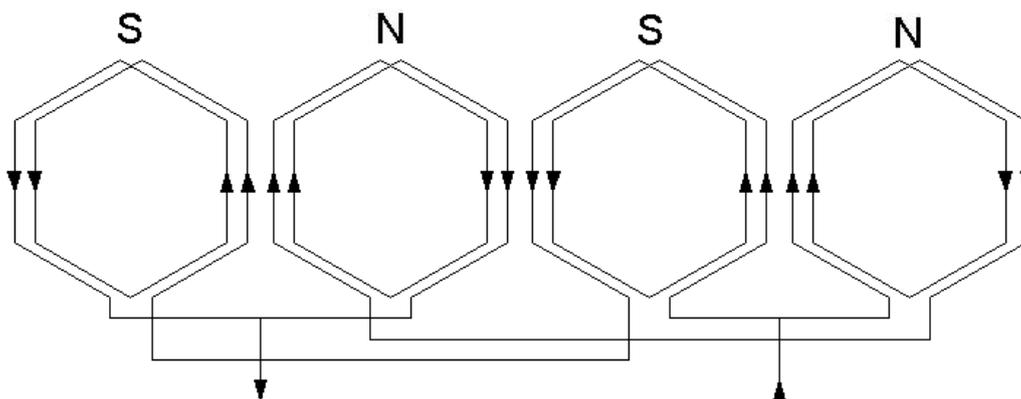


Figura 18: Enrolamento 1º caso em paralelo

Num segundo caso conectam-se os dois grupos novamente em série, porém desta vez as bobinas ímpares se encontraram opostas às bobinas pares. Ao alimentá-las em série se tem n polos. Quando ligam os grupos em paralelo, um deles tem sua polaridade invertida, assim, todas as bobinas se encontram com a mesma polaridade e se tem $2n$ polos no motor.

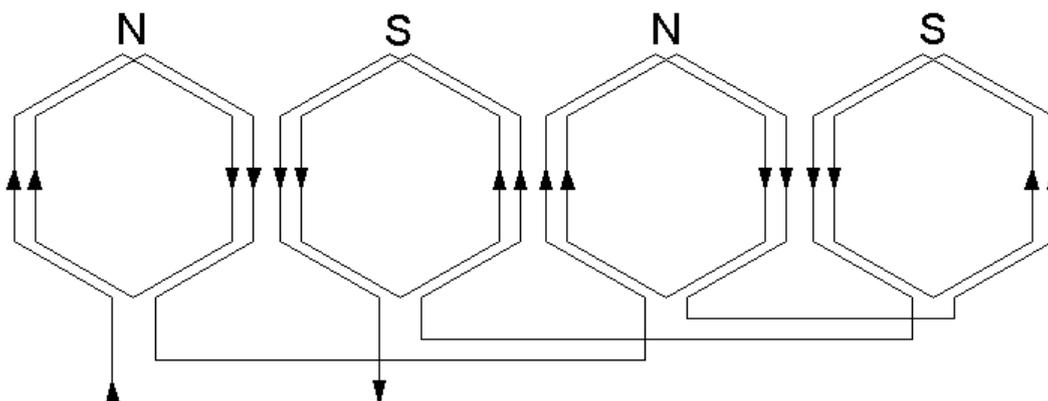


Figura 19: Enrolamento 2º caso em série

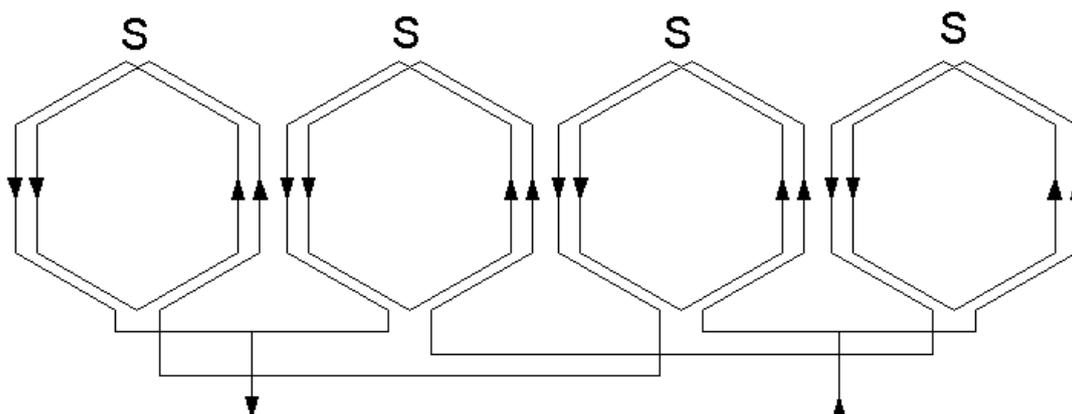


Figura 20: Enrolamento 2º caso em paralelo

Observa-se que alta rotação e baixa rotação podem ser obtidas tanto ligando as bobinas em série como em paralelo. Este fato influencia diretamente no comportamento do motor, pois a tensão nos grupos de bobinas em paralelo é o dobro da tensão quando estes se encontram em série. Como demonstrado na equação (20), o torque induzido é diretamente proporcional ao quadrado da tensão.

O mesmo enrolamento deve estar apto para o maior e menor número de polos. Em vista disto, se tornam necessárias bobinas de enrolamento imbricado com passo de 50% no estator. Isto se deve ao fato que quando o motor estiver operando em baixa rotação, em que há o dobro de polos, tem-se bobinas com o passo de 100%, segundo a definição.

3.3 Curvas características

Como já exposto, comuta-se o número de polos do motor Dahlander a partir da modificação da alimentação de cada fase. Porém, as fases de um motor trifásico podem se encontrar conectadas de duas maneiras diferentes: em estrela ou em triângulo. Na prática a diferença entre estas duas ligações está na tensão sobre o enrolamento da fase. Em um motor com as fases conectadas em triângulo, a tensão de linha está sobre o enrolamento de cada fase. Na ligação em estrela, tem-se a tensão sobre o enrolamento igual à tensão de linha dividida por $\sqrt{3}$.

Portanto este motor permite 8 maneiras diferentes de ligação: em dois números de polos diferentes, com as bobinas em série ou em paralelo e com as fases em estrela ou triângulo. A partir da equação (20) de torque induzido, pode-se concluir a seguinte tabela de fator de proporcionalidade de torque para as possíveis ligações de um motor Dahlander.

Tabela 2: Fator de proporcionalidade de torque para cada ligação

2n polos		n polos		
Δ	Y	Δ	Y	
1 (a)	1/3 (c)	1/2 (b)	1/6	Série
4	4/3 (b)	2	2/3 (a, c)	Paralelo

O acesso a todas as 12 conexões do motor, sendo 4 de cada fase, permitiria ligar um motor a todas as 8 conexões possíveis. No entanto, por segurança, os motores desenvolvidos pelos fabricantes possuem 6 conexões acessíveis ao usuário, o que limita o motor a uma conexão de alta rotação e uma de baixa rotação, que pelo método de enrolamento por polos consequentes, tem-se obrigatoriamente uma em série e a outra em paralelo.

Assim, limita-se o motor a oito diferentes pares de montagem. Dentre estes, 3 se encontram com maior utilidade na indústria e por isto estão sinalizados na tabela pelas letras (a), (b) e (c). Justifica-se o não uso das outras três conexões, pelo fato que motores conectados em Δ -paralelo possuem alto torque, como visto na tabela 1, indicando, neste caso, valores de corrente igualmente muito elevados. Por outro lado, o motor com a conexão Y-série em alta rotação possui conjugado muito reduzido para indústria.

(a) Conjugado Constante:

Obtém-se esta primeira configuração ao conectar as fases como demonstrado na figura 21. De modo a se obter nas duas velocidades de rotação um conjugado máximo aproximadamente igual, como representado no gráfico da mesma figura.

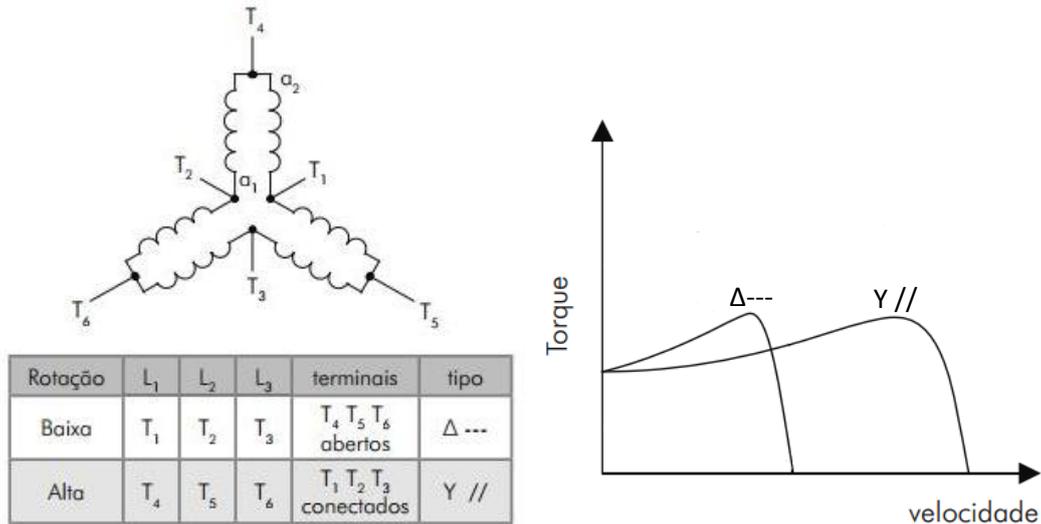


Figura 21: Conexão e curva Torque x Velocidade do motor Dahlander na configuração conjugado constante

Nesta configuração, o motor parte em velocidade reduzida sem perda de torque, o que reduz a corrente de partida. Uma vez o motor em movimento, se reduz o número de polos para atingir a velocidade de operação do motor.

