

Construção de Rotor Didático Gaiola de Esquilo para Motor de Indução

Deon, Marcos Antonio, e Pupin, Carlos Eduardo

Resumo—O objetivo do trabalho é desenvolver rotores gaiola de esquilo para motor de indução, para serem empregados como ferramenta didática, auxiliando os alunos do curso de engenharia elétrica nas atividades desenvolvidas em laboratório. O novo rotor, possuirá partes de policarbonato cristal permitindo visualizar os componentes internos do rotor, facilitando a distinção das partes elétricas e das partes mecânicas. O rotor deve facilitar as intervenções elétricas, permitindo alterar as características elétricas como a retiradas de barras da gaiola, simulando a queima de barras rotóricas. Os acadêmicos ainda poderão realizar a coleta de dados através e ensaios pré-estabelecidos, identificando alterações nas curvas que caracterizam a operação do motor.

Palavras-Chave— rotor, motor de indução, gaiola de esquilo.

I. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os motores de indução trifásicos (MIT) são amplamente utilizados na indústria, pela simplicidade operacional, bom torque mecânico, durabilidade, baixo custo e um alto rendimento.

Os MIT mais comercializados são nível de proteção IP55, praticamente isolados do ambiente externo, impedindo visualizar os componentes internos. Com base didática, se propõe o projeto de um rotor do tipo gaiola de esquilo, onde partes do motor são substituídas por policarbonato transparente (cristal) permitindo visualizar os componentes internos, em específico os condutores que constituem a gaiola de esquilo, em disposição e bitola, proporcionando melhor entendimento do princípio operacional da máquina elétrica.

Os rotores mais comuns são do tipo gaiola de esquilo, classificados segundo a nomenclatura ABNT NBR 17094-1:2008 em três classes diferentes (D, N e H), sendo que cada classe apresenta características construtivas diferentes, apresentando distintos comportamentos operacionais

Artigo submetido em 31 de março de 2017. Os autores receberam recursos do Artigo 170 da Constituição Estadual de Santa Catarina (UNIEDU), para Bolsa de Auxílio à Pesquisa Modalidade Iniciação Científica.

Marcos Antonio Deon (marcos.antonio.deon@gmail.com) é estudante de graduação do curso de engenharia elétrica da Universidade Comunitária da Região de Chapecó – (UNOCHAPECÓ), Santa Catarina, Brasil.

O autor Carlos Eduardo Pupin (carlos.pupin@unochapeco.edu.br) é professor do departamento de engenharia elétrica da Universidade Comunitária da Região de Chapecó – (UNOCHAPECÓ), Santa Catarina, Brasil.

Ambos os autores são membros do Grupo de Desenvolvimento Tecnológico (GDT) da Unochapecó.

relacionados a curva de torque e de corrente, principalmente de partida [1-5].

O foco do projeto é a construção do rotor de classe D, sem núcleo magnético, composto por barras finas alojadas na borda do rotor [1-5]. O policarbonato dará sustentação mecânica ao rotor, permitindo atingir rotações próximas a nominal do MIT. Também as tampas são em policarbonato, possibilitando a clara visualização do interior do motor.

Os condutores rotóricos e estáticos aparentes, e a mobilidade em desmontar e remontar a parte girante do MIT facilitará a compreensão da operação dos motores de indução. Segundo Rosito, a integração de práticas científicas investigativas complementam a compreensão da teoria, pois estimulam o aluno, a interpretar os fenômenos científicos [6].

A “transparência” e “flexibilização construtiva” do rotor protótipo, permitem ao acadêmico “interiorizar” no motor elétrico, facilitando o entendimento de conceitos e leis científicas, englobadas no princípio de funcionamento do equipamento [7].

Com o funcionamento do protótipo, é possível avaliar as mudanças na característica de torque, corrente, fator de potência e velocidade. Os resultados são comparados ao antigo rotor do MIT, este desenvolvido, na época de construção da máquina, para ser robusto, eficiente e otimizado.

Neste artigo se descreve os procedimentos adotados para a construção do rotor didático, baseando-se nas estruturas típicas adotadas pelos fabricantes na construção de rotores de motores de indução. Ao final são apresentados alguns resultados obtidos na energização do MIT resultante.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os motores de indução trifásicos recebem este nome porque não necessitam de circuito de campo separado. Devido a diferença de velocidade angular entre campo girante e rotor, há indução de tensões no rotor (daí o nome de máquinas de indução), sem necessitar de excitação externa [1-2, 4, 8].

Os MIT podem ser produzidos com rotor bobinado [1, 2, 8], como o da Fig. 1, ou de barras curto-circuitadas [1, 2, 8], conhecidos como gaiola de esquilo Fig. 2.

Cada tipo de rotor possui suas vantagens e desvantagens, apresentando diferentes características de torque, corrente de partida e escorregamento. Este último influi diretamente na eficiência elétrica de todo o equipamento [1, 8].



Fig. 1 – Rotor bobinado, com núcleo magnético, anéis coletores e partes mecânicas [9].

