

Transformação de um Motor de Indução Trifásico em um Motor Dahlander para Ensino e Pesquisa

Igor M. dos Santos*, Rodrigo B. Tavares* e Adilson M. Tavares**.

* Vinculado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (igor.santos@ufrgs.br, borges.tavares@ufrgs.br).

** Grupo de Pesquisa em Sistemas de Energia, Instituto Federal Sul-rio-grandense, Pelotas, RS, Brasil (adilson@pelotas.ifsul.edu.br).

Abstract: This work presents the transformation of a conventional three-phase induction motor into a Dahlander motor. The winding is designed so that each phase has four accessible terminals, so that it is possible for the user to make winding connections that allow the motor to run on the three possible operation modes: constant torque, variable torque and constant power. Direct current test, no load test and blocked rotor test are performed, so that it is possible to determine the motor parameters in each of the operating modes. Based on the obtained parameters, the curves of torque and current density versus speed are obtained and these are compared with the results found in the existing bibliography.

Resumo: Este trabalho apresenta a transformação de um motor de indução trifásico convencional em um motor do tipo Dahlander. O enrolamento é desenvolvido para que cada fase tenha quatro terminais acessíveis, de modo que seja possível ao usuário realizar ligações que permitam o motor funcionar em três modos de operação: conjugado constante, conjugado variável e potência constante. São realizados testes de corrente contínua, a vazio e de rotor bloqueado para a determinação dos parâmetros do motor em cada uma das ligações. Com base nos parâmetros obtidos são traçadas as curvas de conjugado e densidade de corrente versus velocidade, e essas são comparadas com os resultados encontrados na bibliografia existente.

Keywords: Three-phase induction motor; polar switching machines; Dahlander motor; winding design; operating characteristic curves.

Palavras-chaves: Motor de indução trifásico; motor de comutação polar; projeto de enrolamento; motor Dahlander; curvas características de operação.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos são os tipos de motores mais utilizados na indústria, devido a sua robustez e ao custo relativamente baixo de produção e manutenção. Os motores de indução que apresentam a possibilidade de desenvolver duas ou mais velocidades, mediante alteração do número de polos, são chamados de motores de comutação polar. Existem dois tipos de motores de comutação polar, os motores de enrolamentos independentes e os motores Dahlander (Moraes, 2012).

Os motores de enrolamentos independentes, na forma mais simples, são compostos por dois enrolamentos dispostos no estator. Um enrolamento está completamente isolado do outro, tem seu próprio número de polos e desenvolve uma característica conjugado-velocidade própria (Toliat e Kliman, 2018).

Os motores Dahlander possuem enrolamento único no estator, e a comutação polar, sempre na relação 2:1, é realizada por alteração das ligações desse enrolamento. Há três tipos de motores Dahlander disponíveis comercialmente

(Giacomazzi, 2007): (a) de conjugado constante (CC), (b) de conjugado variável (CV) e (c) de potência constante (PC). Esses motores possuem seis terminais acessíveis, permitindo ligações para a obtenção de duas velocidades. Porém, os motores Dahlander também podem operar em mais do que duas velocidades. Existem estudos onde a alimentação é feita com frequência variável, de modo a se obter uma larga faixa de controle de velocidade em veículos elétricos (Rohit *et al.*, 2018; Van der Giet *et al.*, 2007).

A motivação deste trabalho é dada pela indisponibilidade de um motor que seja capaz de trabalhar nos três modos de operação citados no parágrafo anterior, tanto no mercado, quanto nas instituições de ensino e pesquisa. Portanto, apresenta-se nas seções seguintes: (i) o processo de cálculo para a transformação do motor de indução trifásico convencional em um motor Dahlander para fins de ensino e pesquisa; (ii) os tipos de ligações possíveis; (iii) os ensaios para determinação de parâmetros do circuito equivalente; (iv) as curvas características de operação obtidas.

O motor didático desenvolvido é de baixo custo e auxilia o estudante, ou o profissional de controle e automação, no

entendimento das configurações do enrolamento trifásico e como elas influenciam na velocidade e no conjugado desenvolvidos. Isso é importante para que o sistema de acionamento seja desenvolvido de forma correta.

2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Os motores Dahlander são constituídos preferencialmente por rotores de gaiola de esquilo, pois esses adaptam-se ao mesmo número de polos do estator. Se um motor de comutação polar fosse constituído por um rotor bobinado, o rotor deveria ter um enrolamento semelhante ao do estator e com muitos anéis e escovas, o que resultaria em uma máquina muito grande e cara.