Visto que o tamanho do motor está diretamente relacionado com o seu torque (STEPHAN – 2009), os motores nas configurações de potência constante e conjugado variável se apresentam superdimensionados segundo os seus aspectos construtivos em uma das duas ligações. Isto pode justificar o fato que dentre as três configurações citadas, o motor Dahlander de conjugado constante é o mais produzido na indústria, sendo o único produzido em série pela WEG (veja ANEXO I), maior produtora de motores elétricos do Brasil.

(b) Potência Constante:

Para obter potência constante nas duas rotações, devem-se conectar as fases como apresentado na figura 22. No caso de potência constante, tem-se o torque inversamente proporcional à velocidade. Em vista disto, o conjugado máximo na menor rotação é aproximadamente o dobro do torque máximo de maior rotação, permitindo assim, partir o motor com alto torque e após aumentar a velocidade diminuindo o torque.

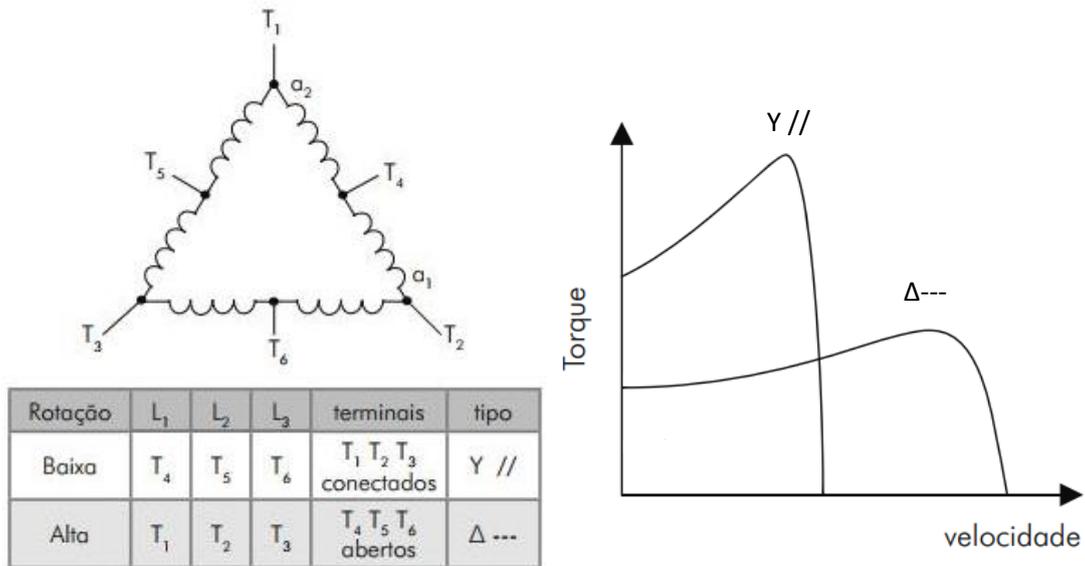


Figura 22: Conexão e curva Torque x Velocidade do motor Dahlander na configuração potência constante

Esta configuração não tem o intuito de reduzir a corrente de partida, diferentemente das outras duas citadas.

(c) Conjugado Variável:

Nesta configuração temos conjugado da máquina variando com o quadrado da velocidade. Ou seja, dobrando a quadruplica-se o conjugado.

Esta configuração tem como principal objetivo a redução significativa da corrente de partida do motor, causando baixo torque na partida.

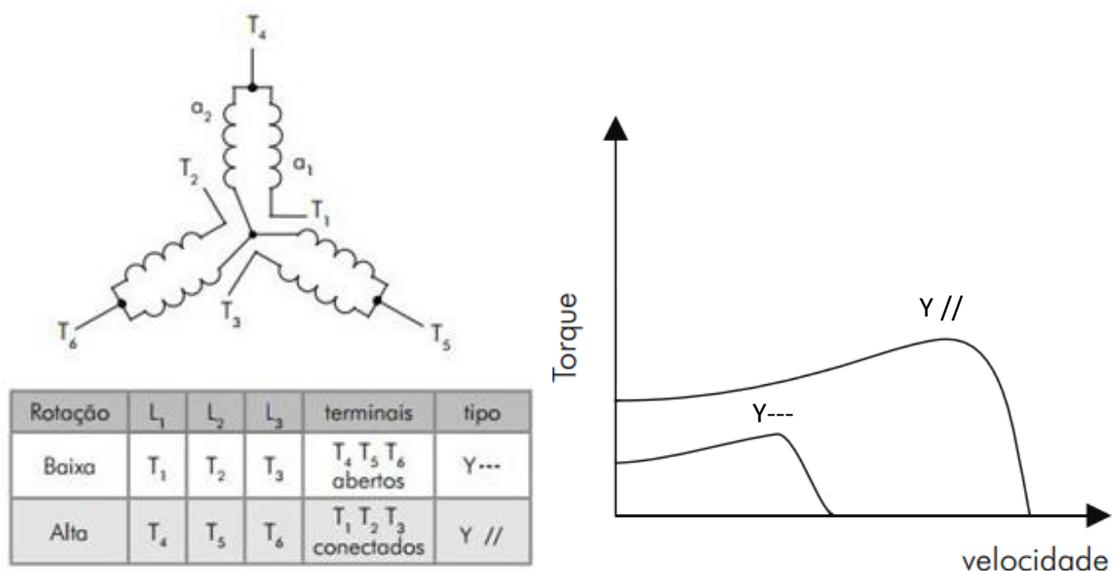


Figura 23: Conexão e curva Torque x Velocidade do motor Dahlander na configuração conjugado variado

4. Bancada de teste

4.1 Descrição

Esta bancada de teste se encontra no Laboratório de Máquinas Elétricas (LABMAQ) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Esta bancada foi instrumentada para a análise da operação do motor Dahlander, estudo que se encontra neste projeto. Mas ela se mantém como ferramenta de estudo e testes de motores elétricos para futuros trabalhos, permitindo também o seu uso acadêmico, no modo de experimento ou como ferramenta de demonstração.

O levantamento de curvas-características de Torque x Velocidade e Corrente de Partida x Tempo de motores elétricos em computador se apresenta como sua principal funcionalidade.



Figura 24: Bancada de teste

4.2 Equipamentos:

Os seguintes equipamentos constituem esta bancada de teste:

- Gerador de Corrente Contínua
- Bancada de resistores
- Variac
- Retificador
- Encoder incremental E3A1A da S&E Instrumentos
- Circuito conversor de frequência em tensão.
 - Fonte de tensão contínua
- Sensor de torque modelo 1100 da Lebow Products
- Display eletrônico 7550 da Lebow Products
- Amperímetro com conector BNC
- Computador munido do programa LabView

4.3 Sistema de controle de torque

Com a função de impor um torque ao motor em teste, tem-se um gerador de corrente contínua de excitação independente.



Figura 25: Gerador de corrente contínua

A seguir os valores nominais do gerador CC que constitui a bancada.

Tensão: 190 V
Corrente: 5 A
Potência: 0,75 kW
Velocidade: 1800 RPM

As seguintes equações regem o funcionamento de um gerador de corrente contínua:

$$V_a = E_a + R_a I_a \quad (34)$$

$$E_a = K_g \phi n \quad (35)$$

$$T = K_t \phi I_a \quad (36)$$

Em que:

- V_a : tensão de armadura;
- E_a : força eletromotriz;
- R_a : resistência da armadura;
- I_a : corrente de armadura;
- K_g e K_t : constantes de força eletromotriz e de torque, respectivamente;
- n : velocidade do motor;
- T : torque;
- ϕ : fluxo de campo;

Segundo o modelo matemático de geradores de corrente contínua, controla-se seu torque variando o valor da corrente de armadura ou o valor do fluxo de campo.

Para variar a corrente de armadura, necessita-se de um reostato conectado à saída da armadura do gerador. Pela lei de Ohm, para uma tensão constante, a corrente de armadura varia inversamente à resistência do reostato.

No entanto, na bancada utiliza-se o método de controle de torque por variação do fluxo de campo. Em máquinas de corrente contínua de excitação independente, a excitação depende apenas da corrente de excitação que flui pela bobina de campo. Para variar esta corrente varia-se a tensão contínua que alimenta o campo.

Para o controle de tensão do enrolamento de campo do gerador, utiliza-se um variac, que funciona como um autotransformador de *tap* variável. Deste modo, controla-se o valor de amplitude da tensão de saída do equipamento. Retifica-se esta tensão para então alimentar o campo do motor em tensão contínua.



Figura 26: Variac (abaixo) e retificador (acima)

Uma corrente de armadura nula não induz torque no motor, como visto na equação (35). Por isto, ainda se apresenta como necessário o uso de uma carga resistiva.



Figura 27: Banco de resistores

4.4 Sistema de medição de Velocidade

O encoder incremental E3A1A da S&E Instrumentos possui a função de medir a velocidade do motor. Este se encontra fixo ao eixo do gerador CC, que por sua vez, se encontra acoplado ao eixo do motor em teste.



