



## ANÁLISE DA GEOMETRIA E DO FLUXO MAGNÉTICO DO MOTOR SÍNCRONO À RELUTÂNCIA AUXILIADO POR IMÃ PERMANENTE

Thiago Silva Pereira\*<sup>1</sup>, Luciano Coutinho Gomes.

<sup>1</sup>FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** - O objetivo deste trabalho é apresentar uma breve revisão bibliográfica das principais características dos componentes que são partes integrantes do motor síncrono à relutância (MSR) como também do motor síncrono à relutância com imã permanente (MSR-aIP), como também já aprofundar e definir os materiais escolhidos a serem utilizados na construção do motor, ressaltando os parâmetros físicos, medidas geométricas, tendo como base o melhor custo x benefício.

**Palavras-Chave** - MSR-aIP, MSR, Ferrite MSR-aIP.

### ANALYSIS OF GEOMETRY AND MAGNETIC FLOW OF THE SYNCHRONOUS MOTOR ASSISTED OF PERMANENT MAGNET

**Abstract** - The objective of this work is to present a brief bibliographic review of the main characteristics of the components that are integral parts of the synchronous motor to the reluctance (MSR) as well as the synchronous motor to the reluctance with permanent magnet (MSR-aIP), as well as to deepen and define the materials chosen to be used in the construction of the engine, emphasizing the physical parameters, geometric measurements, based on the best cost x benefit.

**Keywords** - MSR-aIP, MSR, Ferrite MSR-aIP.

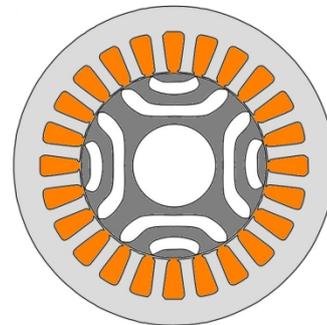
### I. INTRODUÇÃO

É impossível iniciar a concepção do motor síncrono de relutância auxiliado por imã permanente (MSR-aIP), desconhecendo os conceitos e a própria concepção de um motor síncrono de relutância (MSR).

O MSR com rotor laminado transversalmente de material ferromagnético foi proposta há vários anos, mas apenas nos últimos anos está se tornando cada vez mais atraente. Isso é devido à sua robustez, alta capacidade de sobrecarga e seu baixo custo [1]. O motor MSR está se tornando um bom concorrente em aplicações que exigem alta dinâmica, alta densidade de torque e capacidade de tolerância a falhas.

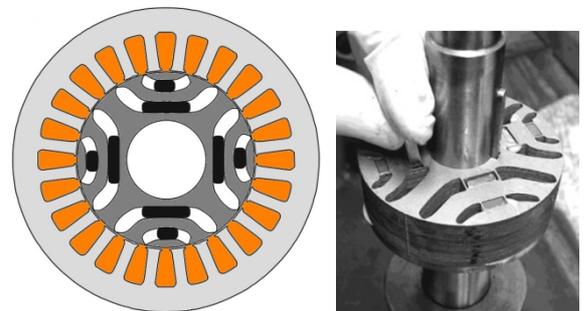
A Figura 1 mostra um esboço de um motor MSR de quatro pólos caracterizados por duas de barreiras de fluxo por pólo.

Fig. 1. Esboço de motor de relutância síncrono de quatro pólos.



Um ímã permanente (IP) pode ser inserido em cada barreira de fluxo do rotor, como na Figura 2. A configuração resultante é chamada de máquina síncrona de relutância auxiliada por IP (MSR-aIP). O objetivo da adoção de IPs é múltiplo: saturar as pontes de ferro do rotor, aumentar o torque do motor e aumentar o fator de potência.

Fig. 2. Esboço e exemplo de motor de relutância síncrono de quatro pólos auxiliado por ímãs permanentes. Fonte: Nicola Bianchi [1].