O estator possui três enrolamentos idênticos para as fases A, B e C, porém deslocados espacialmente de 120 graus elétricos. As Figuras 1 e 2 mostram uma representação planificada apenas para a fase A, de forma simplificada, considerando que cada grupo tem apenas uma bobina. Essas figuras permitem uma boa visualização da formação dos polos. Nas duas figuras, a corrente na primeira metade da fase circula de A1 para A2. Na Figura 1, a corrente na segunda metade circula de A3 para A4 e são formados 8 polos. Na Figura 2, a corrente na segunda metade circula de A4 para A3 e são formados 4 polos. Portanto, a inversão de corrente em uma das metades, em relação à outra, produz mudança do número de polos na relação de 2:1.

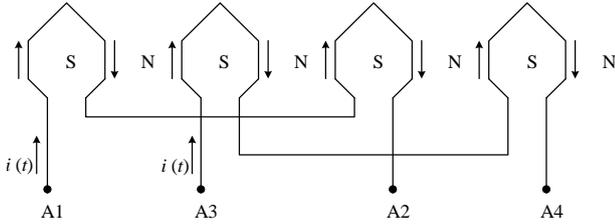


Figura 1. Ligação para a formação de 8 polos.

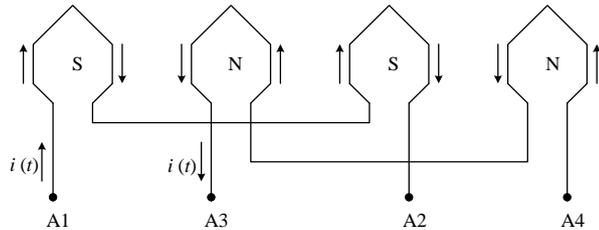


Figura 2. Ligação para a formação de 4 polos.

As duas metades da fase A podem ser ligadas em série ou em paralelo, obedecendo a mesma lógica de circulação de correntes apresentada nas Figuras 1 e 2. Além disso, a ligação para as três fases pode ser estrela ou triângulo. Portanto, tem-se diversas configurações possíveis e, por consequência, diferentes características conjugado-velocidade.

De acordo com Mora (2003), o conjugado (C) de uma máquina de indução pode ser expresso por

$$C = K_1 \Phi_R I_2 \cos \theta_2 \quad (1)$$

onde I_2 é a corrente de fase do rotor, K_1 é uma constante de proporcionalidade, Φ_R é o fluxo total do campo magnético girante e $\cos \theta_2$ é o fator de potência do rotor.

Em regime permanente, devido à frequência no rotor ser baixa, a reatância de dispersão torna-se baixa, de modo que o fator de potência pode ser considerado unitário. Além disso, é conveniente expressar o fluxo resultante em função do número de polos (p) e do fluxo por polo (Φ_p), de forma que o conjugado é dado por:

$$C = K_1 p \Phi_p I_2 \quad (2)$$

A tensão induzida por fase é aproximadamente igual à tensão terminal de fase (V_1), de modo que é possível estabelecer que:

$$\Phi_p = \frac{V_1}{4,44 N f K_w} \quad (3)$$

onde K_w é o fator de enrolamento do estator, N é o número de espiras em série por fase e f é a frequência de alimentação. A tensão de fase varia com o tipo de ligação trifásica, estrela ou triângulo, e o número de espiras depende de a ligação ser em série ou em paralelo. O fator de enrolamento é determinado pelo fator de distribuição (K_d) e pelo fator de passo (K_p), da seguinte forma (Sen, 2013):

$$K_w = K_d K_p \quad (4)$$

De acordo com (2), pode-se estabelecer a seguinte relação entre conjugado de baixa rotação (C_B) e o conjugado de alta rotação (C_A):

$$\frac{C_B}{C_A} = \frac{K_1 p_B \Phi_{pB} I_{2B}}{K_1 p_A \Phi_{pA} I_{2A}} \quad (5)$$

onde p_B é o número de polos na baixa rotação, p_A é o número de polos na alta rotação, Φ_{pB} é o fluxo por polo na baixa rotação, Φ_{pA} é o fluxo por polo na alta rotação, I_{2B} é a corrente que circula no rotor na baixa rotação e I_{2A} é a corrente que circula no rotor na alta rotação.

Tendo-se o equacionamento básico, desenvolvido para a harmônica espacial fundamental de densidade de fluxo no entreferro, é possível analisar de forma simplificada os três modos de operação usuais.

2.1 Motor Dahlander de Conjugado Constante

O motor Dahlander de conjugado constante tem sua maior utilidade para acionar cargas de conjugado resistente constante, como esteiras transportadoras, guindastes, peneiras, talhas e pontes rolantes. Para obter tal funcionamento é necessário que as ligações das Figuras 3(a) (triângulo-série, baixa rotação) e 3(b) (estrela-paralelo, alta rotação) sejam realizadas. Os terminais do motor são representados por A1 a A4, B1 a B4 e C1 a C4, sendo R, S e T as três fases da rede de alimentação. As linhas contínuas apresentam os enrolamentos internos e as linhas tracejadas, as ligações externas.