Figura 28: Encoder

Este encoder incremental gera um sinal de 1024 pulsos por volta realizada. Logo, o período destes pulsos representa o tempo necessário para a realização de uma volta completa do motor, permitindo assim o cálculo de velocidade.

Este sinal, por sua vez, deve ser lido de maneira clara e simples pelo computador, logo se converte o sinal de frequência em um valor de tensão contínuo proporcional. Um circuito converte linearmente o sinal de frequência em tensão, em que o CI LM2917 realiza a principal operação. Para se obter a taxa de conversão entre a tensão de saída e a velocidade medida utilizou-se o método dos mínimos quadrados com a tensão de saída e a velocidade lida por um tacômetro óptico.

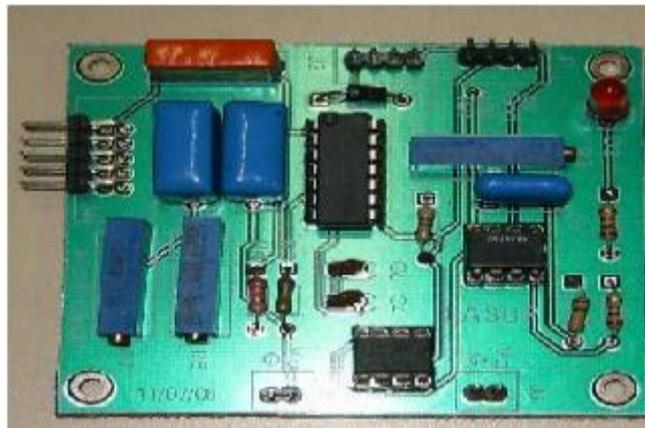


Figura 29: Circuito conversor de frequência em tensão

O Osciloscópio digital USB DSO-2090 da Hantek envia o sinal de tensão ao computador através de uma saída USB. Ele possui dois canais de entrada e tem como limites de frequência 40 MHz, de transmissão de sinal 100 MS/s e de tensão de entrada 35 V. Uma vez o sinal enviado ao computador, este passa por um tratamento a ser apresentado futuramente neste trabalho ao longo da explicação do programa em LabView desenvolvido para a bancada.



Figura 30: Osciloscópio digital USB DSO-2090

Uma fonte de tensão contínua nos valores de +5V, +15V e -15V também compõe a bancada. A tensão de +5V alimenta o encoder incremental enquanto as de +/- 15V alimentam o circuito conversor.



Figura 31: Fonte de corrente contínua

4.5 Sistema medidor de torque

O sensor de torque que se encontra na bancada é um modelo 1104 da Lebow Products. Este se encontra no eixo entre o motor e o gerador. O equipamento possui uma capacidade de 10 lb.in (11,30 N.m). Ele cria um sinal de tensão proporcional ao torque medido através de um *Strain Gauge* (extensômetro), que mede o torque a partir da deformação, e cria um valor de tensão através de uma ponte de Wheatstone.



Figura 32: Sensor de torque

O sinal de saída do sensor possui baixa amplitude e ruído de alta frequência, logo não pode ser lido diretamente por um osciloscópio. Em vista disto, o Display 7550, também da Lebow Products, decodifica o sinal de saída do sensor de torque e o envia ao computador, amplificando-o e filtrando o ruído, além de energizar o sensor.



Figura 33: Display 7550

Este display possui também a função de intermediário, possibilitando a comunicação entre o sensor e o computador, uma vez que este codifica o sinal em linguagem ASCII. Diferentes *softwares* decodificam esta linguagem, incluindo o LabView, utilizado no tratamento de dados da bancada. O display se conecta ao computador através de uma saída serial por um cabo RS232.

Para obter o valor correto de torque, o display 7550 necessita passar por uma rotina de calibração. Esta rotina inclui a aplicação constante de no mínimo duas intensidades diferentes de torque não nulas, para que o equipamento equacione a conversão de tensão em torque. Como o motor não aplica torque suficientemente constante para calibração, confeccionou-se uma barra metálica que afixada ao eixo do sensor de torque e posicionada na horizontal aplicava um valor de torque conhecido. Com o auxílio de um peso padrão, aplicaram-se mais dois valores de torque, variando a distância do ponto da barra em que peso padrão se encontrava pendurado ao eixo.

Um segundo medidor de torque, uma balança digital, se encontra afixado a um braço radial da carcaça livre do gerador de corrente contínua. A balança digital mede a força tangencial do braço, que multiplicado ao comprimento do braço somado ao raio do gerador, permite o cálculo do torque do motor por um segundo método. Este medidor verifica os valores medidos pelo medidor axial, já que a balança digital possui um valor confiável em regime permanente, no entanto o transiente sofre com a interferência da dinâmica da carcaça do gerador.

4.6 Sistema medidor de corrente

Um amperímetro alicate com saída BNC e o osciloscópio digital USB DSO-2090 compõem o sistema medidor de corrente. O osciloscópio digital possui duas entradas, sendo uma utilizada para o sistema de medição de velocidade e outra para o sistema de medição de corrente. O amperímetro alicate tem uma saída de tensão proporcional à corrente por ele medida, a qual se envia ao osciloscópio.



Figura 34: Amperímetro alicate

4.7 Sistema de aquisição e tratamento de dados.

Um computador munido do programa LabView da National Instruments compõe o sistema de aquisição de tratamentos de dados. Através do programa, o computador tem o intuito de receber todos os dados enviados pelos diferentes sistemas de medição e tratá-los de modo a levantar as curvas de Torque x Velocidade e Corrente de Partida x Tempo.

O *software* LabView possui simples compreensão, programação e comunicação com diversos equipamentos de medida. A programação se divide em duas partes integradas entre si: o diagrama de blocos e a interface.

O diagrama de blocos funciona de maneira similar ao SimuLink, um *software* mais usual entre engenheiros. Cada bloco possui a sua função e através de conexões entre as saídas e entradas dos blocos estipula-se a sequência na qual será executada cada função. Os blocos podem ser obtidos de bibliotecas existentes no programa ou confeccionados pelo programador. Não se pode editar o diagrama de blocos durante a execução do programa, mas ele permite a visualização do fluxo de sinal, assim como valores das variáveis intermediárias.

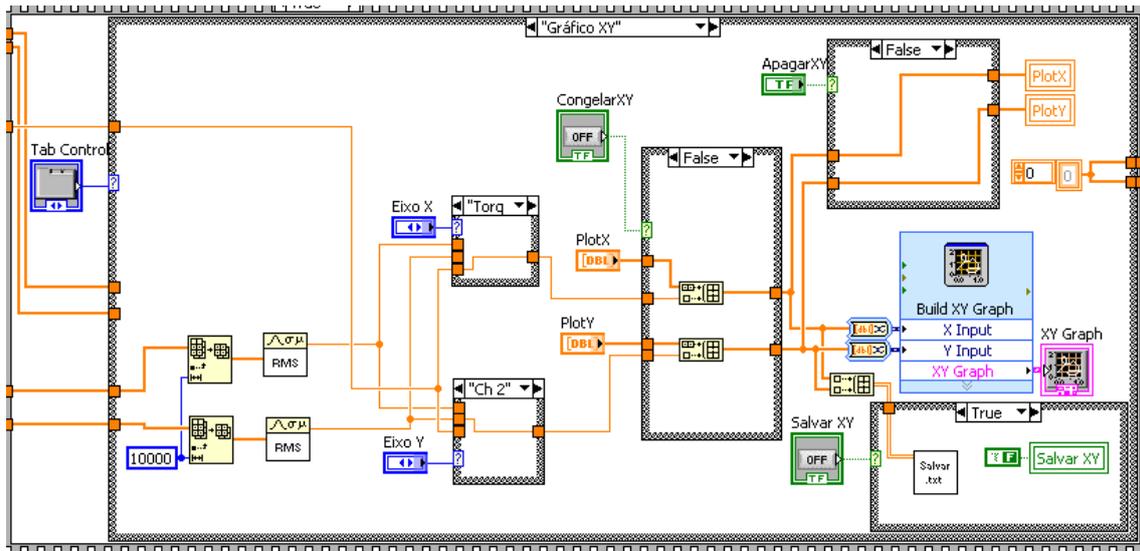


Figura 35: Exemplo de um diagrama de blocos do programa

Na interface se obtém o acesso aos valores das variáveis de entrada e visualizam-se as variáveis de saída, assim sendo, o programa se comporta como uma caixa preta. Ao contrário do diagrama de blocos, o LabView permite a alteração das variáveis de entrada, a partir da interface, durante sua execução.