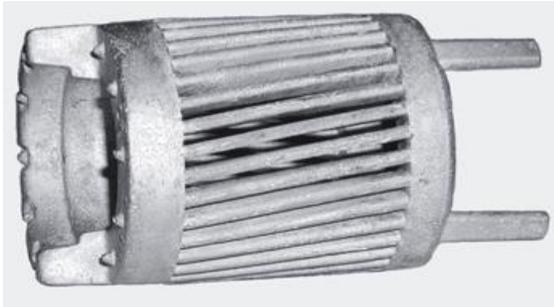


Fig. 2 – Detalhes da gaiola de esquilo, sem núcleo magnético e partes mecânicas [2].

De rotor bobinado, ou gaiola, a disposição espacial dos condutores e o formato das ranhuras no núcleo do rotor, alteram as características eletromecânicas do MIT [1-5, 8].

O circuito equivalente de um motor trifásico é muito semelhante ao circuito de um transformador, podemos assim utilizar do que sabemos sobre transformadores e aplicar no MIT, sendo assim possível descrever um MIT através do circuito equivalente reproduzido na Fig. 3.

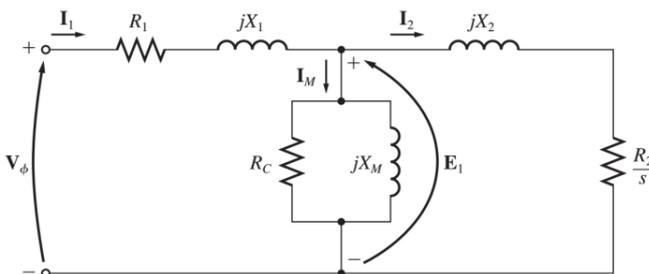


Fig. 3 – Circuito equivalente monofásico de um MIT [1].

No circuito equivalente do MIT (Fig. 3), \$R_1\$ representa a resistência das bobinas estatóricas, \$X_1\$ o efeito reativo indutivo devido a dispersão de fluxo magnético gerado pelas bobinas estatóricas, \$R_C\$ as perdas ativas nos núcleos do estator e rotor, enquanto que \$X_M\$ a energia indutiva absorvida para a orientação dos domínios magnéticos dos núcleos. O rotor é modelado pelas grandezas \$R_2\$ e \$X_2\$, que representam respectivamente a resistência dos condutores que constituem do rotor, e dispersão de fluxo magnético no rotor [1, 2, 8].

As grandezas do rotor (\$R_2\$ e \$X_2\$) são dependentes da frequência induzida neste, e a frequência do rotor depende do escorregamento do MIT, conforme (1). O escorregamento (\$s\$) é definido como sendo a diferença entre a velocidade do campo girante estatórico (velocidade síncrona) em relação a velocidade mecânica do rotor (2), ambos em rpm.

$$f_{rotor} = s \cdot f_{estator} [Hz] \tag{1}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_{mec}}{n_{sync}} [pu] \tag{2}$$

Todas as grandezas discriminadas anteriormente são dependentes das dimensões do estator e rotor, da forma construtiva e disposição das bobinas.

Da análise do modelo equivalente é possível obter as perdas ativas e reativas do motor, a potência absorvida da rede, e a convertida em mecânica, devido a produção de torque pelas espiras excitadas do rotor. Sabendo-se as perdas mecânicas do motor (obtidas a partir do ensaio à vazio), se obtém a potência e torque disponíveis no eixo do motor a carga mecânica [1-5].

A resistência \$R_2\$ depende do material condutor empregado na construção do rotor, na gaiola de esquilo tipicamente se usa alumínio. O valor de \$R_2\$ é determinante na característica de torque dos MIT, conforme Fig 4.

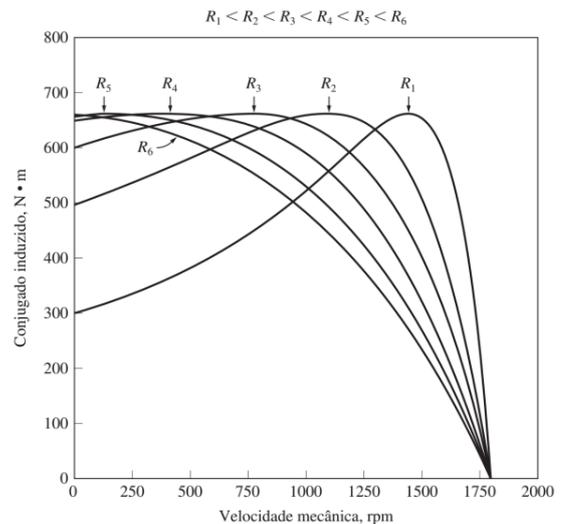


Fig. 4 – Torque versus velocidade para diferentes valores de \$R_2\$ [1].

Com base neste conceito, no projeto desenvolvido, são empregadas barras circulares de latão e cobre para a construção dos condutores do rotor, graças a diferente resistência entre os dois materiais.

A reatância \$X_2\$ é dependente do quanto profunda é a ranhura do núcleo rotórico. Segundo Chapman, quanto mais profunda a ranhura (próxima ao eixo de aço), maiores são as dispersões de fluxo magnético, elevando a reatância indutiva \$X_2\$, esse conceito pode ser avaliado utilizando da Fig. 5.

A reatância \$X_2\$ representa o enlace de fluxo estator/rotor, e quanto mais fortemente acoplados magneticamente estiverem rotor e estator, maior o torque produzido pelo MIT [1-5].