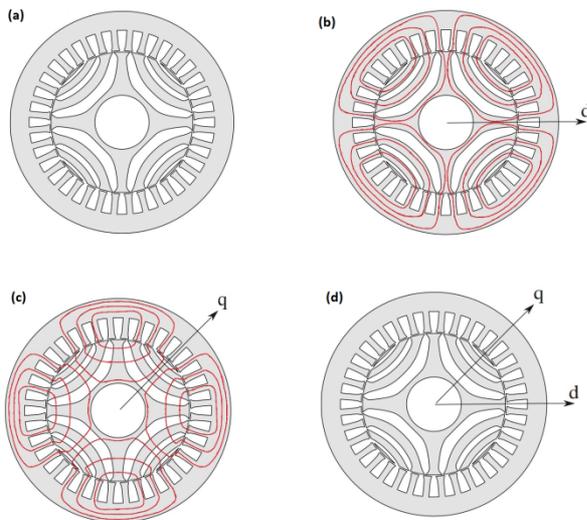
Para a máquina MSR de quatro pólos desenhada na Figura 3a, existem dois caminhos de fluxos diferentes no rotor. Um deles é um caminho de alta permeabilidade, veja na Figura 3b, onde as linhas de fluxo fluindo nos caminhos de ferro do rotor, paralelas às barreiras de fluxo. É comumente referido como o caminho do eixo  $d$ . O segundo é um caminho de baixa permeabilidade, veja a Figura 3c, uma vez que as

\*thiagosilper@gmail.com

linhas de fluxo têm que atravessar as barreiras de fluxo do rotor. É comumente referido como o caminho do eixo  $q$ . O quadro final de referência  $dq$  é mostrado na Figura 3d.

O rotor é projetado com várias barreiras de fluxo, a fim de impedir o fluxo ao longo do eixo  $q$  e alcançar uma alta taxa de saliência, isto é, um componente de torque de alta relutância. No entanto, as pontes de ferro permanecem (nas extremidades e, às vezes, no meio de cada barreira) para sustentar mecanicamente as partes do rotor. Uma parte do fluxo do eixo  $q$  flui através dessas pontes, com a consequente redução do torque.

Fig. 3. Esboço de um motor de relutância síncrona [2].



Portanto o interesse de se fazer um estudo e apresentar os resultados, levando as principais características do MSR-aIP principalmente dos ímãs a serem utilizados no rotor e a sua geometria, é o foco deste trabalho.

## II. MOTOR SÍNCRONO À RELUTÂNCIA AUXILIADO POR ÍMÃ PERMANENTE

### A. Estator

O estator para o MSR-aIP será o mesmo do motor de indução trifásico, como apresentando na Figura 4, sendo os dados de placa sendo apresentados na Tabela I.

Fig. 4. Estator do MSR-aIP.

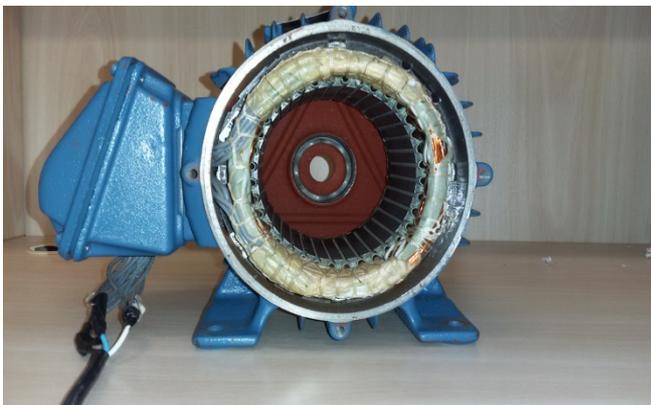
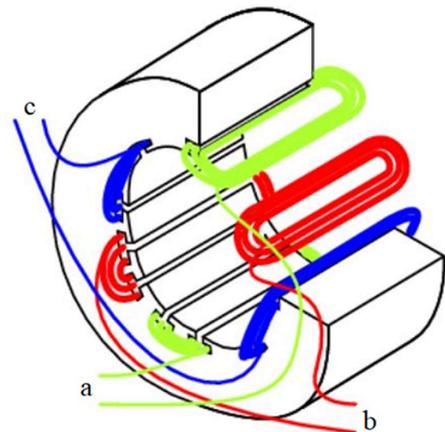


Tabela I - Dados de Placa do Estator do MIT

Dado de placa	Valor
kW(HP-cv)	1.5 (2.0)
Carcaça	90S
Fabricante	WEG
Linha	W22 Plus
Tensão	220/380/440
Corrente	5.98/3.46/2.99
Ip/In	7.1
Rendimento (%)	84.2

As bobinas responsáveis pelo campo girante são dispostas entre si em 120 graus elétricos no espaço ao redor da circunferência de entreferro do estator conforme ilustra a Figura 5.

Fig. 5. Enrolamentos do estator trifásico [3].



