



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO MOTOR SÍNCRONO A ÍMÃ
PERMANENTE COM PARTIDA DIRETA A REDE ELÉTRICA**

Campina Grande

2018

THALES DE AGUIAR TAVARES

**ESTUDO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO MOTOR SÍNCRONO A ÍMÃ
PERMANENTE COM PARTIDA DIRETA A REDE ELÉTRICA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor: Ronimack Trajano de Souza

Campina Grande

2018

THALES DE AGUIAR TAVARES

**ESTUDO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO MOTOR SÍNCRONO A ÍMÃ
PERMANENTE COM PARTIDA DIRETA A REDE ELÉTRICA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Aprovado em: ___/___/___

André Dantas Germano

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Ronimack Trajano de Souza

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

Dedico este trabalho aos meus pais, José Tavares e Maria José, à minha irmã, Tamara Tavares, aos meus irmãos Thiago Tavares e Túlio Tavares, à minha namorada, Bruna Ribeiro e a todos os familiares e amigos que torceram por mim nesta difícil caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que se faz presente em minha vida e que pôde me propiciar tudo o que alcancei.

Agradeço aos meus pais, José Tavares da Silva e Maria José de Aguiar Tavares, que apesar de todas as dificuldades sempre me apoiaram e se esforçaram para que eu alcançasse meus objetivos.

Agradeço a todos da minha família e em especial à minha irmã Tamara Aguiar, meu cunhado Alberto Mascarenhas e minha tia Valmeisa por sempre se preocuparem com meu andamento nos estudos e todos os momentos de dificuldades acadêmicas que passei.

Agradeço aos meus amigos, por sempre estarem juntos comigo estudando de dia e de madrugada, com todas as descontrações necessárias para suportar todas as tensões de provas e trabalhos acadêmicos.

Agradeço a todos os meus professores do IFPB e UFCG que me passaram todo o conhecimento necessário para estar hoje concluindo um curso que tanto me identifiquei.

Agradeço aos professores Eisenhower de Moura Fernandes e Ronimack Trajano de Souza pela orientação e ensinamentos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram, seja dentro na vida acadêmica ou pessoal.

RESUMO

O motor síncrono a ímãs permanentes com partida direta a rede elétrica (Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor – LSPMSM) é uma máquina síncrona que apresenta uma gaiola-de-esquilo no rotor onde estão alocados os ímãs permanentes. Esse motor combina características do motor de indução trifásico quando funcionando abaixo da velocidade síncrona e ainda características do motor síncrono a ímã permanente convencional quando atinge a velocidade síncrona. Por se tratar de um motor síncrono a ímã permanente, o motor a ímã LS-PMSM apresenta a característica de elevada relação potência/volume e eficiência, apresentando-se como alternativa para aplicações industriais que utilizem o motor de indução trifásico, resultando em economia de energia da rede de alimentação. Neste cenário, é importante o estudo de estratégias de controle de velocidade do motor síncrono a ímã permanente LS-PMSM. Este trabalho tem por objetivo realizar o estudo de um sistema de acionamento do motor a ímã permanente LS-PMSM. Resultados de simulação do sistema de acionamento do motor LS-PMSM são apresentados para operação de partida a rede elétrica.

Palavras-chave: Motor Síncrono Ímã Permanente com Partida Direta; Controle de Máquinas Elétricas.

ABSTRACT

Rotor position estimation for Permanent-Magnet Synchronous Motors (PMSM) is important investigation area due to the increasing application of synchronous machines in industrial environment, hybrid vehicles, electric vehicles and wind-energy generation. High-performance applications of AC machines demand the knowledge or estimation of parameters such as magnetic flux, speed and rotor position. For this scenario, it is important the study of strategies for rotor position/speed estimation aiming the self-sensing control of the motor. This Project presents the study of speed control system for a PMSM motor. A preliminary study of rotor position estimation techniques based on high-frequency injection is addressed suitable for low-speed applications. Simulation results for speed control operation and mechanical load variation are presented.