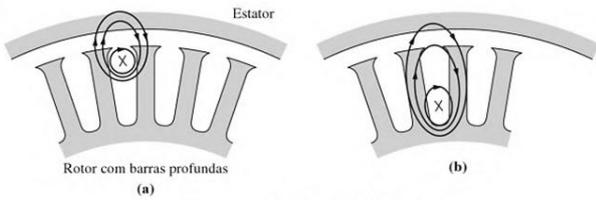


Fig. 5 - Efeito indutivo das barras da gaiola, devido a dispersão fluxo [1].

Em rotores com barras superficiais (próximas a borda magnética do rotor), na partida, é elevada a frequência das tensões induzidas no rotor, prevalecendo o baixo fator de potência e limitando a corrente que circula no rotor, limitando então a corrente de partida, apresentando assim desejáveis características de partida. Já em altas rotações (pequeno escorregamento), a frequência das tensões induzidas no rotor é pequena, assim X_2 será muito pequeno (3), permitindo a grande circulação de corrente no rotor, mas com fator de potência próximo ao unitário.

$$X_2 = s.2\pi Lf_{estator} [\Omega] \quad (3)$$

Dentro da categoria de rotor gaiola de esquilo, a NBR 17094 classifica como tipo N, H e D. Na Fig. 6, retirada de Chapman, 2013, destaca-se as características de torque versus velocidade no padrão “NEMA”. Para equivalência Classe A e B corresponde ao tipo N da NBR, Classe C ao tipo H e Classe D ao tipo D.

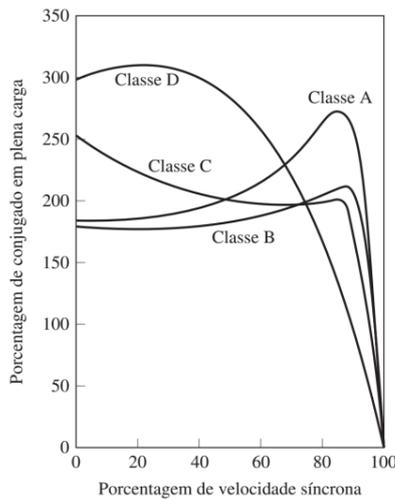


Fig. 6 – Curva de conjugado versus velocidade para as classes dos rotores em questão [1].

As lâminas magnéticas que constituem o núcleo rotórico do tipo D são semelhantes à da Fig. 7. Essa classe possui condutores de fina seção transversal de comprimento igual ao do estator, e alojados na borda do rotor, o que reduz a reatância X_2 . A fina seção eleva a resistência da gaiola de esquilo. A principal característica desse rotor é proporcionar um alto conjugado de partida (Fig. 6) absorvendo pequena corrente de partida.

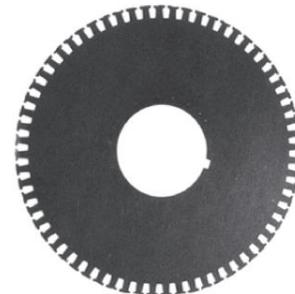


Fig. 7 – Seção transversal do núcleo rotor D [1].

O tipo D não apresenta boa característica de torque e eficiência em elevadas rotações, exatamente pelo elevado valor de R_2 .

O rotor do tipo N (Fig. 8) é o de maior aplicação industrial, dominando a categoria. Possui barras profundas, com condutores de grossa seção, alojados na borda do rotor até próximo ao eixo. A Fig. 2, apresentou os condutores de alumínio que formam a gaiola de esquilo deste tipo de rotor.

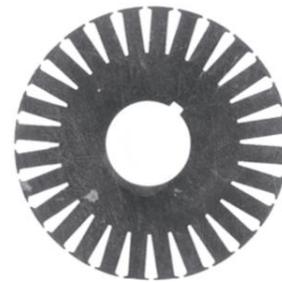


Fig. 8 - Seção transversal do núcleo rotor N [1].

Em baixas rotações, a frequência induzida no rotor é elevada, prevalecendo o efeito indutivo, e há maior densidade de corrente fluindo na borda do rotor. Em altas rotações, a frequência é pequena, reduzindo o efeito indutivo, dispersando igualmente a corrente por toda a seção da barra da gaiola de esquilo. A baixa resistência e reatância induzida permitem a circulação de elevada corrente no rotor, produzindo elevada densidade de fluxo magnético rotórico, e conseqüente torque mecânico. Consiste de um rotor excelente para operação contínua em elevadas rotações.

O rotor do tipo H (Fig. 9), também conhecido como rotor dupla gaiola de esquilo, une a boa característica de partida do rotor tipo D, com a boa operação em elevadas rotações do N.

Possui estrangulamento nos condutores das barras da gaiola, simulando duas gaiolas eletricamente conectadas. Na partida prevalece a densidade de corrente na gaiola mais à borda do rotor, garantindo elevado torque de partida com baixa corrente. Em altas rotações a corrente se distribui por toda a barra, mantendo os bons efeitos das ranhuras profundas. Possuem como desvantagem o elevado custo para produção.

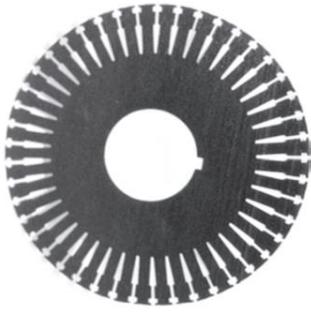


Fig. 9 – Secção transversal do núcleo rotor H, dupla gaiola de esquilo [1].

III. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Para o desenvolvimento da proposta, adquiriu-se um motor antigo sucateado de 7,5cv (5,5 kW), 4 polos, 1740 rpm, 380/220 volts. As dimensões do motor foram decisivas, pelo fato de possuir um rotor com diâmetro suficiente para permitir a montagem artesanal dos rotores e facilitar a visualização dos componentes internos e a exposição didática. Diâmetros muito grandes acarretariam gastos excessivos de material, e dificultaria o deslocamento. Um motor excessivamente pequeno dificultaria a montagem dos rotores, e a visualização das partes internas.

O motor adquirido (Fig. 10) apresentava fuga de corrente à carcaça, o que impedia sua segura apresentação. Por este motivo o motor foi rebobinado, os estudantes do curso de Engenharia Elétrica da Unochapecó foram os responsáveis por recuperar o motor.



Fig. 10 – Motor pronto, após a rebobinagem.

Primeiramente todo o bobinado antigo é removido. Na sequência realiza-se a limpeza e remoção de material sólido encrustados nos componentes do motor, preparando-o para receber as novas bobinas estatóricas.

O enrolamento original possuía dupla camada de bobinas com dezesseis espiras cada camada, dispostas em trinta e seis ranhuras no estator. O novo enrolamento foi feito camada única com trinta e duas espiras por bobina o que facilita a rebobinagem, as novas bobinas foram confeccionadas através de uma bobinadeira artesanal e manual. O bobinamento em

camada única reduz as dimensões da cabeça da bobina (trecho da bobina externo ao núcleo estatórico).

Devido a disponibilidade de material nos laboratórios, o fio utilizado foi o AWG 16 de alumínio, substituindo assim o antigo fio AWG 16 de cobre, aplicando também as devidas isolações e proteções as novas bobinas, como papel isolante, espaguete flexpoli, papel filme de poliéster e verniz isolante.

Com todo o motor desmontado, faz-se as medidas do estator e rotor, para início do projeto do novo rotor. Através do aplicativo comercial *SolidWorks*® criou-se os desenhos dos novos rotores. O *SolidWorks*® é um *software* para modelamento em 3 dimensões e simulação de características mecânicas, o que possibilita obter modelos em 3D, facilitando a abstração e possíveis adequações ao projeto, auxiliando também na definição da quantidade de material necessário para a construção das gaiolas de esquilo.

O *software* ainda proporciona materiais com características muito próximas do real, aonde ensaios de torque, vibrações e fadiga podem ser realizados analisando se o material escolhido suporta os esforços mecânicos.

O primeiro rotor projetado e desenhado foi o do tipo D, conforme Fig. 11. Pode-se notar a qualidade dos desenhos que o *software* proporciona, esquematizando o projeto final.

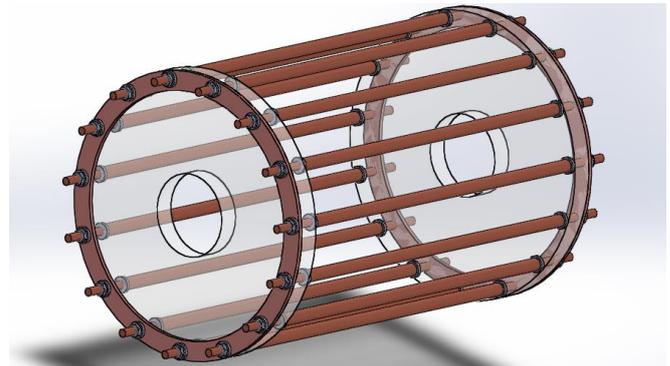


Fig. 11 – Rotor tipo D, desenhado no *SolidWorks*.

Após a fase de desenho e dimensionamento das gaiolas, com os materiais adquiridos, inicia-se o processo de usinagem das barras de latão. São 30 barras confeccionadas em latão, com 6,4mm de diâmetro e rebaixo de 4,5mm para rosas M4.

O número de barras foi definido sobre a quantidade possível de barras, arruelas e porcas suportáveis sobre a dimensão do disco. A quantidade de barras pode ser alterada, com a inserção ou retirada, possibilitando diferentes ensaios eletromecânicos. Como já comentado, se escolheu latão para a confecção das barras para a classe D, devido à elevada resistência elétrica e resistência mecânica a tração ser superior à do cobre, que poderia perder o aperto das porcas, pelo cobre ser mais maleável/mole que o latão [3-5].

Para curto circuitar as barras que compõem a gaiola, quatro anéis de material condutor são inseridos entre os discos de policarbonato, auxiliando inclusive na sustentação da estrutura.

Para fixação das barras aos anéis são usadas porcas *parlock* que evitam as barras de afrouxarem com a vibração, não requerendo exagerado aperto das roscas.

Os discos que sustentam a gaiola são de policarbonato, um material transparente, que possui uma boa resistência mecânica a trincos ou rachaduras, e atendeu perfeitamente as exigências do projeto. O disco de policarbonato foi furado com distribuição espacial para acomodar 15 ou 30 barras de latão, resultando no rotor apresentado na Fig. 12 (15 barras).



Fig. 12 – Rotor do tipo D montado, pronto para os testes.