Na ligação de baixa rotação (triângulo-série), a tensão de fase é igual à tensão de linha V_L . Já na ligação de alta rotação (estrela-paralelo), a tensão de fase é $V_L/\sqrt{3}$. O número de espiras em alta rotação (N_A) é a metade do número de espiras em baixa rotação (N_B). O fator de passo K_{pA} para alta rotação é aproximadamente 0,707. Isso é válido para a configuração da Figura 2, onde o passo de bobina fica igual à metade do passo polar. Para o esquema de baixa rotação da Figura 1 o fator de passo (K_{pB}) é

unitário, pois o enrolamento fica com passo pleno. O fator de distribuição (K_d) para máquinas de indução trifásicas tem seu valor médio de 0,96, e para motores Dahlander tem-se que $p_B = 2p_A$. Desse modo, de (3) e (5), obtém-se (Giacomazzi, 2007):

$$\frac{C_B}{C_A} = 1,22 \quad (6)$$

Resulta-se que o conjugado em baixa rotação é 1,22 vezes maior que o conjugado em alta rotação. Como essa relação é quase unitária, e resulta de simplificações, denomina-se esse tipo de ligação como sendo de conjugado constante.

2.2 Motor Dahlander de Conjugado Variável

O motor Dahlander de conjugado variável, que possui um aumento de conjugado com o aumento da velocidade, é utilizado para acionar cargas de conjugado resistente crescente com a velocidade, como bombas centrífugas e ventiladores. Para obter tal funcionamento, é necessário que as ligações das Figuras 3(c) (estrela-série, baixa rotação) e 3(d) (estrela-paralelo, alta rotação) sejam realizadas.

Na ligação de baixa rotação (estrela-série) e na ligação de alta rotação (estrela-paralelo) a tensão de fase é $V_L/\sqrt{3}$. O número de espiras em alta rotação é a metade do número de espiras em baixa rotação. Assim, de (3) e (5), obtém-se (Giacomazzi, 2007):

$$\frac{C_B}{C_A} = 0,707 \quad (7)$$

2.3 Motor Dahlander de Potência Constante

O motor Dahlander de potência constante é adequado para o acionamento de cargas de conjugado resistente alto na sua menor velocidade e conjugado resistente baixo na sua maior velocidade, sendo utilizado em máquinas de usinagem mecânica. Para obter tal funcionamento, é necessário que as ligações das Figuras 3(e) (estrela-paralelo, baixa rotação) e 3(f) (triângulo-série, alta rotação) sejam realizadas.

Na ligação de baixa rotação (estrela-paralelo), a tensão de fase é $V_L/\sqrt{3}$. Já na ligação de alta rotação (triângulo-série), a tensão de fase é V_L . O número de espiras em baixa rotação é a metade do número de espiras em alta rotação. Utilizando novamente (3) e (5) tem-se a seguinte relação entre os conjugados (Giacomazzi, 2007):

$$\frac{C_B}{C_A} = 1,63 \quad (8)$$

A multiplicação do conjugado pela velocidade angular do rotor resulta na potência mecânica desenvolvida (Sen, 2013). Considerando que a velocidade maior é o dobro da menor, tem-se a seguinte relação de potências:

$$\frac{P_B}{P_A} = 0,815 \quad (9)$$

Considera-se essa relação como unitária, devido às simplificações, e denomina-se esse tipo de ligação como sendo de potência constante.