Tendo como ponto de partida para este trabalho a Figura 1c e Figura 1d, onde se tem a intenção de inserir ímãs permanente (IP) dentro do rotor síncrono à relutância, há uma preocupação de fazer um estudo teórico sobre os diferentes materiais conhecidos, que podem ser utilizados para melhorar as características de uma MSR.

Embora o conceito de montagem de IPs, em rotores giratórios para produzir motores elétricos e geradores seja anterior ao século 20, a implantação comercial de máquinas síncronas com IP teve que aguardar o desenvolvimento de materiais magnéticos com densidade de fluxo remanescente suficiente e coercividade para torná-los práticos.

Um dos primeiros materiais magnéticos permanentes que foi desenvolvido com densidade de fluxo remanescente suficiente para atrair atenção para materiais de máquinas elétricas foi o aço cobalto magnético, que se tornou comercialmente disponível na proximidade de 1920 com um produto de energia de aproximadamente 1 MGOe (Mega-Gauss Oersted) [2]. Como vários dos primeiros materiais magnéticos, sofreu com baixos valores de coercividade, tornando-o desafiador para uso em projetos práticos de máquinas.

Os materiais magnéticos melhoraram durante as décadas seguintes, com o desenvolvimento de uma família de diferentes ligas de ímã de Alnico com produtos de energia que atingiram 10 MGOe durante um período de 30 anos, que se estende de 1931 a 1960 [2]. Embora os ímãs do Alnico tenham sofrido com valores baixos de coercividade,

engenheiros se preocuparam em projetar máquinas de alto desempenho que poderiam tolerar essa limitação.

Os ímãs permanentes de cerâmica de Ferrite tornaram-se comercialmente disponíveis na década de 1960 como uma alternativa de menor custo para ímãs metálicos [3]. No entanto, a densidade de fluxo remanescente de ímãs cerâmicos está próximo de 0,4 T, ou seja, menos da metade do valor correspondente de  $B_r$  para ímãs Alnico ou classes mais recentes de ímãs de terras raras. No entanto, o baixo custo dos ímãs de ferrite combinados com os outros recursos atraentes, incluindo uma excelente resistência à corrosão, levou o seu enorme sucesso comercial. De fato, os ímãs cerâmicos hoje representam mais de 75% de todo o consumo de ímãs no mundo com base na massa de ímã produzida.

Os ímãs de Ferrite tornaram-se candidatos atraentes para uso em máquinas síncronas IP, logo depois que o material magnético ficou disponível há mais de 50 anos. Eles foram aplicados com sucesso em uma grande variedade de topologias de máquinas IP, incluindo configurações de ímã de superfície e interior. Embora as máquinas IP que usem ímãs de Ferrite não possam competir com projetos que usam ímãs de Ferrite mais recentes de ímãs sinterizados de terras raras em aplicações que exigem um maior torque/densidade de potência possível, o uso de ímãs de Ferrite continua a chamar a atenção dos projetistas de máquinas atuais por causa de sua ampla disponibilidade e baixo custo [4].

A disponibilidade comercial de ímãs de terras raras de alta resistência, começando com os ímãs Samário-Cobalto ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) na década de 1970, seguidos pelos ímãs de Neodímio-Ferro-Boro ( $\text{NdFeB}$ ) nos anos 80 [5], tornou possível alcançar valores significativamente mais altos de torque e densidade de potência com máquinas síncronas IP [6], porém sofrem com a volatilidade dos preços praticados pelos fabricantes dos materiais magnéticos.

Como resposta a esse cenário de aumento fora do comum de preços e seguido de queda, houve uma preocupação em iniciar uma investigação da viabilidade do desenvolvimento de tipos alternativos de máquinas que proporcionariam um desempenho comparativamente alto sem estarem tão expostos à volatilidade de futuros balanços de preços para os ímãs de Neodímio-Ferro-Boro ( $\text{NdFeB}$ ) e com isso, o motor síncrono a relutância auxiliada por ímã permanente, (MSR-aIP), se mostra interessante, visando ser utilizado em grande escala e com baixo custo.

Os setores que mais se interessam pela concepção, desenvolvimento e aprimoramento do MSR-aIP é a que envolvem tração elétrica, como por exemplo a indústria automobilística.