O eixo é confeccionado em aço 1020 com dimensões menores ao eixo original, nas dimensões para acomodar novos rolamentos. Finalizando, monta-se o rotor com rolamentos nas tampas dianteira e traseira, também de policarbonato, fixando o rotor ao estator. Na Fig. 13 a foto do motor pronto.

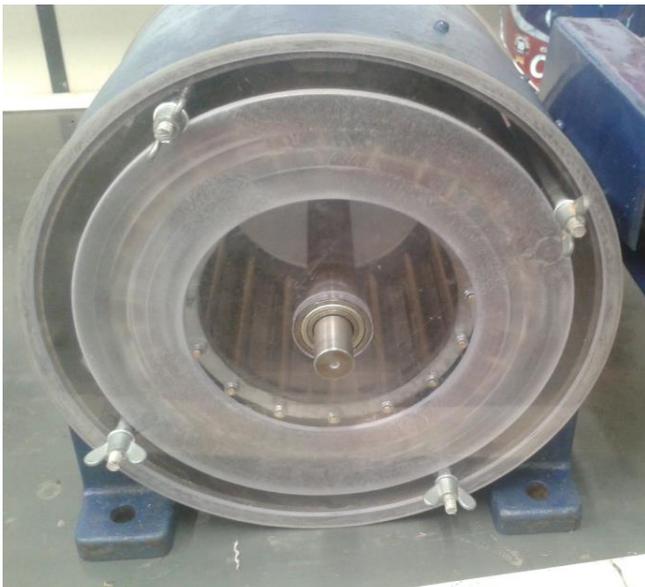


Fig. 14 – Motor já montado com as tampas laterais de sustentação do rotor.

Outros dois tipos de rotores são contemplados em projeto, um rotor do tipo N, e outro do tipo H. O do tipo N será montado em barras de cobre maciço, de grande secção transversal, objetivando pequena resistência da gaiola, como na Fig 15 [3-5].

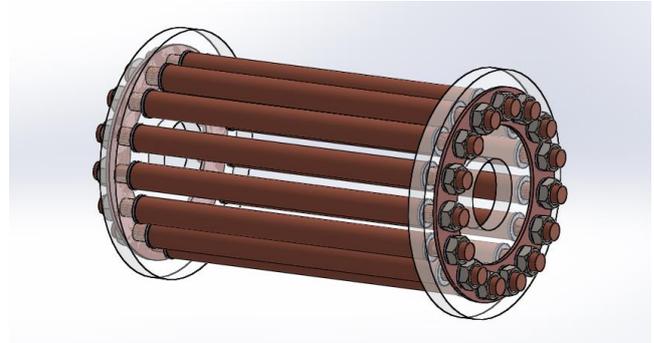


Fig. 15 – Rotor da classe N.

O do tipo H será dupla gaiola de esquilo, com a mais externa feita com barras finas de latão, e a interna com barras grossas de cobre [3-5]. Ambos ainda não foram produzidos.

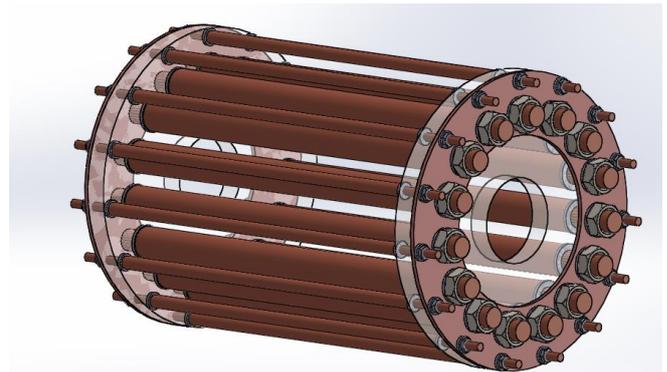


Fig. 16 – Rotor da classe H.

IV. ENSAIOS E RESULTADOS

Para analisar as características do rotor do tipo D (Fig. 12) e comparar com os parâmetros do rotor original do MIT. É ensaiado em laboratório, conforme descrição fornecida por Chapman, 2013, para encontrar as componentes que formam o circuito equivalente do MIT, conforme equivalente monofásico da Fig. 3.

Operando inicialmente com o rotor original do motor ligado em estrela, o primeiro ensaio é o ensaio de corrente contínua, aplicando uma tensão V_{cc} variável nos terminais da máquina conforme circuito esquemático da Fig. 17, monitorando a corrente até atingir o valor nominal, através deste ensaio é possível determinar resistência das bobinas estatóricas (R_f).

O segundo ensaio realizado é o de rotor bloqueado, com ligações conforme a Fig. 18. Com o rotor bloqueado, eleva-se a tensão até atingir a corrente nominal do motor, faz-se a leitura de tensão, corrente e potência ativa consumida.

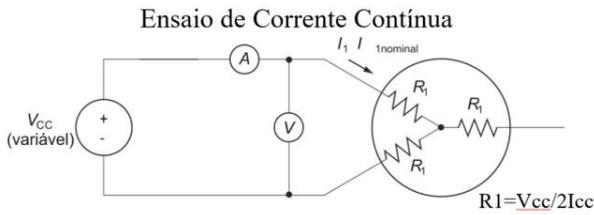


Fig. 17 – Circuito esquemático para realizar ensaio de corrente contínua [1].