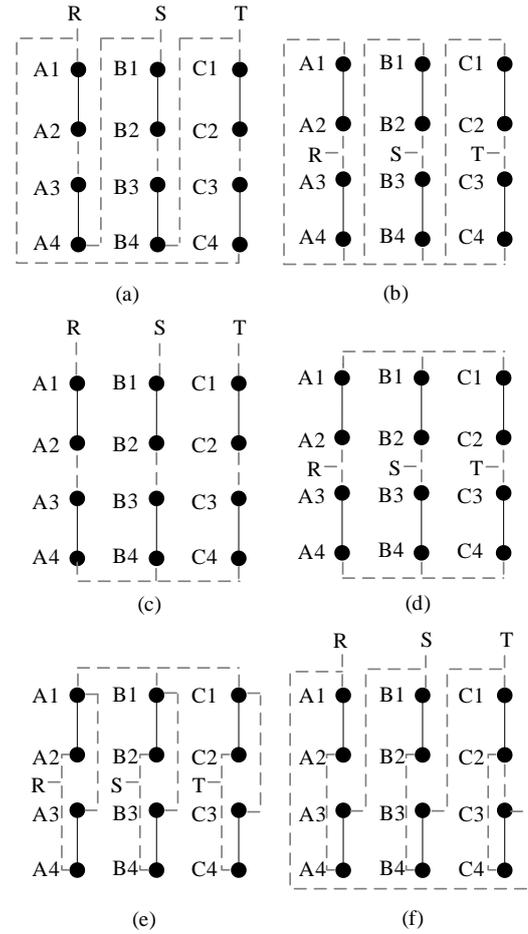


Figura 3. (a) triângulo-série, conjugado constante, baixa rotação; (b) estrela-paralelo, conjugado constante, alta rotação; (c) estrela-série, conjugado variável, baixa rotação; (d) estrela-paralelo, conjugado variável, alta rotação; (e) estrela-paralelo, potência constante, baixa rotação; (f) triângulo-série, potência constante, alta rotação.

3. PROCESSO DE REDIMENSIONAMENTO DO ENROLAMENTO

Apresenta-se nesta seção o procedimento de transformação de um motor de indução trifásico convencional em um motor com enrolamento Dahlander para fins de ensino e pesquisa. As características originais do motor utilizado são as seguintes: 1,5 cv, 220/380 V, 5,0/2,89 A e 1690 rpm.

Para o projeto de um enrolamento do tipo Dahlander, deve-se tomar as seguintes premissas: enrolamento imbricado, camada dupla e de polos consequentes (Telles, 2010).

A comutação escolhida é de 4 para 8 polos. Originalmente o motor era de 4 polos e, portanto, possuía velocidade síncrona de 1800 rpm. Essa velocidade foi mantida. De modo a não operar o motor acima da sua velocidade nominal original, escolheu-se 900 rpm para a outra velocidade síncrona. Para seqüência do projeto de rebobinagem de um motor se faz necessário conhecer algumas características do núcleo magnético do estator que estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões do núcleo do estator.

Diâmetro interno do estator (D)	82,0 mm
Comprimento axial do estator (L)	85,5 mm
Largura inferior da ranhura (L_i)	4,0 mm
Largura superior da ranhura (L_s)	5,0 mm
Altura da ranhura (h)	10,00 mm
Número de ranhuras (S)	36

A seguir são apresentadas as equações de dimensionamento utilizadas, de acordo com Pyrhonen *et al.* (2013). Elas são aplicadas para os casos de alta rotação e de baixa rotação, ou seja, de 4 e 8 polos, respectivamente.

O passo polar (τ_p) para um determinado número de polos (p) é dado por:

$$\tau_p = \frac{S}{p} \quad (10)$$

O número de ranhuras por polo e fase (n) e o passo de ranhura (α) são expressos por (11) e (12), respectivamente:

$$n = \frac{S}{3p} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{p}{2} \frac{360^\circ}{S} \quad (12)$$

Como o passo polar é bem diferente nas duas velocidades, uma atenção especial deve ser dada ao passo de bobina (τ_c), pois ele não se altera com o tipo de ligação. O passo de bobina na baixa rotação é aproximadamente igual ao passo polar, e na alta rotação o passo de bobina é menor do que o passo polar. Considerando também que o enrolamento é distribuído, o fator de passo e o fator de distribuição devem ser calculados por (13) e (14), respectivamente:

$$K_p = \text{sen} \left(90^\circ \frac{\tau_c}{\tau_p} \right) \quad (13)$$

$$K_d = \frac{\text{sen}(n\alpha/2)}{n \text{sen}(\alpha/2)} \quad (14)$$

O fluxo por polo é função da densidade de fluxo estimada e da área de cada polo, sendo essa área calculada de acordo com (15).

$$A = \frac{\pi DL}{p} \quad (15)$$

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com as equações (10) a (15). O passo de bobina foi escolhido como 5 ranhuras, ficando levemente superior ao passo polar na baixa rotação. Isso traz o benefício de não reduzir excessivamente o fator de passo na alta rotação.

Tabela 2. Parâmetros do enrolamentos.

Parâmetros	Baixa rotação	Alta rotação
Passo polar (ranhuras)	4,5	9
Passo de bobina (ranhuras)	5	5
Passo de ranhura ($^\circ E$)	40	20
Área de cada polo (mm^2)	2753	5506
Número de ranhuras por polo e fase (ranhuras)	1,5	3
Fator de passo	0,9848	0,766
Fator de distribuição	0,9746	0,9598
Fator de enrolamento	0,9597	0,7353

O número de espiras em série por fase (N) é calculado com base em (3). Sabendo-se que o enrolamento é de

camada dupla, ou seja, que o número total de bobinas é igual ao número de ranhuras, é possível calcular o número de bobinas em série por fase. Assim, obtém-se o número de espiras por bobina (N_{bob}) para cada modo de operação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3, considerando 220 V de tensão de linha e densidade de fluxo de 0,29 T.