Keywords: Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor; Motor Drives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aumento do Consumo de energia elétrica no Brasil.....	12
Figura 2. Elementos construtivos do Motor Síncrono a Ímã Permanente.....	16
Figura 3 Rotor de Ímãs Permanentes.....	17
Figura 4. Formas Construtivas do Rotor a Ímã Permanente	18
Figura 5 Elementos Principais do Motor de Indução.....	20
Figura 6 Configurações do Rotor da Máquina de Indução.....	20
Figura 7 Motor LSPMSM e seus elementos constituintes	21
Figura 8 Rotor a ímãs permanentes e rotor de indução	22
Figura 9 Aplicações industriais de motores síncronos a ímã permanente LS-PMSM (a) bobinadoras de papel, (b) compressores.....	23
Figura 10 esquema de ligação do motor LSPMSM monofásico.....	24
Figura 11 Representação de uma máquina PMSM	29
Figura 12 Inversor Fonte de Tensão	35
Figura 13 Modulação PWM	37
Figura 14 Sistema de acionamento de um motor	38
Figura 15 Geração do Sinal PWM, Simulink.....	39
Figura 16 Inversor Fonte de Tensão controlado pelo sinal PWM gerado.....	39
Figura 17 Tensões de referência para geração do PWM (a), Correntes nas Carga RL.	40
Figura 18 Levantamento do controle de Velocidade da máquina de Indução.....	41
Figura 19 Levantamento do controle de Velocidade do Motor Síncrono a Ímã Permanente. .	43
Figura 20 Levantamento do controle de Velocidade do Motor Síncrono a Ímã Permanente. (Vista Detalhada).....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Evolução da Matriz Energética Brasileira	13
Tabela 2 Parâmetros do Motor de Indução (Norma).....	42
Tabela 3 Parâmetros do Motor Síncrono a Ímã Permanente	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LSPMSM	Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PM	Ímã Permanente
SIN	Sistema Internacional Interligado
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
FCEM	Força Contra Eletromotriz
FEM	Força Eletromotriz
USJT	Universidade São Judas Tadeu
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
IGBT	Transistor bipolar de efeito de campo
MIT	Máquina de Indução Trifásica
PLL	Malha de captura de fase
PWM	Modulação por largura de pulso
VCC	Tensão do barramento CC
Hz	Hertz
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico

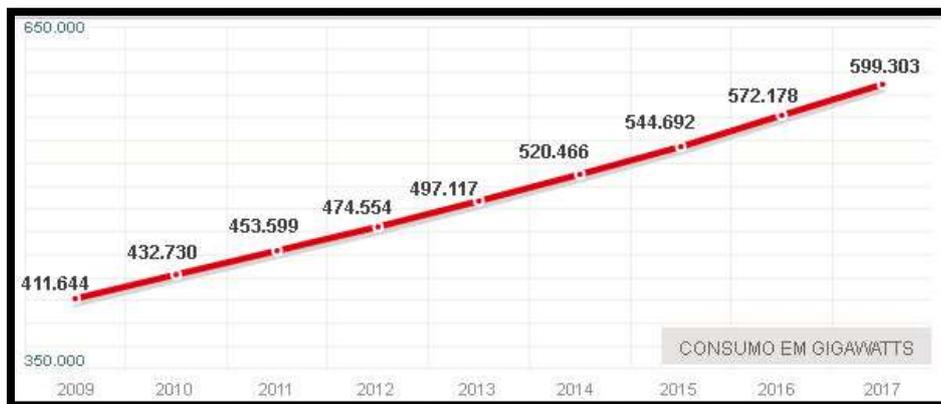
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS A ÍMÃ PERMANENTE	16
2.2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO.....	19
2.3.1 Vantagens do LSPMSM	24
2.3.2 Desvantagens do LSPMSM.....	25
2.3.3 A literatura do motor LSPMSM	26
3. MODELAGENS MATEMÁTICAS	29
3.1 MODELO MATEMÁTICO DO MOTOR SÍNCRONO A ÍMÃ PERMANENTE	29
3.2 MODELO MATEMÁTICO DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	32
4. INVERSOR FONTE DE TENSÃO	35
4.1 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS (PWM)	36
5. MATERIAIS E MÉTODOS	38
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Com o constante aumento do consumo de energia nos últimos anos, o racionamento de energia ou até mesmo a interrupção temporária do fornecimento são práticas comuns. O aumento de demanda de energia não significa apenas risco de queda na qualidade da geração, mas também tem impactos negativos no meio ambiente, principalmente na forma de poluição e potencialização do aquecimento global [1]. A Figura 1 apresenta o constante aumento da carga energética brasileira.