### III. A ASSISTÊNCIA DO IMÃ PERMANENTE (IP)

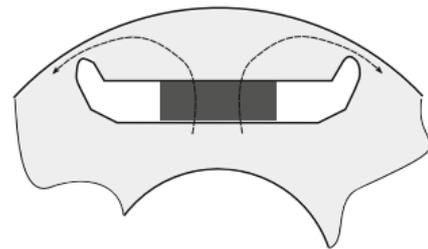
Como descrito acima com base em pesquisas bibliográficas, existem várias vantagens quando os ímãs permanentes (IPs) são inseridos dentro das barreiras de fluxo do rotor. A Figura 4 mostra um exemplo desta ação, na etapa da montagem do rotor: o IP será inserido na barreira de fluxo do rotor.

Fig. 4. IPs sendo inseridos na barreira de fluxo do rotor MSR. Fonte N. Bianchi [1].



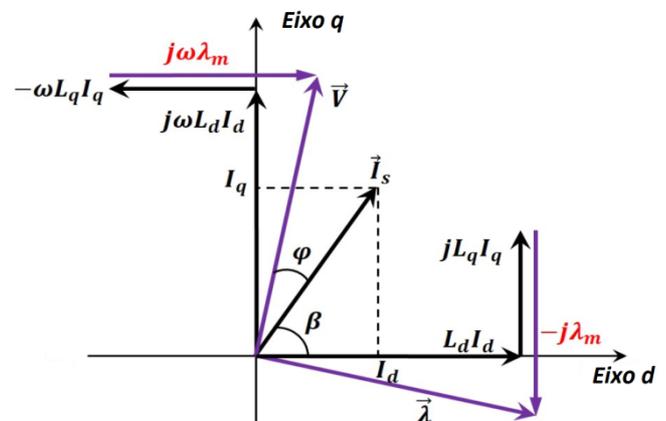
Uma parte do fluxo do IP tende a saturar a ponte de ferro no rotor, como mostra a Figura 5. Tal saturação implica uma redução benéfica de  $L_q$  [8]. Além disso, o IP adicionado ao longo do eixo  $q$  negativo compensa o fluxo negativo  $L_q I_q$ . Referindo-se ao diagrama vetorial mostrado na Figura 6, o efeito do fluxo concatenado IP é girar o vetor do fluxo concatenado fora de fase em relação ao vetor atual. Como o vetor de tensão é girado em direção ao vetor atual, o fator de potência aumenta.

Fig. 5. Parte do fluxo de IP flui para as pontes de ferro. Fonte N. Bianchi [1].



Portanto, o motor MSR-aIP requer uma classificação Volt-Ampere menor para determinada potência mecânica nominal. Finalmente, o torque eletromagnético do motor aumenta, porque um termo de torque IP é adicionado ao torque de relutância.

Fig. 6. Diagrama vetorial do motor MSR-aIP



Onde,  $d$  e  $q$  representam os eixos,  $\vec{\lambda}$  representa o fluxo concatenado,  $L_d$  e  $L_q$  são as indutâncias,  $I_d$  e  $I_q$  são correntes,  $\omega$  é a velocidade angular elétrica.

#### IV. METODOLOGIA

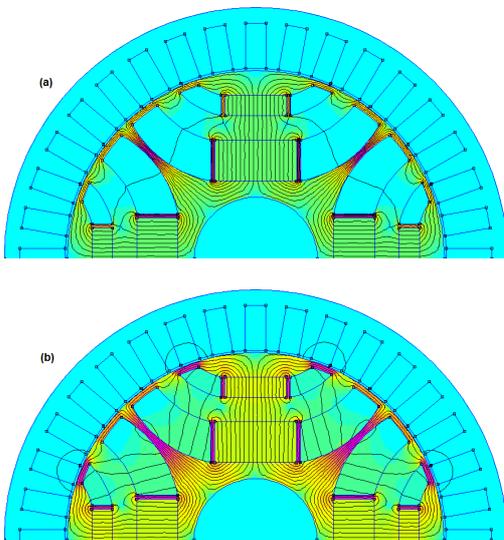
Como as dimensões do estator já conhecidas, foi feito o desenho em CAD<sup>®</sup> do eixo do rotor desta máquina. Para a análise do fluxo magnético para os diferentes tipos de ímãs como também para assegurar a melhor geometria do rotor, foi utilizado o *software* de elementos finitos FEMM<sup>®</sup>.

Foi feito vários estudos, tanto variando a geometria do rotor, como a disposição e o tipo de ímã. As opções dos ímãs de análise foram o de Ferrite e do NdFeB.

##### A. Primeiro Caso de Estudo

Na primeira situação, a concepção das barreiras de fluxos (primeira e segunda) foram projetadas em formato de arco. Para a Figura 5a o ímã usado foi o Ferrite e na 5b o NdFeB.