Tabela 3. Número de espiras por bobina ideal para cada ligação.

Modos de operação	Rotação	N_{bob}
Conjugado Constante	Baixa	90
	Alta	68
Conjugado Variável	Baixa	52
	Alta	68
Potência Constante	Baixa	104
	Alta	59

O número de espiras necessário por bobina varia na faixa entre 52 e 104. Portanto, não há um número de espiras que propicie um excelente desempenho em todas as ligações possíveis. Porém, isso não é de fundamental importância para os objetivos buscados no trabalho. Optou-se por utilizar o número de espiras médio de todas as ligações, resultando em 74 espiras por bobina. As escolhas para o número de espiras por bobina e para a densidade de fluxo buscam impedir que a corrente de magnetização e as perdas no núcleo sejam excessivamente altas. Porém, por outro lado, reduzem o conjugado máximo da máquina (Upadhyay, 2011). Contudo, deve-se ressaltar que o motor pode ser alimentado por um auto-transformador variável em experimentos de laboratório, de modo que seja possível estudá-lo em diferentes níveis de densidade de fluxo.

Para a escolha da seção dos condutores deve-se levar em consideração que o enrolamento é de camada dupla e que, consequentemente, cada ranhura tem 148 condutores. A área da ranhura deve ser suficiente para acomodar a área de cobre e de isolamento. Com base nas dimensões da ranhura, apresentadas na Tabela 1, é possível estimar a sua área, aproximando-a pela área de um trapézio. Desse modo, a área da ranhura A_R pode ser obtida com base em (16).

$$A_R = \frac{(L_s + L_i)h}{2} \quad (16)$$

Escolhendo um condutor de 27 AWG, que possui 0,1 mm^2 de seção transversal, obtém-se um fator de enchimento da ranhura (relação entre a área de cobre e a área total) de 0,3288, que está de acordo com que é adotado em projetos de máquinas de indução com enrolamento de fio circular (WEG, 2005).

O diagrama do enrolamento, considerando todas as premissas e cálculos realizados previamente, está apresentado na Figura 4. O passo de fase foi calculado por divisão do número de ranhuras por três, o que resulta em 12 ranhuras. Ou seja, o passo de fase é de 120 graus geométricos. O passo de fase expresso em graus elétricos varia com o número de polos, que é determinado pela ligação do enrolamento, sendo sempre um múltiplo de 120 graus elétricos. Isso afeta o sentido de rotação do motor para uma dada sequência de fases de alimentação.

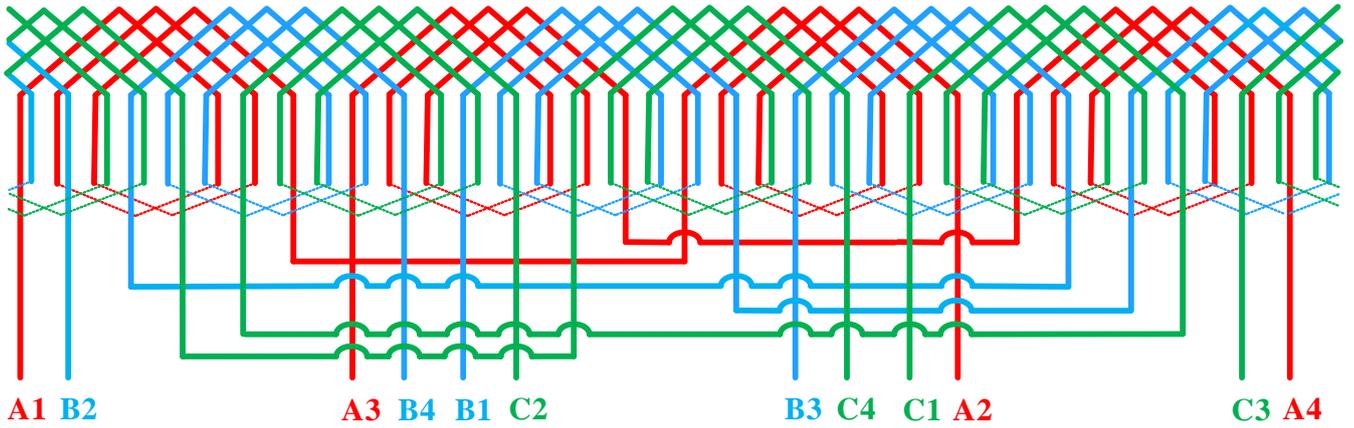


Figura 4. Diagrama do enrolamento proposto.

Após o término do projeto do enrolamento foi realizada a sua bobinagem. Uma fotografia do estator preenchido com as bobinas é apresentada na Figura 5. A Figura 6 mostra a configuração final do motor, onde aparece o painel frontal com o esquema do enrolamento e os bornes de conexão.