Figura 1. Aumento do Consumo de energia elétrica no Brasil



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2017

Alguns países têm optado pela utilização de meios alternativos de geração de energia de forma a reduzir o impacto ambiental, tais como eólica, solar, geotérmica, maremotriz e outras [30]. A Tabela 1 apresenta a evolução da matriz energética brasileira, os dados de crescimento foram baseados no programa de expansão da oferta de geração definidos pela ONS.

Tabela 1. Evolução da Matriz Energética Brasileira

TIPO	2016		2021		Crescimento 2016-2021	
	MW	%	MW	%	MW	%
Hidráulica (1)	101.598	71,5	113.784	68,3	12.186	12,0
Nuclear	1.990	1,4	1.990	1,2	-	0,0
Gás/GNL	12.414	8,7	14.518	8,7	2.104	16,9
Carvão	3.174	2,2	3.478	2,1	304	9,6
Biomassa	7.640	5,4	8.313	5,0	673	8,8
Outros (2)	867	0,6	1.308	0,8	441	50,9
Óleo Combustível/Diesel	4.732	3,3	4.732	2,8	-	0,0
Eólica	9.611	6,8	16.205	9,7	6.594	68,6
Solar	16	0,0	2.182	1,3	2.166	-
Total	142.042	100	166.540	100	24.498	17,2

Fonte: ONS, 2018

Há anos os governos têm tentado estimular práticas de redução de consumo tanto para usuários domésticos como para instalações industriais e comerciais. Uma das formas de estímulo para o uso de equipamentos mais eficientes é a redução das taxas de impostos sobre produtos que apresentem níveis de consumo abaixo de certos patamares pré-estabelecidos ou por meio de medidas que possibilitem que o consumidor saiba o nível de eficiência dos produtos que está comprando, como exemplo o selo PROCEL no Brasil.

Boa parte da energia consumida em residências é gasta em motores elétricos, em sua maioria motores de indução monofásicos presentes em equipamentos comuns como: refrigeradores, máquinas de lavar, entre outros. Já nas indústrias o percentual de energia consumida pelos motores elétricos de indução é bem mais significativo, chegando a mais da metade do consumo total [2]. Isso mostra a grande importância do desenvolvimento de técnicas que possam reduzir o consumo dos motores de indução, com o mínimo impacto em custo e/ou investimento, o que conduz a algumas alternativas como: uso de materiais mais nobres, uso de controles e acionamentos eletrônicos e utilização de ímãs permanentes

Dentre estas alternativas, o uso de ímãs em motores de indução reduz significativamente a magnitude da corrente de carga, por meio da redução das perdas no rotor devido às correntes na gaiola em regime. Porém, o aumento do custo devido à utilização dos ímãs é considerável e pode ser inviabilizado em alguns casos. Esta solução normalmente é

usada quando o uso de materiais mais nobres não é possível, seja pelo aumento demasiado do custo ou por restrições do processo de fabricação [3].

O objeto de estudo desse trabalho consiste em um motor síncrono a ímã permanente com partida direta à rede elétrica (LS-PMSM - Line Start - Permanent-Magnet Synchronous Motor), no qual é adicionada uma gaiola-de-esquilo ao rotor com ímãs permanentes, tornando-a uma máquina considerada híbrida [6]. Dessa forma, esse motor combina características do motor de indução trifásico quando funcionando abaixo da velocidade síncrona, devido a gaiola de esquilo, e ainda características do motor síncrono a ímã permanente convencional quando atinge a velocidade síncrona, onde a variação da velocidade síncrona atingida vai ser mínima, mesmo com a variação de carga acoplada ao eixo da máquina. Por se tratar de um motor síncrono a ímã permanente, o motor a ímã LS-PMSM apresenta a característica de elevada relação potência/volume sendo utilizado em aplicações industriais, em especial, substituindo a utilização do motor de indução trifásico [8].

Com base no exposto, o estudo do funcionamento do motor LSPMSM se mostra bastante importante para viabilizar um maior crescimento de práticas que tendam a diminuir o consumo de energia elétrica no mundo.

1.1 OBJETIVOS

O Trabalho de Conclusão de Curso terá por objetivo realizar um estudo do funcionamento do motor LS-PMSM - Line Start - Permanent-Magnet Synchronous Motor, visando apresentar suas principais características de acionamento, além da maior eficiência comparado ao uso do motor de indução.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho se inicia com a apresentação do motor síncrono a ímã permanente, mostrando toda a sua estrutura, funcionamento e importância. Em sequência é apresentado o motor de indução, com suas respectivas características de funcionamento e finalizando o capítulo será apresentado o motor LSPMSM ressaltando suas similaridades aos motores anteriormente mencionados.