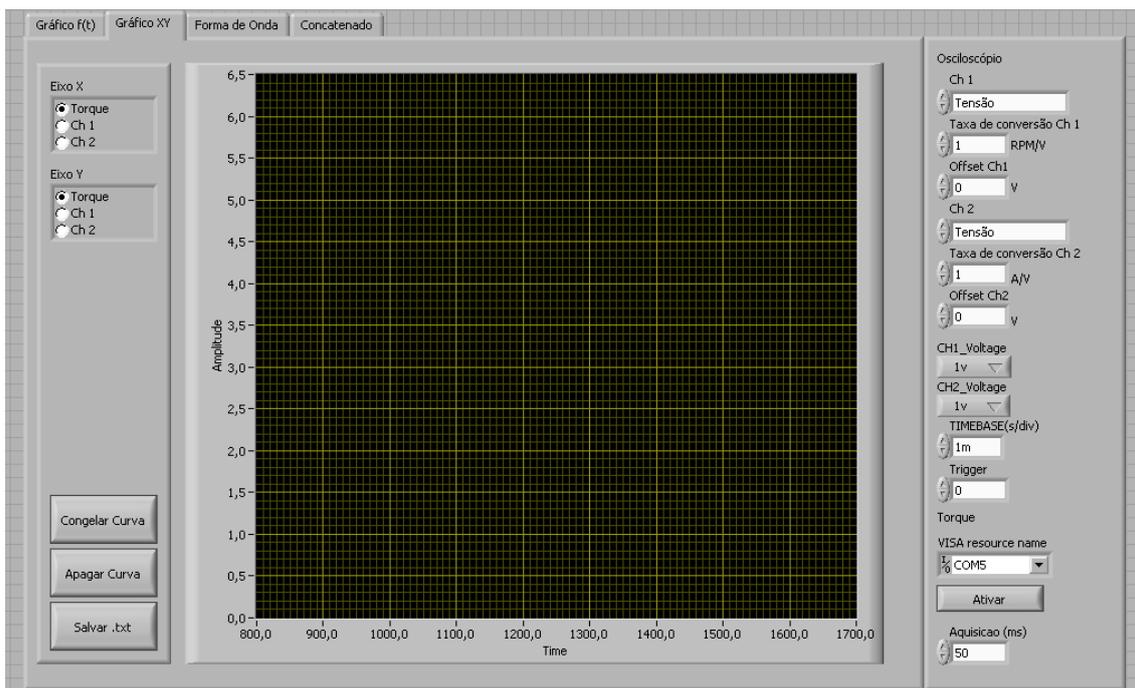


Figura 36: Exemplo de interface do programa

4.8 Programa

Primeiramente, o programa, ao receber os dados dos diferentes sensores, os converte nas respectivas unidades em SI. Para tal, o usuário deve preencher os dados que ficam na lateral esquerda da interface, onde se encontram as taxas de conversão de tensão nas unidades SI e o offset de tensão, se o aparelho o possuir. O display 7550 possui uma rotina de

calibração própria, logo o dado enviado ao computador já se encontra codificado no valor em Newton metro (N.m.). O osciloscópio digital envia um sinal com taxa de conversão fixa, em vista disto, converte-se este sinal no diagrama de blocos do programa, de modo a não ser acessível ao usuário.

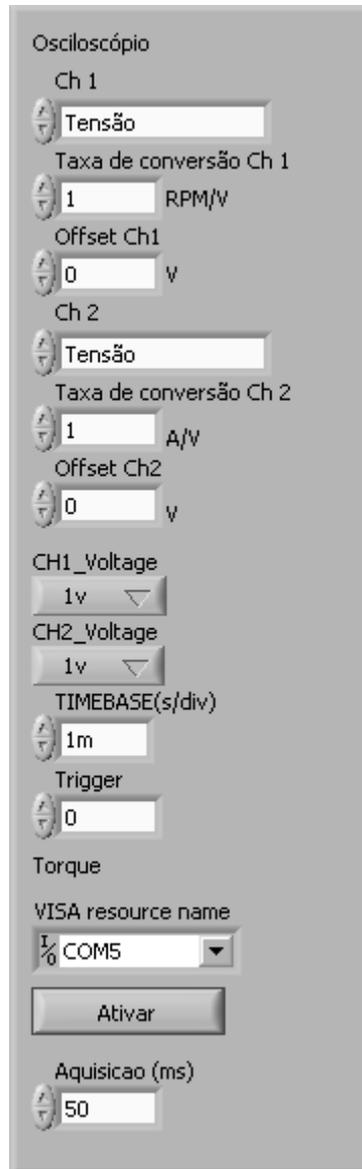


Figura 37: Coluna de conversão

O osciloscópio digital e o *Display 7550* se comunicam com o computador de maneiras distintas.

O osciloscópio possui uma biblioteca própria de funções em formato *.dll*. Por isto, o programa utiliza o diagrama de blocos disponibilizado pelo fabricante, o que permite o acesso aos valores de tensão medidos, no entanto limita o uso das funções do osciloscópio.

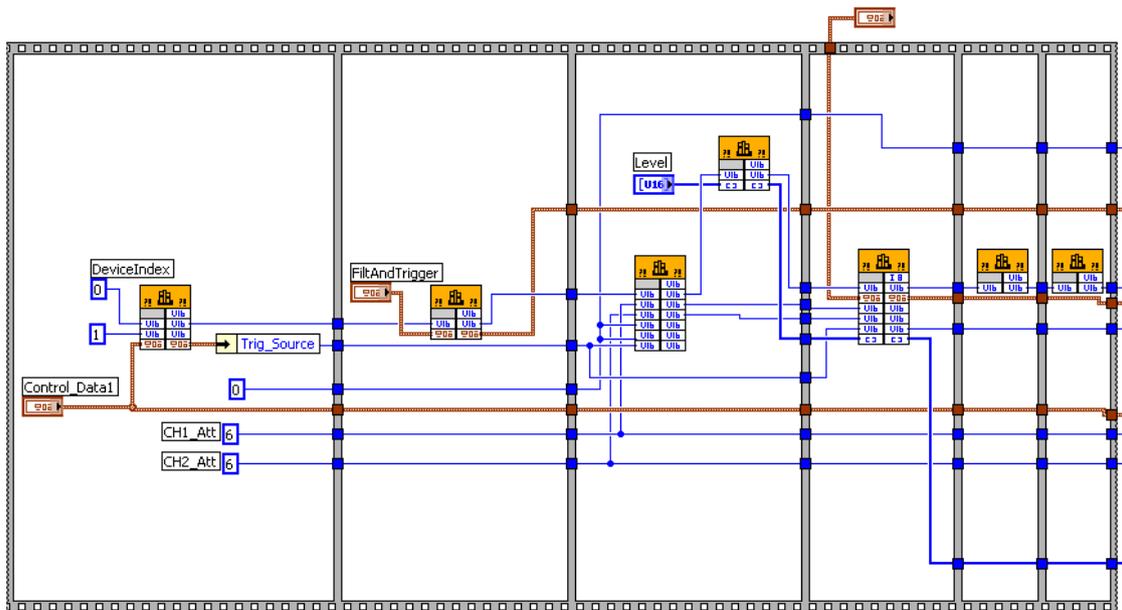


Figura 38: Parte do diagrama de blocos responsável pela comunicação com o osciloscópio

Por outro lado, o display 7550 tem uma comunicação por linguagem ASCII. Esta linguagem consiste no envio de comandos em formato de texto e na leitura das respostas do aparelho. Os comandos se encontram listados no manual do equipamento, assim como o formato das respostas a serem lida pelo programa. Uma sub-biblioteca do LabView possui as funções necessárias para o envio e leitura de comandos e respostas, respectivamente, por comunicação serial.

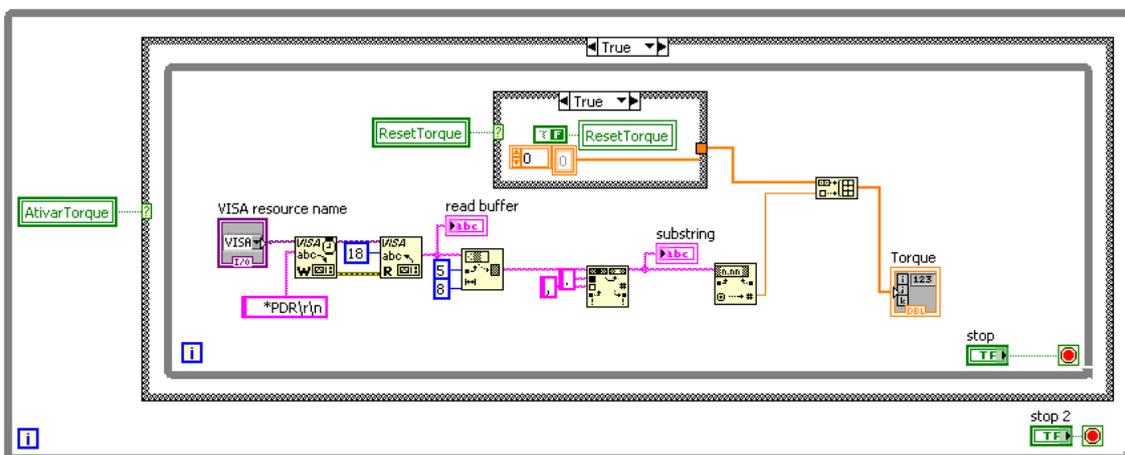


Figura 39: Parte do diagrama de blocos responsável pela comunicação com o Display 7550

Este programa realizado em LabView tem como principal função o levantamento das curvas características de motores elétricos, sendo estas as curvas de Torque x Velocidade e Corrente de Partida x Tempo. O programa trata estas duas curvas de maneira diferenciada, pois uma relaciona duas variáveis variando ao longo do tempo e a outra apresenta uma variável ao longo do tempo. Em vista disto, o programa possui dois modos de levantamento de curvas: modo X-Y e modo concatenado.

4.8.1 Modo X-Y

Quando selecionado o modo X-Y o programa levanta a curva com uma grandeza em cada um de seus eixos.