Fig. 5. (a) Ferrite (b) NdFeB

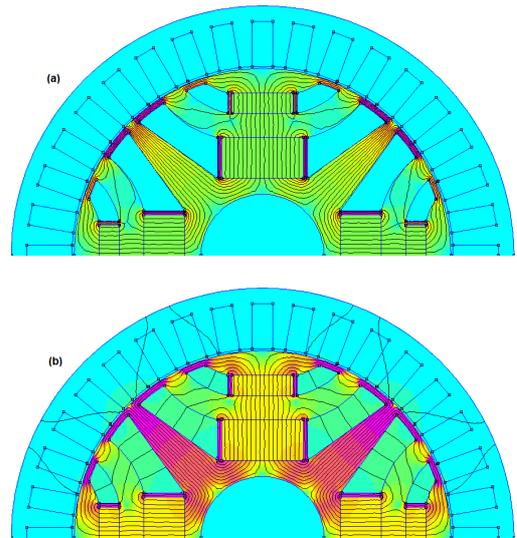


Note que a densidade de fluxo usando o NdFeB é mais forte do que o de Ferrite, porém em ambos os casos houve um fluxo magnético indesejado dentro das barreiras, o que representa uma redução de torque indesejada no qual foi maior quando o ímã era o NdFeB.

##### B. Segundo Caso de Estudo

O intuito de mudar a geometria do rotor é fazer com que não aja fluxo indesejado nas barreiras de fluxo, fazendo com que o rotor alcance uma alta taxa de saliência. Para essa mudança foi alterada apenas a primeira barreira, onde passou da forma de arco para uma reta. Isso fez com que as barreiras de um polo se afastassem do outro, conforme apresentando na Figura 6.

Fig. 6. (a) Ferrite (b) NdFeB

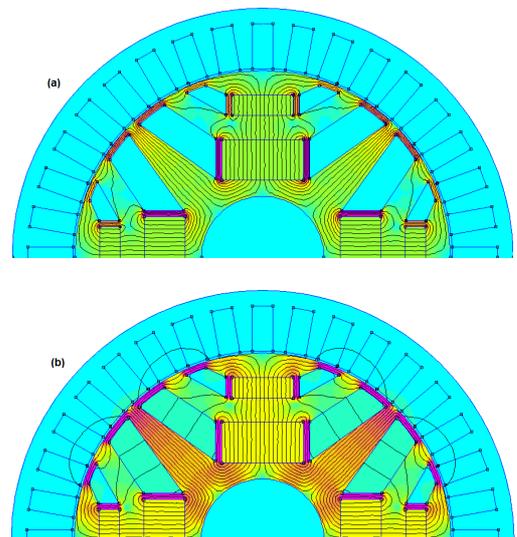


Note que no caso da Figura 6a o efeito indesejado foi sanado quando o ímã utilizado foi o Ferrite. No caso da Figura 6b mesmo com a alteração da geometria das barreiras o ímã de NdFeB devido a sua alta densidade continua não sendo o mais indicado.

##### C. Terceiro Caso de Estudo

As mudanças na geometria do rotor agora foram aplicadas tanto na primeira como na segunda barreira de fluxo, conforme apresentado na Figura 7.

Fig. 7. (a) Ferrite (b) NdFeB

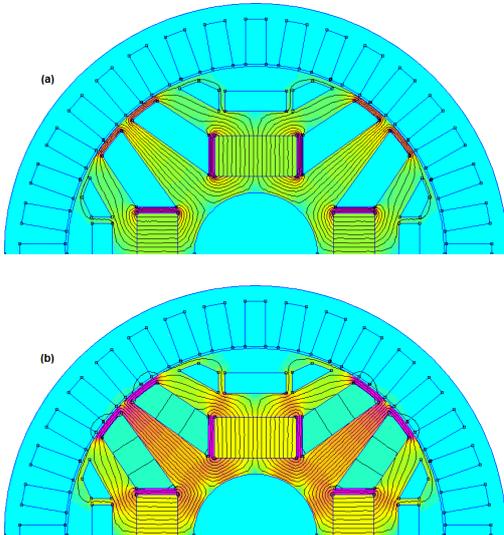


Note que no caso da Figura 7a não houve mudança de comportamento do fluxo magnético para o caso anterior, porém no da Figura 7b continua havendo fluxo passando por dentro da barreira, porém neste caso apenas na barreira mais interna do eixo.