Figura 5. Estator com todas as bobinas dispostas.

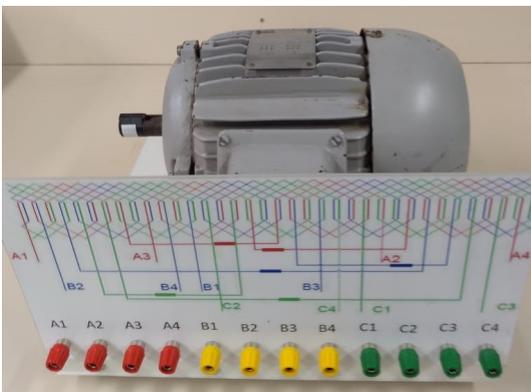


Figura 6. Configuração final do motor Dahlander para ensino e pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentadas as curvas de conjugado-velocidade, bem como as curvas de densidade de corrente-velocidade, para os três modos de operação do motor Dahlander proposto. Para isso, testes experimentais foram realizados considerando-se as ligações apresentadas na Figura 3, de modo que um conjunto de parâmetros para cada modo de operação é estabelecido.

O tradicional circuito equivalente por fase da máquina de indução (Sen, 2013), ilustrado na Figura 7, foi utilizado para a análise de funcionamento do motor Dahlander. Para isso, as constantes k_1 , k_2 e k_3 foram alteradas, conforme a Tabela 4, para cada ligação realizada. A tensão de linha e a corrente de linha, são representadas por V_L e I_L , respectivamente, sendo que os valores de fase associados são calculados mediante as constantes k_1 e k_2 . A potência ativa total fornecida pela rede de alimentação é $P_{3\phi}$. A resistência de cada grupo de bobinas é R_1 , de modo que a resistência do estator é R_1/k_3 . Os demais parâmetros do circuito equivalente são os seguintes: X_1 é a reatância de dispersão do estator; X_m é a reatância de magnetização; X_2' é a reatância de dispersão do rotor e R_2'/s é a resistência do rotor, sendo ambas referidas ao estator.

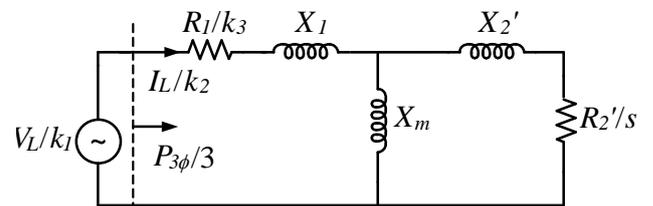


Figura 7. Circuito equivalente da máquina de indução recomendado pelo IEEE adaptado para o motor Dahlander.

A partir da metodologia apresentada em Sen (2013), foram adotados os seguintes procedimentos para cada ligação:

- (i) realização do ensaio de corrente contínua para a determinação da resistência média dos grupos de bobinas, obtendo-se $R_1 = 24,775 \Omega$ para uma densidade de corrente de 9 A/mm^2 imposta aos grupos;

- (ii) execução dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado, sendo os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente;
- (iii) determinação dos parâmetros do circuito equivalente, sendo os resultados apresentados na Tabela 7;
- (iv) cálculo de densidade de corrente no estator e de conjugado eletromagnético para várias velocidades de operação.

Tabela 4. Constantes utilizadas para cada ligação.

Constante	Ligação	Valor
k_1	Estrela	$\sqrt{3}$
	Triângulo	1
k_2	Estrela	1
	Triângulo	$\sqrt{3}$
k_3	Série	0,5
	Paralelo	2

Tabela 5. Resultados dos ensaios a vazio.

Modos de operação	Rotação	V_L (V)	I_L (A)	$P_{3\Phi}$ (W)
Conjugado constante	Baixa	220	1,46	153,0
	Alta	220	1,8	62,0
Conjugado variável	Baixa	220	0,48	52,2
	Alta	220	0,71	62,0
Potência constante	Baixa	220	2,0	212,0
	Alta	220	0,54	48,2

Tabela 6. Resultados dos ensaios de rotor bloqueado.

Modos de operação	Rotação	V_L (V)	I_L (A)	$P_{3\Phi}$ (W)
Conjugado constante	Baixa	81,9	1,56	176,0
	Alta	68,9	1,8	177,0
Conjugado variável	Baixa	142,0	0,9	176,0
	Alta	70,3	1,8	184,0
Potência constante	Baixa	80,2	2,0	226,0
	Alta	80,8	1,56	182,0

Tabela 7. Parâmetros do circuito equivalente.