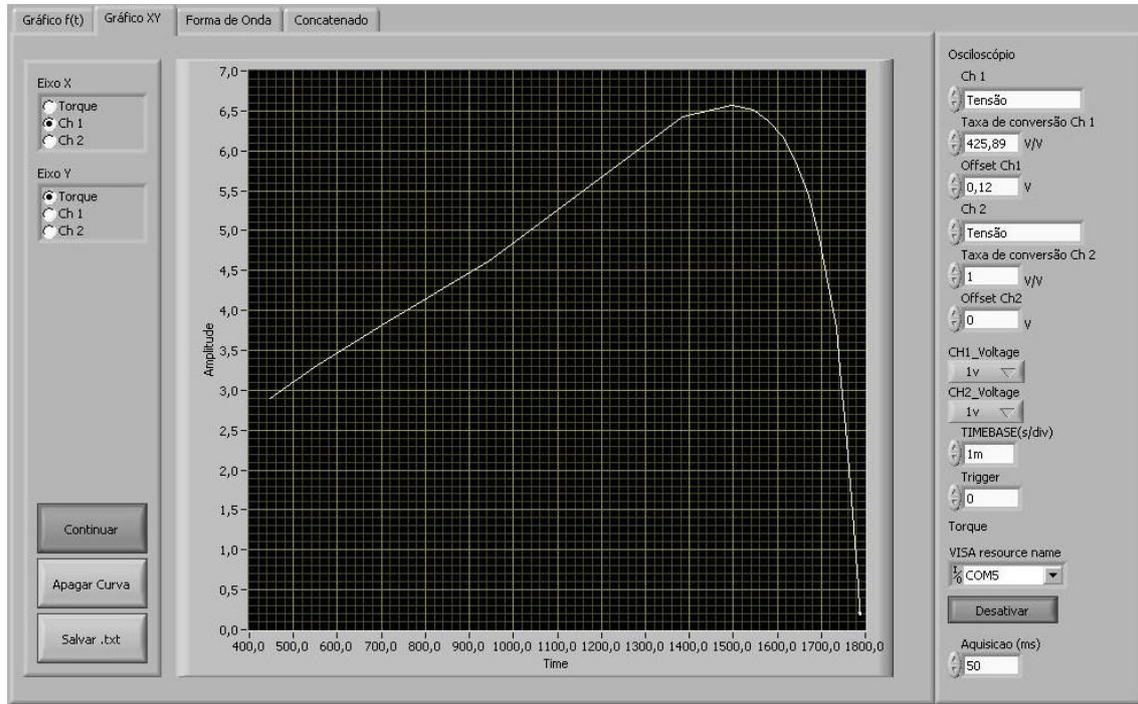


Figura 40: Interface do modo X-Y

A bancada possui dois equipamentos de comunicação entre os sensores e o computador: o display 7550 e o osciloscópio DSO-2090. Cada um possui uma frequência de transmissão de dados diferentes, por causa desta diferença, o programa define como referência a frequência de transmissão do osciloscópio por ser a menor entre as duas. Ou seja, a cada envio de dados do osciloscópio atualiza-se a curva.

Cada ponto na curva X-Y se compõe por dois valores cartesianos. O osciloscópio envia 10.000 pontos por vez ao programa e o valor RMS destes pontos que define o valor de um dos valores cartesianos. O display 7550 envia dados em uma frequência mais elevada, por isto, o programa grava os valores enviados enquanto não há a atualização da curva, assim que houver, a média destes valores armazenados define o outro valor cartesiano do ponto.

Para reduzir todos os erros de medição e cálculo, aconselha-se o uso de uma base de tempo do osciloscópio baixa, pois assim, nos momentos que houver uma grande variação de uma das duas grandezas, haverá uma menor perda de informação nos valores médios e RMS.

4.8.2 Concatenado

Este modo só tem utilidade na aquisição do osciloscópio. Quando se inicia a aquisição, este registra a forma de onda enviada pelo osciloscópio na primeira aquisição. Na aquisição seguinte os valores são adicionados logo após os dados anteriormente registrados e assim por diante.

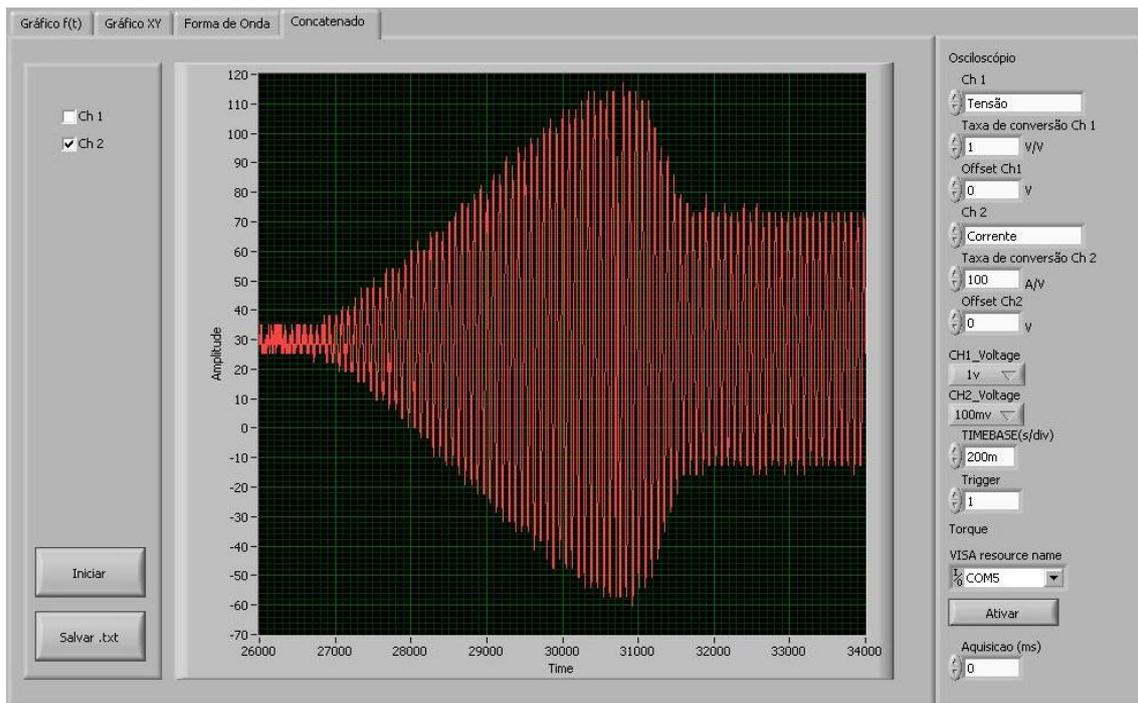


Figura 41: Interface do modo concatenado

Garante-se a fidelidade desta curva quando se utiliza uma base de tempo elevada, por que entre os pacotes enviados ao computador, pode haver a perda de pontos, o que interfere na continuidade da curva. Em uma base de tempo elevada há menos pontos por intervalo de tempo. Logo, no intervalo de tempo em que há o envio de dados, armazenam-se poucos pontos no *buffer*, de modo que este os comporte e envie no pacote seguinte. O *trigger* selecionado no canal em que se observa a curva se apresenta como outro fator necessário para a continuidade da curva, devido à sincronização da aquisição do osciloscópio com a grandeza interessada.

Nos dois modos anteriormente demonstrados, o programa permite registrar os pontos em forma de tabela num arquivo texto. Assim possibilitando futuros tratamentos de dados e para levantamento das curvas em Excel.

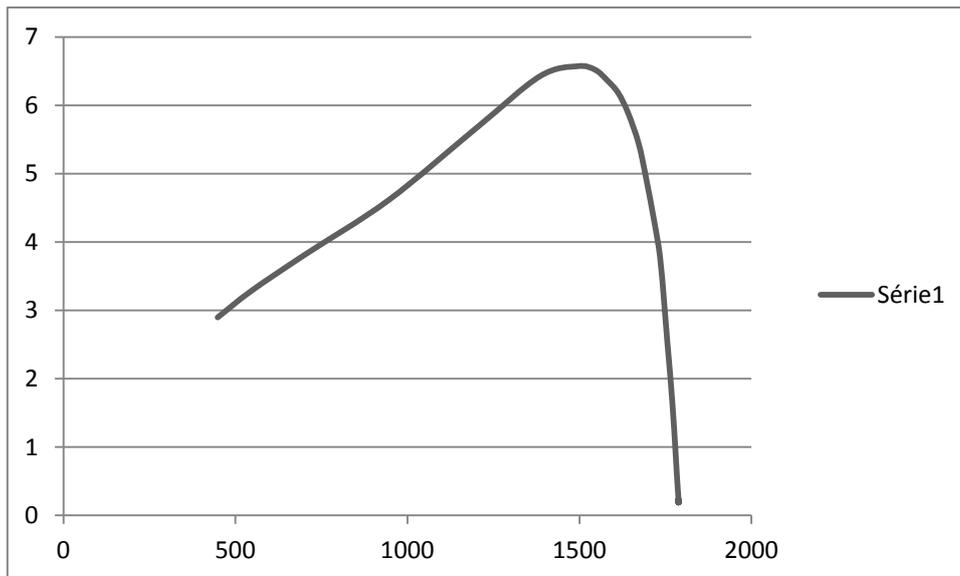


Figura 42: Curva Torque x Velocidade em Excel

4.9 Procedimento do teste

Como visto anteriormente a bancada possibilita a realização de dois testes: levantamento da curva de Corrente de Partida x Tempo e da curva Torque x Velocidade.

Para se iniciar qualquer teste, os dados de conversão das grandezas medidas devem estar preenchidos, estipulando também a base de tempo do osciloscópio e seu *trigger*.