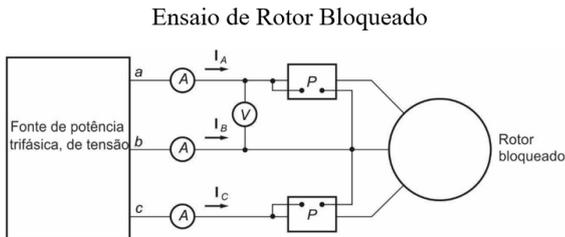


Fig. 18 – Circuito esquemático para realizar ensaio de rotor bloqueado [1].

Por último, o ensaio a vazio. Aplica-se plena tensão aos terminais do motor e registra-se a tensão, corrente e potência ativa.

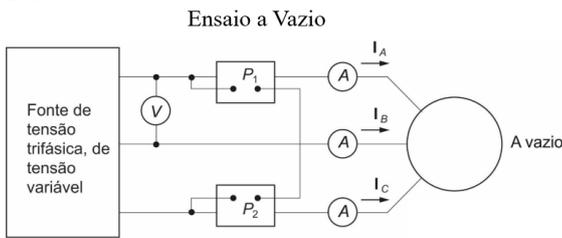


Fig. – 19 Circuito esquemático para efetuar ensaio a vazio [1].

Tabela I - Ensaio do MIT com rotor original.

Ensaio CC	Ensaio a vazio	Ensaio com rotor bloqueado
$V_{CC} = 37,9 \text{ V}$ $I_{CC} = 7,9 \text{ A}$	$P_{0a} = 49,3 \text{ W}$	$P_{RBA} = 285 \text{ W}$
	$P_{0b} = 40,6 \text{ W}$	$P_{RBB} = 276 \text{ W}$
	$P_{0c} = 38,5 \text{ W}$	$P_{RBC} = 287 \text{ W}$
	$V_{La} = 380 \text{ V}$	$V_{La} = 128 \text{ V}$
	$V_{Lb} = 380 \text{ V}$	$V_{Lb} = 129 \text{ V}$
	$V_{Lc} = 380 \text{ V}$	$V_{Lc} = 129 \text{ V}$
	$I_a = 2,12 \text{ A}$	$I_a = 7,85 \text{ A}$
	$I_b = 2,10 \text{ A}$	$I_b = 7,95 \text{ A}$
	$I_c = 2,14 \text{ A}$	$I_c = 7,77 \text{ A}$

Com os dados dos três ensaios, e utilizando de uma rotina desenvolvida em ambiente *Matlab*®, são obtidos os parâmetros que modelam o MIT (R_1 , R_2 , X_1 , X_2 e X_M – Fig. 20). Com esses dados é obtida a curva de conjugado e corrente *versus* velocidade.

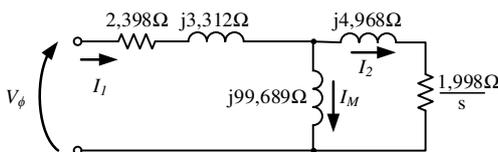


Fig. 20 – Circuito equivalente do MIT, para o rotor original.

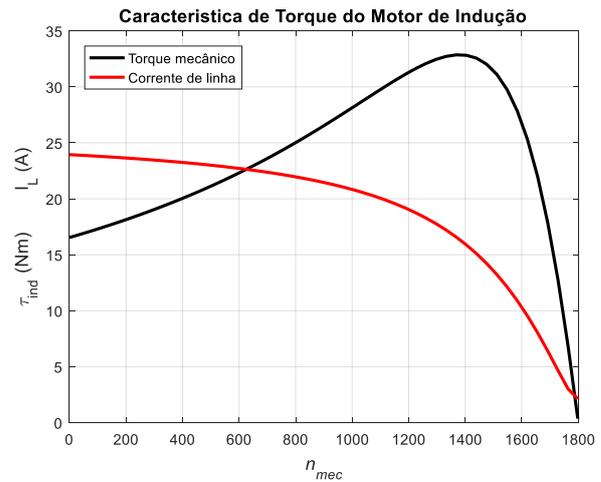


Fig. 21 – Conjugado e corrente *versus* velocidade, para o rotor original.

Aplicando o rotor desenvolvido no projeto, e reensaiando o MIT, são obtidos os resultados constantes na Tabela II, porem o ensaio de corrente contínua não precisa ser refeito pois as características do estator não foram alteradas. Importante salientar que o motor foi energizado vagarosamente, para comprovar a capacidade da estrutura em suportar o aumento da rotação, e graças aos cuidados tomados na montagem do rotor, elevadas rotações foram atingidas com sucesso.

Tabela II - Ensaio do MIT com o rotor classe D desenvolvido.