#### D. Quarto Caso de Estudo

Foi mantida a geometria do caso anterior e foi retirado o ímã da segunda barreira de fluxo, conforme apresentando na Figura 8.

Fig. 8. (a) Ferrite (b) NdFeB

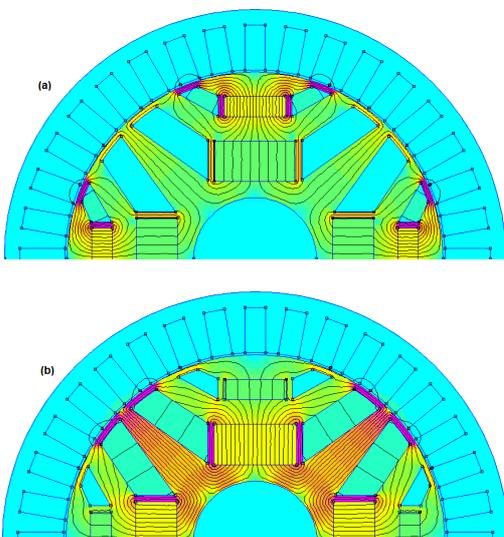


Foi observado que a retirada dos ímãs da segunda barreira de fluxo não provocou grandes mudanças no comportamento do efeito magnético no rotor, onde o objetivo de alcançar uma alta taxa de saliência continua mais evidente quando se utiliza o ímã de Ferrite.

#### E. Quinto Caso de Estudo

Foi idealizado o comportamento desta máquina, porém utilizando ímãs híbridos, ou seja, mantendo a geometria do caso anterior mas agora colocando o ímã de Ferrite na primeira barreira de fluxo e o de NdFeB na segunda barreira, conforme Figura 9<sup>a</sup>. Na Figura 9<sup>b</sup> ocorreu o inverso, ou seja, na primeira barreira o de NdFeB e na segunda o Ferrite.

Fig. 9. (a) Ímã de Ferrite na 1<sup>a</sup> barreira e de NdFeB na 2<sup>a</sup>. (b) Ímã de NdFeB na 1<sup>a</sup> barreira e de Ferrite na 2<sup>a</sup>.



Em ambos os casos houve presença de fluxo magnético no interior das barreiras de fluxo, o que ocasiona uma redução de torque do motor.

#### V. CONCLUSÕES

O MSR-aIP apresenta dois torques, sendo o de relutância e o magnético. Este estudo foi apenas da contribuição magnética dos dois tipos de ímãs mais usualmente encontrados no mercado, como também a observação que pequenas mudanças na geometria do rotor são capazes de fazer grandes diferenças no comportamento magnético do MSR-aIP, e com isso afeta diretamente a parcela do torque magnético.

Foi observado e comprovado que a primeira barreira de fluxo é a mais importante do conjunto, apresentando características que a torna responsável pela maior parcela do fluxo magnético, sendo que a inserção de ímãs na segunda barreira não tornaria o torque magnético muito superior, e sim apenas tornaria a construção do MSR-aIP mais caro.

Trabalhar com ímãs de diferentes densidades magnéticas juntos, não se tornou uma opção viável no momento, porém não foi descartado o aprofundamento de mais estudos para esta situação.

#### REFERÊNCIAS

- [1] N. Bianchi. *Synchronous reluctance and interior permanent magnet motors*. In Proc. of IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) 11-12 March 2013.
- [2] T. A. Huynh; M. Hsieh; K. Shih; H. Kuo. *Design and analysis of permanent-magnet assisted synchronous reluctance motor*. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 2017.
- [3] ILTEC; “Motor Trifásico e Motor Monofásico. Como Funciona?”. Disponível em: <https://www.iltec.com.br/noticias/motor-trifasico-e-motor-monofasico-comofunciona/> publicado em 13/08/2015. Último acesso em: 01/03/2018.
- [4] C. Babetto, G. Bacco and N. Bianchi: *Synchronous Reluctance Machine Optimization for High Speed Applications*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018.
- [5] N. Bianchi. *Analysis of the IPM motor—Part I, analytical approach*. In: Bianchi, N., Jahns T.M. (eds.) Design, Analysis, and Control of Interior PM Synchronous Machines. IEEE IAS Tutorial Course Notes, IAS Annual Meeting, CLEUP, Seattle, October 3, 2005, Chapter 3, pp. 3.1–3.33. info@cleup.it