Realiza-se o levantamento da curva de corrente de partida pelo modo concatenado do programa. Inicia-se a aquisição da curva antes de partir o motor. Ao parti-lo a curva será apresentada aproximadamente em tempo real. Quando a amplitude da corrente estiver constante interrompe-se a aquisição e se salva a curva obtida.

Para levantar a curva de torque por velocidade de um motor de indução, antes de iniciar a aquisição da curva, se parte o motor a vazio. Neste momento, tem-se um escorregamento quase nulo e assim o motor gira em velocidade próxima à velocidade síncrona. Inicia-se a aquisição da curva e aumenta-se o valor de tensão do campo do gerador de corrente contínua, que inicialmente se encontra nulo. Ao aumentar a tensão de campo do gerador, aumenta-se o ângulo de sua curva de carga, diminuindo a velocidade do conjunto, permitindo a aquisição dos diferentes pontos da curva.

Em velocidade muito reduzida, deve-se tomar cuidado com as altas correntes, porque um grande escorregamento identifica um caso de altas perdas ôhmicas rotóricas, além de uma baixa ventilação, caso ela não seja independente. O torque máximo do motor pode ser superior à nominal do gerador CC da bancada, logo não deve se manter em tais valores por muito tempo.

5. Resultados obtidos

5.1 Motor de teste

Realizaram-se os testes no motor de indução trifásico da WEG com enrolamento Dahlander. A seguir, os valores nominais do motor nas duas ligações:

Polos	8	4
Potência (kW)	0,18	0,37
Potência (hp)	0,25	0,50
Velocidade (RPM)	880	1770
I_p/I_n	6,5	6,5
Tensão (V)	220	220
Corrente (A)	2,7	2,1
Ligação	Δ	YY
Frequência (Hz)	60	60



Figura 43: Motor Dahlander

A partir dos valores de potência, velocidade e ligação, pode-se concluir que este motor Dahlander é da configuração conjugado constante, segundo a equação (17), pois ao dobrar a velocidade, dobrou-se a potência. E a partir da figura 21, as ligações do motor em teste conferem com um motor Dahlander de conjugado constante.

Por falta de motores nas três configurações não se tornou possível o levantamento das curvas características e nem a análise das configurações de potência constante e conjugado variável. No entanto, como exposto anteriormente, o motor Dahlander de conjugado constante é o mais encontrado na indústria.

5.2 Curvas características do motor

A partir dos testes realizados obtiveram-se os seguintes resultados:

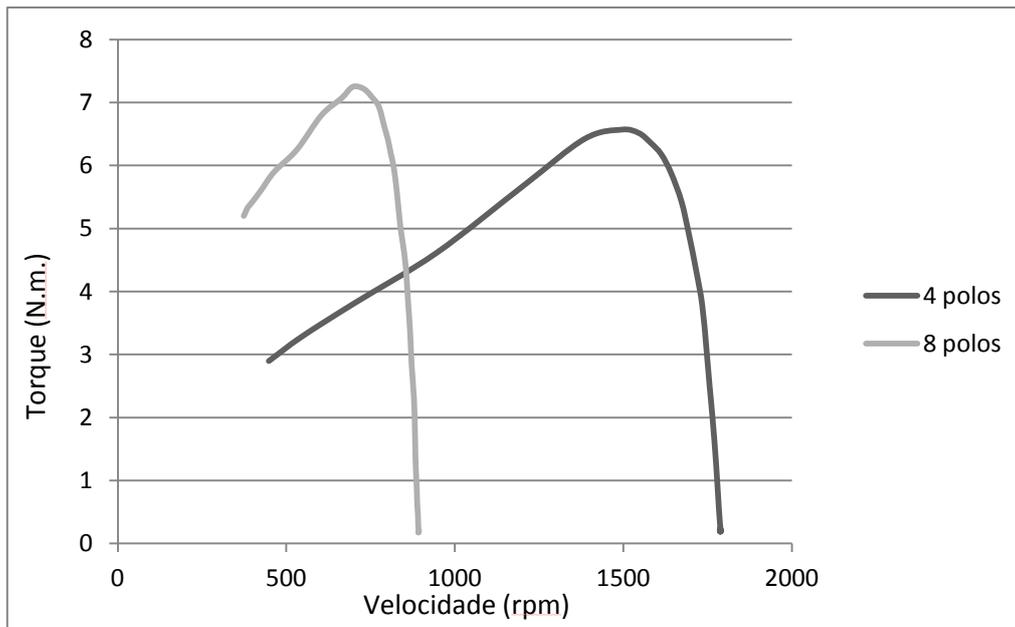


Figura 44: Curva Torque x Velocidade nas duas velocidades síncronas

Estas curvam reafirmam que este motor se classifica como um motor de conjugado constante, visto que se tem um torque máximo em baixa rotação ligeiramente superior ao torque máximo de alta rotação.

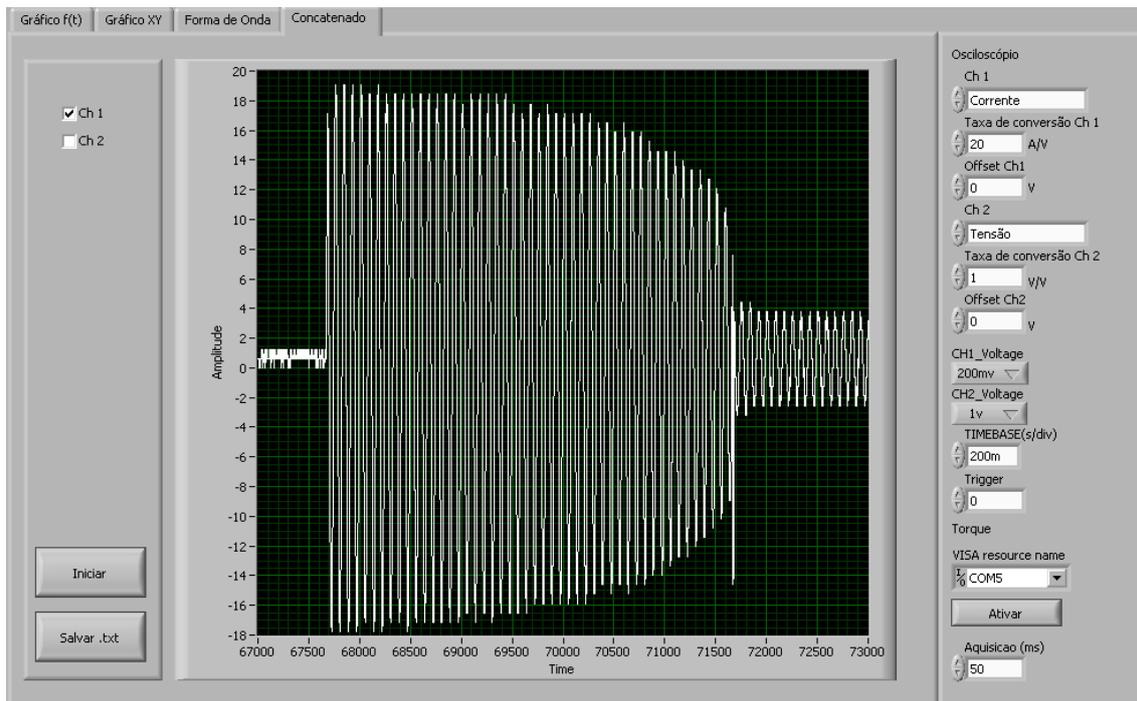


Figura 45: Corrente de partida na ligação de 4 polos

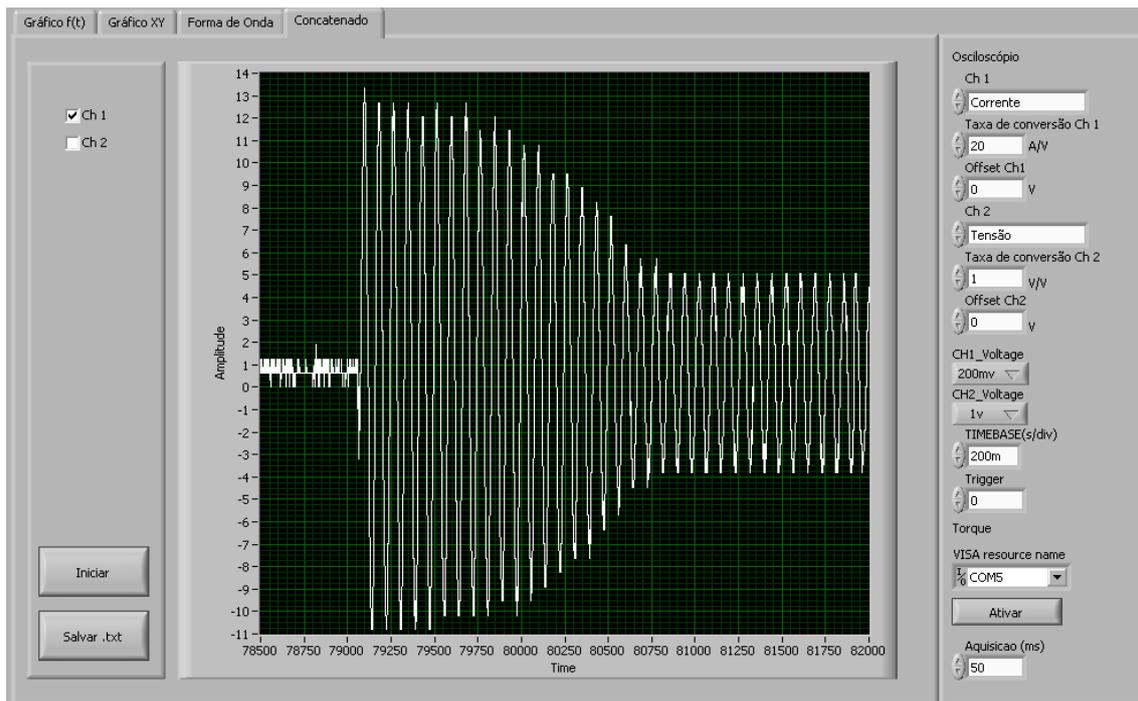


Figura 46: Corrente de partida na ligação de 8 polos

Observa-se que a corrente de partida na ligação de 8 polos possui um valor máximo, aproximadamente 13 A, menor que na partida na ligação de 4 polos, quase 20 A, o que justifica o uso deste motor na indústria. Por que em uma partida de baixa rotação tem-se uma corrente reduzida sem a perda de torque.