Ensaio CC	Ensaio a vazio		Ensaio com rotor bloqueado	
	15 barras	30 barras	15 barras	30 barras
$V_{CC} = 37,9 \text{ V}$ $I_{CC} = 7,9 \text{ A}$	$P_{0a} = 190 \text{ W}$	$P_{0a} = 169 \text{ W}$	$P_{RBA} = 191 \text{ W}$	$P_{0a} = 159 \text{ W}$
	$P_{0b} = 186 \text{ W}$	$P_{0b} = 158 \text{ W}$	$P_{RBB} = 183 \text{ W}$	$P_{0b} = 167 \text{ W}$
	$P_{0c} = 171 \text{ W}$	$P_{0c} = 163 \text{ W}$	$P_{RBC} = 187 \text{ W}$	$P_{0c} = 168 \text{ W}$
	$V_{La} = 78,7 \text{ V}$	$V_{La} = 77,9 \text{ V}$	$V_{La} = 80,3 \text{ V}$	$V_{La} = 76,3 \text{ V}$
	$V_{Lb} = 79,1 \text{ V}$	$V_{Lb} = 78,5 \text{ V}$	$V_{Lb} = 80,7 \text{ V}$	$V_{Lb} = 76,8 \text{ V}$
	$V_{Lc} = 78,6 \text{ V}$	$V_{Lc} = 78,4 \text{ V}$	$V_{Lc} = 80,5 \text{ V}$	$V_{Lc} = 76,9 \text{ V}$
	$I_a = 7,85 \text{ A}$	$I_a = 7,88 \text{ A}$	$I_a = 7,95 \text{ A}$	$I_a = 7,85 \text{ A}$
	$I_b = 7,82 \text{ A}$	$I_b = 7,93 \text{ A}$	$I_b = 7,91 \text{ A}$	$I_b = 7,89 \text{ A}$
	$I_c = 7,86 \text{ A}$	$I_c = 7,91 \text{ A}$	$I_c = 7,95 \text{ A}$	$I_c = 7,93 \text{ A}$

No ensaio a vazio o motor não atingiu rotações próximas a velocidade síncrona, fato este já esperado, já que o novo rotor não possui núcleo magnético rotórico. Com o rotor com 15 barras a velocidade atingida foi no máximo de 1345 rpm, o rotor de 30 barras atingiu 1150 rpm.

Com os resultados do ensaio, se obtêm os parâmetros do MIT com o novo rotor. Com 15 barras, os resultados são dispostos no modelo equivalente da Fig. 22.

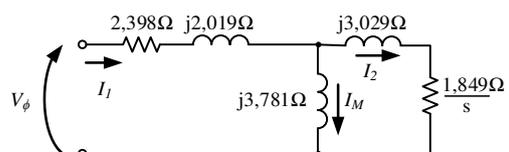


Fig. 22 – Circuito equivalente do MIT, com o rotor tipo D com 15 barras.

Comparando os dois circuitos equivalentes monofásicos, nota-se a grande mudança sofrida na reatância que representa

a energia reativa necessária para magnetizar o núcleo do MIT (X_M). Com a redução de $j99,689\Omega$ para $j3,7814\Omega$, quase toda a corrente absorvida da rede (I_1) será utilizada para gerar o fluxo magnético girante, reduzindo I_2 para $2,90\angle 7,43^\circ$ [A]. Além disso, X_1 e X_2 também mudam, já que o acoplamento magnético entre estator e rotor reduziu.

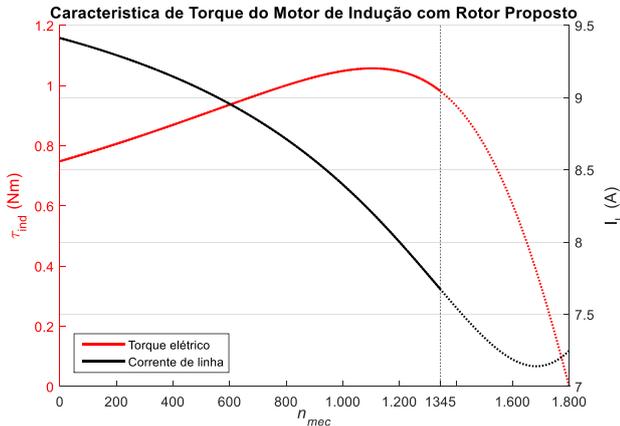


Fig. 23 – Curva de conjugado e corrente versus velocidade para o rotor construído tipo D com 15 barras.

Analisando a Fig. 23, são evidentes as mudanças provenientes da ausência de núcleo rotórico, o motor é incapaz de produzir torque suficiente na gaiola de esquilo a ponto de atingir rotações próximas a síncrona. O escorregamento deve se manter elevado ($s=25,28\%$) para que potência suficiente seja convertida para manter o rotor girando à 1345 rpm.

Com 30 barras no protótipo de rotor, os resultados são dispostos no modelo equivalente monofásico da Fig. 24.

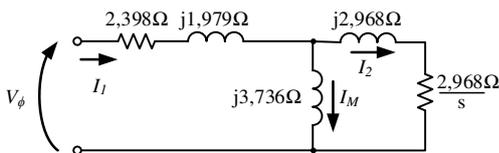


Fig. 24 – Circuito equivalente do MIT, com o rotor tipo D com 30 barras.

Comparando os modelos equivalentes de 15 e 30 barras, nota-se pequena diferença, a maior diferença se refere a resistência rotórica (R_2) que de $R_2 = 1,849/s \Omega$ foi à $R_2 = 2,968/s \Omega$. Os melhores resultados elétricos foram obtidos com 15 barras.

A curva de torque do rotor com 30 barras apresenta característica mais semelhante ao rotor original (Fig. 21). Mas ainda distante da operação do real rotor do motor.