Modos de operação	Ligação / Rotação	R_1/k_3 (Ω)	R_2' (Ω)	$X_1 = X_2'$ (Ω)	X_m (Ω)
Conjugado constante	Δs / Baixa	49,5	28,7	27,6	233,4
	Y_p / Alta	12,3	7,02	6,26	64
Conjugado variável	Y_s / Baixa	49,5	28,8	27,6	226,0
	Y_p / Alta	12,3	7,03	6,12	168,0
Potência constante	Y_p / Baixa	12,3	8,15	6,73	54,3
	Δs / Alta	49,5	27,2	24,8	661,2

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7, percebe-se que as resistências do rotor, referidas ao estator, nas ligações em série apresentam valores próximos, variando entre 27,2 Ω e 28,7 Ω . O mesmo comportamento é apresentado pelas reatâncias de dispersão, com variação entre 24,8 Ω e 27,6 Ω . Nos casos de ligações em paralelo são observados comportamentos semelhantes, porém com os valores de resistências e reatâncias de dispersão reduzidos aproximadamente à quarta parte dos respectivos valores na ligação série, o que está de acordo com a teoria de associação de impedâncias.

Observa-se que os resultados de resistências e reatâncias de dispersão não foram afetados de forma direta pela mudança do número de polos. Diferentemente, as reatâncias

de magnetização são afetadas diretamente pelo número de polos e, obviamente, também pela ligação, série ou paralelo. As reatâncias de magnetização nas ligações em paralelo são menores do que nas ligações em série. Porém, quando esse fato é acompanhado por um maior número de polos (baixa rotação) a reatância de magnetização fica bastante reduzida. Por essa razão, a reatância de magnetização é significativamente menor na ligação de baixa rotação em relação à ligação de alta rotação para o caso de potência constante (54,3 Ω em relação a 661 Ω). A demonstração matemática de que a indutância de magnetização e, por consequência, a reatância de magnetização, diminuem com o aumento do número de polos está apresentada em Umans (2014).

Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as curvas de conjugado e de densidade de corrente em função da velocidade para os três modos de operação. Essas curvas foram construídas a partir dos parâmetros obtidos dos ensaios, sendo as linhas contínuas utilizadas para as ligações de baixa rotação e as linhas tracejadas para as ligações de alta rotação. Os casos de conjugado constante, conjugado variável e potência constante estão representados com cores diferentes.

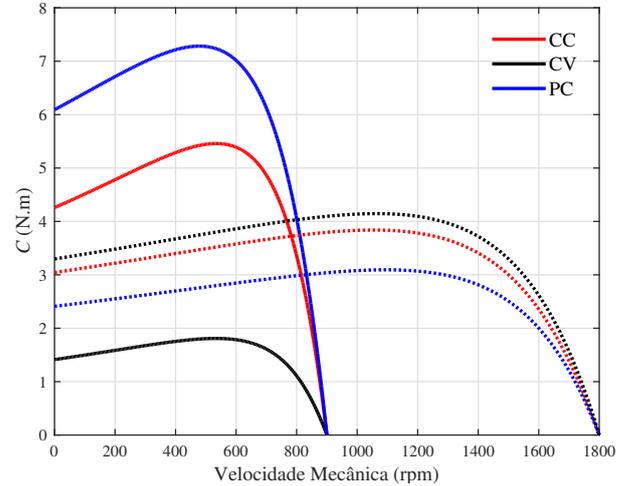


Figura 8. Conjugado em função da velocidade para os três modos de operação.

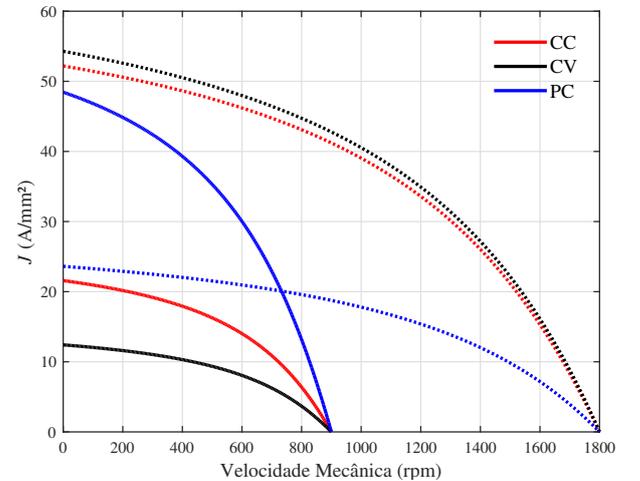


Figura 9. Densidades de corrente no estator em função da velocidade para os três modos de operação.

De acordo com a Figura 8, observa-se que na baixa rotação os maiores valores de conjugado máximo e conjugado de partida ocorrem na ligação de potência constante; já na alta rotação, os maiores valores de conjugado máximo e conjugado de partida ocorrem na ligação de conjugado variável.