5.3 Ensaio e levantamento do modelo

Realizaram-se os 3 ensaios com os procedimentos anteriormente explicados nas duas configurações para analisar a diferença dos modelos e como elas agem sobre a curva de Torque x Velocidade.

Obtiveram-se os resultados a seguir nos três ensaios:

5.3.1 Ensaio de corrente contínua

Ligação Δ -série (Δ)

Tensão (V)	Corrente (A)
8,78	0,50
17,94	1,00
26,50	1,50

$$R_{1\Delta} = 8,86\Omega$$

Ligação Y-paralelo (YY)

Tensão (V)	Corrente (A)
6,87	0,50
12,27	1,00
20,00	1,50

$$R_{1YY} = 6,56\Omega$$

5.3.2 Ensaio a vazio

Ligação Δ -série (Δ)

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
218,24	2,98	342,0

$$\begin{aligned} X_{1\Delta} + X_{m\Delta} &= 42,28\Omega \\ P_{OS\Delta} &= 236,07 W \\ P_{hf\Delta} + P_{AV\Delta} &= 105,93 W \end{aligned}$$

Ligação Y-paralelo (YY)

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
219,45	2,01	245,0

$$\begin{aligned} X_{1YY} + X_{mYY} &= 63,03\Omega \\ P_{OSY} &= 79,48 W \\ P_{hfYY} + P_{avYY} &= 165,52 W \end{aligned}$$

5.3.3 Ensaio de Rotor Bloqueado

Ligação Δ -série (Δ)

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Frequência (Hz)
55,0	2,70	249,0	15,0

$$\begin{aligned} Z_{eq\Delta} &= 8,70\Omega \\ \cos\theta_{\Delta} &= 0,96 \\ R_{eq\Delta} &= 8,38\Omega \\ X_{eq\Delta} &= 2,32\Omega \\ R_{2\Delta} &= 1,82\Omega \\ X_{1\Delta} &= 3,36\Omega \\ X_{m\Delta} &= 58,97\Omega \end{aligned}$$

Ligação Y-paralelo (YY)

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Frequência (Hz)
32,0	2,13	113,5	20,8

$$\begin{aligned} Z_{eqYY} &= 11,76\Omega \\ \cos\theta_{YY} &= 0,97 \\ R_{eqYY} &= 11,39\Omega \\ X_{eqYY} &= 2,95\Omega \\ R_{2YY} &= 2,52\Omega \\ X_{1YY} &= 5,90\Omega \\ X_{mYY} &= 36,05\Omega \end{aligned}$$

Devido às ligações feitas, espera-se $R_{1\Delta} \cong \frac{4}{3}R_{1YY}$, como se obteve no resultado final do ensaio de corrente contínua. Os valores dos outros parâmetros calculados, não apresentam uma justificativa clara a uma primeira vista.

Não se adquiriram resultados esperados nos dois ensaios a vazio. Na ligação Y-paralelo a corrente medida se aproxima muito da corrente nominal desta ligação. Na ligação Δ -série, valores medidos diferiram muito de valores aceitáveis, pois tanto a corrente quanto a potência ativa ultrapassaram valores nominais. Problemas mecânicos de rolamentos deformados podem justificar tais valores, aplicando um torque resistivo elevado à máquina, sendo este mais significativo em baixa rotação.

Mediu-se a potência trifásica dos ensaios a vazio e rotor bloqueado pelo analisador de potência 305 A da Infratek, diferentemente dos esquemas apresentados no capítulo 1.

Para a redução da frequência, na realização do ensaio de rotor bloqueado, utilizou-se um conjunto motor de corrente contínua e gerador síncrono do laboratório. Controla-se a

velocidade de rotação do motor pela tensão contínua de alimentação, que, por sua vez, age diretamente sobre a frequência da tensão gerada.

Identificou-se este motor Dahlander como um motor de indução classe A para os cálculos de indutância de rotor e estator, sendo estas iguais entre si. Baseia-se esta identificação na comparação das curvas de Torque x Velocidade levantadas com as curvas de cada classe (CHAPMAN – 2004).

5.4 Análise dos resultados

Através da equação (20), obtiveram-se as curvas de Torque x Velocidade a seguir:

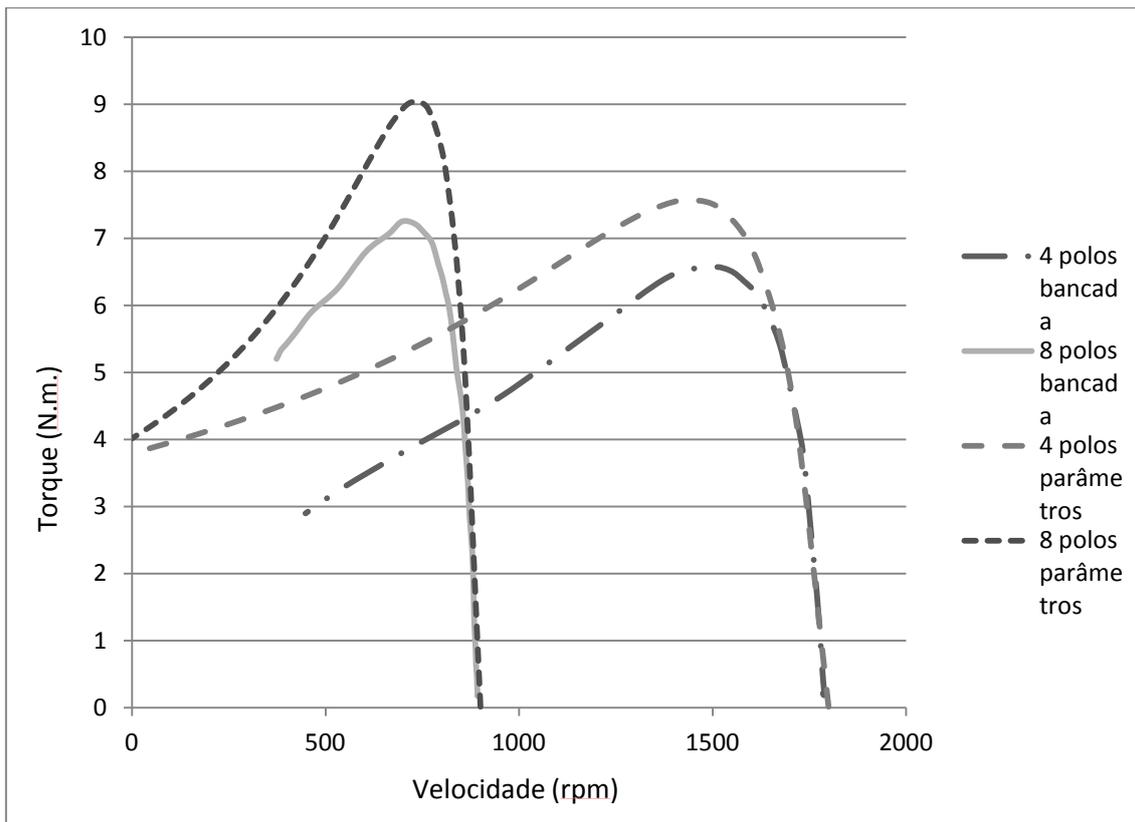


Figura 47: Curvas Torque x Velocidade obtidos a partir dos parâmetros da máquina e da bancada

As curvas obtidas na prática, a partir da bancada de testes desenvolvida, e a simulada, a partir dos parâmetros do motor, não conferem quantitativamente. Por outro lado, qualitativamente as curvas se validam, considerando escorregamento de torque máximo e proporção do torque máximo entre as duas ligações.

Duas razões foram levantadas para justificar a diferença encontrada entre a curva obtida diretamente pela bancada e a curva calculada através da equação (20) de torque induzido.

Primeiramente, a equação (20) desconsidera as perdas mecânicas do motor. Porém, mediram-se valores elevados para tais perdas nos ensaios a vazio, o que justificaria um torque induzido mais elevado que o entregue ao eixo, onde se encontra o medidor de torque.