Vale ressaltar que o rotor proposto é do tipo D, que opera normalmente com elevado escorregamento. As mudanças são provenientes ao pequeno fluxo enlaçado pelas barras do rotor, resultando em pequeno torque.

Como o objetivo do trabalho nunca foi de obter um rotor de elevada eficiência, pode-se afirmar que o projeto foi bem-

sucedido, por resultar em um rotor visualmente didático, de fácil adaptação construtiva, capaz de operar e produzir pequeno torque.

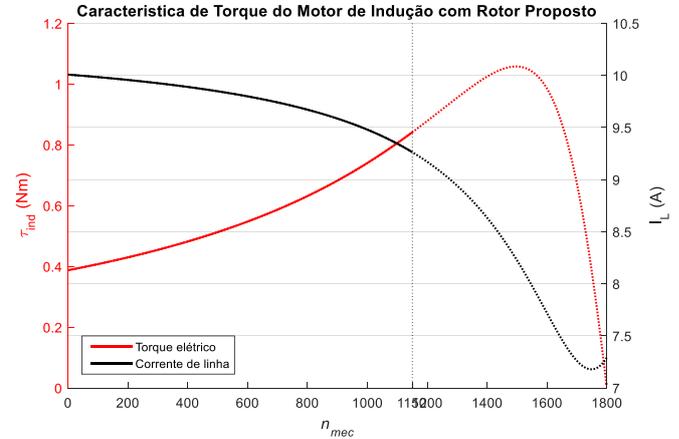


Fig. 25 – Curva de conjugado e corrente versus velocidade para o rotor construído tipo D com 30 barras.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com o desenrolar do trabalho, e investigando os resultados obtidos por simulações e ensaios práticos, algumas considerações podem ser tecidas acerca da operação do motor de indução com rotor didático do tipo D.

Os motores reais são fabricados visando a elevada eficiência e razão torque/dimensão. Isso lhes garante elevado valor na reatância de magnetização (X_M), minimizando a corrente de magnetização absorvida da rede. Também apresentam elevado enlace de fluxo entre estator/rotor (pequenos valores de X_1 e X_2), resultando em elevado fluxo magnético e consequente, produção de torque mecânico.

O rotor proposto apresentou pequena eficiência, e razão torque/dimensão baixíssima. Com o pequeno valor resultante de X_M , grande parcela da corrente da rede é utilizada para conseguir magnetizar o núcleo estatórico e produzir fluxo em toda a extensão do rotor, que consiste de um grande entreferro. O que limita a produção de fluxo pelo estator, induzindo pequena tensão no rotor, e consequente corrente e torque.

Mesmo com os resultados, quantitativamente, pouco satisfatórios, o principal propósito do trabalho é o desenvolvimento de rotores didáticos, que facilitem o entendimento, pelos estudantes de máquinas elétricas, do princípio de operação dos MIT, e como o rotor influencia na característica operacional da máquina.

Devido ao cuidado na montagem, escolha dos materiais constituintes e projetos em softwares de simulações, foi possível construir um rotor artesanalmente com ótimas características mecânicas, que lhe garante a operação sem risco em elevadas rotações (1345rpm). Mantendo a característica principal que é ser didático (predominantemente transparente).

Com relativa facilidade foi dobrada a quantidade de barras, montando a gaiola de esquilo com 30 barras de latão, os resultados de ensaio deste rotor se assemelharam ao rotor original do MIT, mas equivalentemente R_2 é elevado, o que resultou na redução da velocidade de giro do motor em sua corrente nominal (1150 rpm). Tal característica é prejudicial a operação do motor, mas por se tratar de um rotor destinado a fins didáticos e de ensaios específicos, conclui-se pelo sucesso do projeto desenvolvido.

Como futuros trabalhos pretende-se finalizar os demais tipos de rotores (N e H), e comparar as características obtidas.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Chapman. "Fundamentos de máquinas elétricas". 5 ed. São Paulo: AMGH, 2013.
- [2] S. Umans "Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley". 7 ed. Mc Graw Hill, 2014.
- [3] C. Bruzzese, O. Honorati and E. Santini, "Laboratory prototype for induction motor bar breakage experimentation and bar current measuring," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006., Taormina, 2006, pp. 734-739.
- [4] N. C. Enslin, "Interconnected rotor induction motors," in Proceedings of the IEE - Part C: Monographs, vol. 108, no. 14, pp. 281-286, September 1961. doi: 10.1049/pi-c.1961.0038
- [5] T. Mauffrey, J. F. Pradurat, L. Durantay and J. Fontini, "Comparison of 5 different squirrel cage rotor designs for large high speed induction motors," PCIC Europe 2013, Istanbul, 2013, pp. 1-9.
- [6] ROSITO, Berenice Alvares. O ensino de Ciências e a experimentação. In: MORAES, Roque. Construtivismo e ensino de ciências: reflexões epistemológicas. 3.ed. Porto Alegre, Ed. EDIPUCRS, 2008. p.195-208.
- [7] BARRETO FILHO, B. Atividades práticas na 8ª série do Ensino Fundamental: luz numa abordagem regionalizada. 2001. 128f. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- [8] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley. "Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência". 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [9] O. Brake Motors, "Rotor de anéis deslizantes" http://www.obeki.com/noticias.php?apli_desde=12, acessado: 2017-03-28.