Para cada velocidade de operação em regime permanente há um conjugado e uma densidade de corrente. A densidade de corrente não deve ser excessivamente alta, para evitar danos no enrolamento, nem muito baixa, para não subutilizar o cobre. Considerando que foi utilizada uma classe de isolamento H, a partir das Figuras 8 e 9 é possível estabelecer os pontos de operação apresentados na Tabela 8. Na ligação de potência constante, baixa rotação, próximo à velocidade de operação especificada, a densidade de corrente é levemente superior a nominal do condutor. Isso se deve à baixa reatância de magnetização, conforme análise anteriormente apresentada sobre os parâmetros obtidos para o circuito equivalente. Além disso, a Tabela 3 indica que o número de espiras desejável para baixa rotação, e no caso de potência constante, seria 104, o maior de todos os casos. Como a construção foi com 74 espiras, ocorre uma redução da reatância de magnetização. Nas demais ligações a densidade de corrente se manteve abaixo da nominal. Por fim, verifica-se que as relações C_B/C_A em cada modo de operação estão de acordo com as relações de conjugado teóricas estabelecidas na Seção 2.

Tabela 8. Pontos de operação em regime permanente.

Modos de operação	Rotação	C (N.m)	J (A/mm ²)	n_m (rpm)	C_B/C_A (P_B/P_A)
Conjugado constante	Baixa	1,22	8,3	871	1,22
	Alta	1	9	1617	(0,657)
Conjugado variável	Baixa	1,75	9	635	0,707
	Alta	2,47	8,35	1617	(0,278)
Potência constante	Baixa	2,68	10,5	841	1,63
	Alta	1,64	6,44	1651	(0,832)

5. CONCLUSÃO

Este trabalho detalhou os cálculos necessários para a transformação de um motor de indução convencional em um motor Dahlander, assim como os ensaios realizados no protótipo desenvolvido e as curvas de operação alcançadas. Esse protótipo é simples e de baixo custo, não sendo necessário o conhecimento de características detalhadas da máquina original, tais como, curvas de magnetização e de perdas do ferro, dimensões de ranhuras do rotor, comprimento de entreferro, entre outras.

O motor proposto pode operar nos modos de conjugado constante, de conjugado variável e de potência constante. Para isso, o projeto do enrolamento foi realizado de modo a possibilitar que o usuário tenha acesso a doze terminais. Assim, a topologia de enrolamento proposta difere da que é tradicionalmente usada em máquinas comerciais, as quais possuem seis terminais acessíveis e apenas um modo de operação.

Conforme esperado, não se obtém um mesmo desempenho em todos os modos de operação, sendo os motivos tratados ao longo do texto. Contudo, é possível analisar a operação

do protótipo em diversas situações, apresentando assim um potencial para o uso em atividades de ensino e de pesquisa.

O estudo pode ser aprofundado caso sejam obtidas informações adicionais com o fabricante. O detalhamento de dimensões e de materiais possibilita que sejam feitas análises com o auxílio de *softwares* que utilizam métodos de elementos finitos. É possível, por exemplo, mudar o número de espiras e o passo de bobina, a seção transversal dos condutores, e avaliar prontamente as alterações de parâmetros do modelo. Também pode ser feita a análise de harmônicas espaciais em todos os modos de operação.

REFERÊNCIAS

- Giacomazzi, J. A. (2007). *Enrolamentos de motores de indução trifásicos utilizando a teoria da modulação de polos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC
- Mora, J.F. (2003). *Máquinas elétricas*. 5ª edição, McGraw-Hill.
- Moraes, T. J. S. (2012). *Levantamento de curvas características de um motor de indução com enrolamento Dahlander*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.
- Pyrhonen, J., Jokinen, T. e Hrabovcova, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.
- Rohith, R., Unianand, L. e Reddy, S.B. (2018). *Pole Changing wide speed range induction motor drive for electric vehicles*. IEEE Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Chennai, India, 2018, pp. 1-5.
- Sen, P. C. (2013). *Principles of electric machines and power electronics*. 3ª edição, John Wiley & Sons.
- Telles, E. C. (2010). *Análise da operação de um motor de indução com enrolamento dahlander*. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.
- Toliyat, H. e Kliman, G. (2018). *Handbook of electric motors*. CRC press.
- Umans, S. D. (2014). *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7ª edição, AMGH Editora Ltda, Porto Alegre.
- Upadhyay, K. G. (2011). *Design of electrical machines*. New Age International.
- Van der Giet, M., Hameyer, K. e Risse, S. (2007). *Induction motor with pole-changing winding for variable supply frequency*. IEEE International electric machines & drives conference (Vol. 2, pp. 1484-1489).
- WEG (2005) *Manual de bobinagem - motores elétricos de indução*. Catálogo 541.17/04.2005, WEG. Jaraguá do Sul - SC, 2005.