A segunda justificativa se baseia nas diversas aproximações que justificam um cálculo impreciso dos parâmetros, que em motores de baixa potência tais aproximações não são sempre aplicáveis. Assim, buscou-se modificar o valor de alguns parâmetros para alcançar curvas teóricas que validassem as curvas práticas. Deste modo obtiveram-se as curvas a seguir:

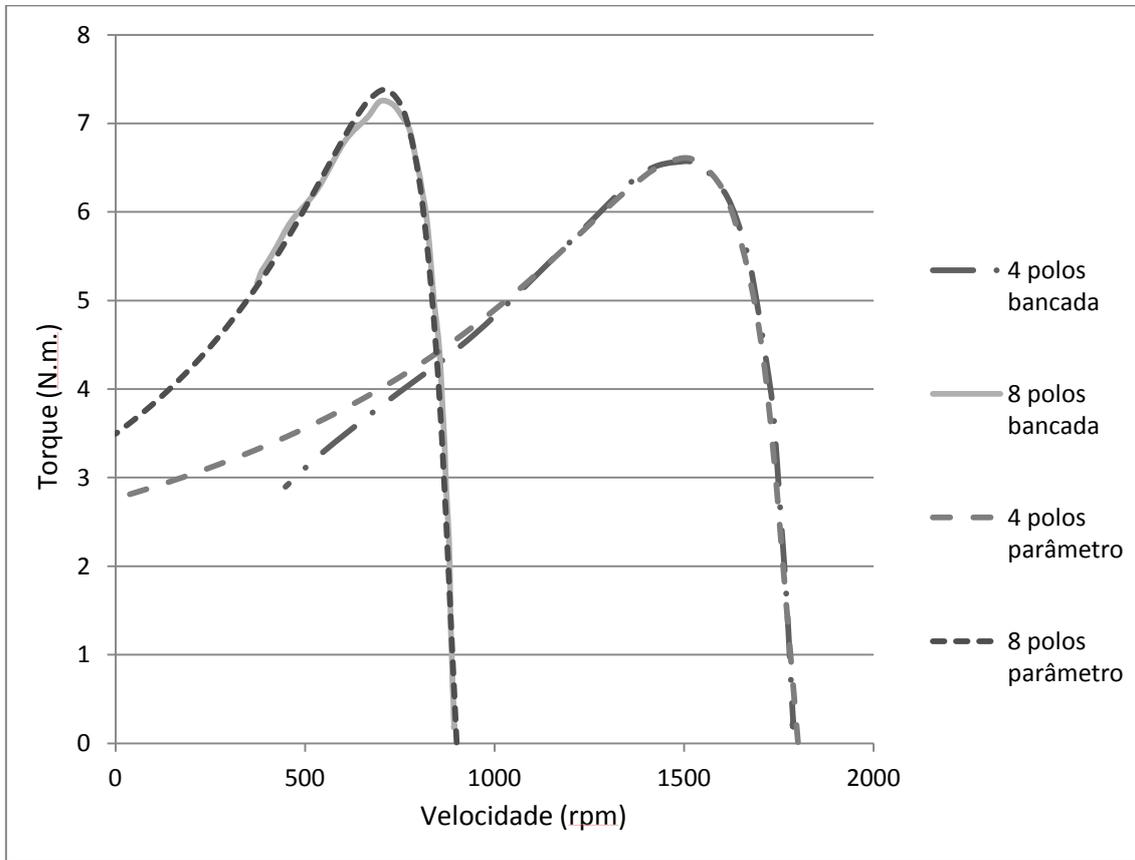


Figura 48: Curvas de Torque x Velocidade obtidos a partir dos parâmetros modificados e da bancada

As curvas alcançadas resultaram de modificações em 3 parâmetros: $R_{2\Delta}$, $X_{1\Delta}$ e X_{1YY} . Seus valores após as modificações e o erro de cálculo se encontram a seguir:

$R_{2\Delta} = 3,50\Omega$	<i>erro</i> = 38,6%
$X_{1\Delta} = 8,00\Omega$	<i>erro</i> = 35,7%
$X_{1YY} = 4,60\Omega$	<i>erro</i> = 37,1%

Consideram-se os erros percentuais calculados como significativos, pois todos se encontram acima de 35%. Por outro lado, verificaram-se quais os valores que se esperava medir ao longo dos ensaios para obter os parâmetros modificados. Desta análise, tem-se os valores a seguir:

Ensaio de corrente contínua

Ligação Δ -série (Δ)

Tensão (V)	Corrente (A)
8,86	0,50
17,72	1,00
26,58	1,50

Ligação Y-paralelo (YY)

Tensão (V)	Corrente (A)
6,94	0,50
13,88	1,00
20,81	1,50

Ensaio a vazio

Ligação Δ -série (Δ)

Tensão (V)	Corrente (A)
228,95	3,00

Ligação Y-paralelo (YY)

Tensão (V)	Corrente (A)
219,17	2,00

Ensaio de Rotor Bloqueado

Ligação Δ -série (Δ)

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Frequência (Hz)
60,8	2,70	250,6	15,0

Ligação Y-paralelo (YY)

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Frequência (Hz)
32,8	2,10	115,9	15,0

Para todos os ensaios acima os valores de corrente foram definidos segundo os valores encontrados nos ensaios práticos, assim como a frequência no ensaio de rotor bloqueado.

Comparando os valores calculados com os medidos, os valores de tensão na ligação Δ -série tanto no ensaio a vazio quanto no ensaio de rotor bloqueado apresentam as maiores discrepâncias, com erros de, respectivamente, 5% e 10%. Valores que se encontram em uma faixa considerável para a validação da bancada. Tais erros podem ser gerados por diferentes meios, como por exemplo, as aproximações do modelo.

Conclui-se uma sensibilidade elevada dos parâmetros calculados, principalmente as indutâncias do modelo, em relação às grandezas mensuradas durante os ensaios, o que dificulta uma maior precisão dos mesmos.

Logo, certificam-se as curvas obtidas na bancada a partir de uma validação através do modelo de máquinas de indução e a equação do torque induzido, estabelecida pelo fluxo de potência do motor.

6. Conclusão

Alcançou-se o objetivo de levantar as curvas características Torque x Velocidade e Corrente de Partida x Tempo de um motor Dahlander nas suas ligações de alta e baixa velocidade. As curvas se apresentaram da forma esperada para o motor em teste, do tipo torque constante. Os resultados foram ainda validados a partir do modelo do motor de indução com parâmetros determinados através de ensaios clássicos de identificação de parâmetros.

As curvas permitiram uma análise do seu funcionamento, o que incluiu a identificação da configuração do motor Dahlander em conjugado constante e a verificação da corrente de partida, que se mostrou reduzida quando o motor parte na ligação de menor rotação.

A validação quantitativa dos resultados adquiridos poderá ser melhorada após uma avaliação aprofundada das duas suposições levantadas para os erros constatados: imprecisão no cálculo dos parâmetros do motor e influência de atrito mecânico. Para a segunda hipótese um quarto teste pode ser feito em que se força uma velocidade síncrona no rotor, verificando um escorregamento nulo ou então realizar os testes com um motor em que seja sabido que este se encontra em condições normais de operação, pois nos dois motores Dahlander disponíveis se teve os mesmos problemas de operação.

A bancada validada se torna um instrumento de ensaios de motores elétricos para o laboratório. Curvas características de motores e a aquisição de dados para estudos e trabalhos com diferentes motores elétricos podem ser obtidas.

Sugere-se, como trabalho futuro, o levantamento das curvas características do motor Dahlander nas outras duas configurações: potência constante e conjugado variado. Outro possível trabalho seria uma análise de torque transiente, onde seria importante verificar se os equipamentos possuem uma frequência de aquisição suficientemente alta para esta análise.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CHAPMAN, S. J. "Electric Machinery Fundamentals" 4ª edição. Rio de Janeiro: McGraw Hill do Ensino Superior, 2004.
- [2] FERREIRA, M. S. "Experiências de Laboratório com Motores de Indução". Projeto de Graduação: UFRJ, 2011.
- [3] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S.D. "Máquinas Elétricas". 6ª edição. São Paulo: Bookman, 2006.
- [4] MORAES, T.J.S. "Dados técnicos da bancada de teste". Trabalho interno. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.
- [5] MUÑOZ, N. T. "Cálculo de Enrolamentos de Máquinas Elétricas e Sistemas de Alarme". 4ª edição. Rio de Janeiro: Biblioteca Técnica Freitas Bastos, 1987.
- [6] STEPHAN, R.M. "Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas". 1ª edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2012.
- [7] TELLES, E. C. "Análise da Operação de um Motor de Indução com Enrolamento Dahlander". Projeto de Graduação: UFRJ, 2010.

ANEXOS

ANEXO I: E-mail da WEG

DATA: 01 de Junho de 2012

Prezado Tiago, boa tarde!

O motor Dahlander que vendemos como padrão é o tipo Conjugado Constante. Contudo, se o cliente solicitar, podemos fabricar os outros dois tipos (Potência Constante, Conjugado Variável).

Normalmente esses motores são adquiridos para as seguintes aplicações: elevadores, pontes rolantes, talhas, ventiladores.

Informações quanto aos tipos de motores Dahlander e suas aplicações podem ser obtidas no Guia de Especificação de Motores WEG.

Link: <http://www.weg.net/files/products/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>

A característica principal do motor Dahlander é a variação de velocidade. Como também é possível variar a velocidade dos motores através de um acionamento por Inversores de frequência, muitas das aplicações citadas essa concepção é utilizada.

Neste mesmo guia você pode encontrar informações sobre motores acionados por inversores de frequência.

Sem mais para o momento, ficamos à disposição para mais esclarecimentos.

Atenciosamente,
Eduardo Botelho Barcellos
Assistência Técnica
Fone: (47) 3276-4085 Fax: (47) 3276-4180
WEG Equipamentos Elétricos S.A. - Motores
www.weg.net