Em seguida, o capítulo 3 descreve os modelos matemáticos dos motores apresentados, que são de extrema importância para a realização de simulações que evidenciarão o funcionamento destes equipamentos. O capítulo 4 descreve o principal elemento constituinte do sistema de acionamento de motores, o Inversores Fonte de Tensão acompanhado do sistema de geração de sinal PWM, responsável por controlar o sistema de acionamento.

Por fim, com base em toda a literatura acerca do funcionamento do motor LSPMSM serão apresentadas simulações que representam o acionamento do motor em maneira síncrona e assíncrona, mostrando assim de forma efetiva as vantagens em fazer uso deste motor em relação aos motores elétricos de indução.

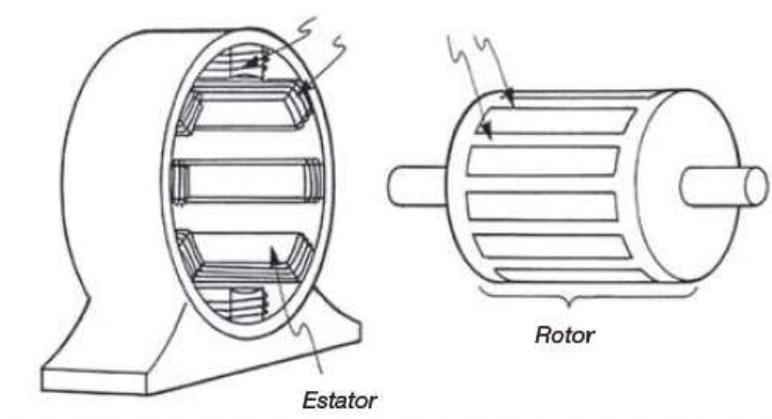
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS A ÍMÃ PERMANENTE

A Máquina Síncrona a Ímã Permanente PMSM consiste em uma máquina síncrona convencional na qual o enrolamento de campo do rotor é substituído por um ímã permanente, retirando assim a necessidade de excitação por fonte externa no rotor. Com a utilização de ímãs permanentes neste tipo de motor, foi possível promover uma redução das perdas no rotor, isso significou redução do volume e um aumento na sua eficiência. [31].

Os principais componentes de uma Máquina PMSM podem ser vistos na figura 2, são eles:

Figura 2. Elementos construtivos do Motor Síncrono a Ímã Permanente



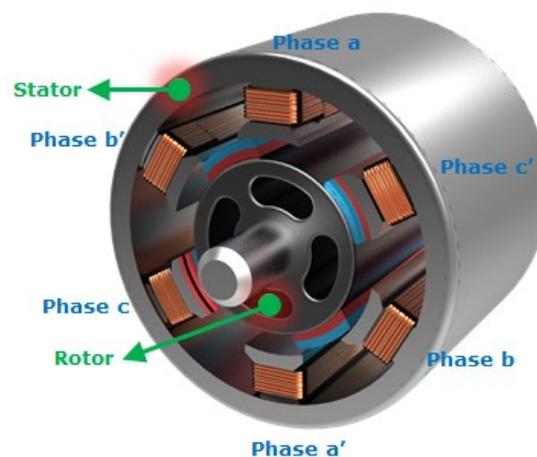
Fonte: Mekatronik, 2018

- **Estator:** Referente à parte estacionária da máquina e inclui os seguintes elementos:
 - **Lâminas do Estator:** São elementos que unidos formam a pilha do estator, principal parâmetro para o dimensionamento eletromagnético de uma máquina.
 - **Enrolamento da Armadura:** Elemento que após energizado gera um

campo magnético no estator, responsável pelo funcionamento da máquina.

- **Entreferro:** Compreende a região entre o estator e o rotor, geralmente preenchida por ar, tende a ser projetada de maneira que promova uma pequena distância entre os demais elementos, aumentando assim a eficiência dos ímãs, por consequência o rendimento da máquina.
- **Rotor:** O rotor, representado na Figura 3, é o principal elemento girante da máquina, onde está presente o ímã permanente, como visto na figura, é composto pelos seguintes elementos.:
 - Estruturas de Pólos: Ímãs e componentes magnéticos.
 - Coroa do rotor
 - Eixo e sistema de rolamento.

Figura 3 Rotor de Ímãs Permanentes

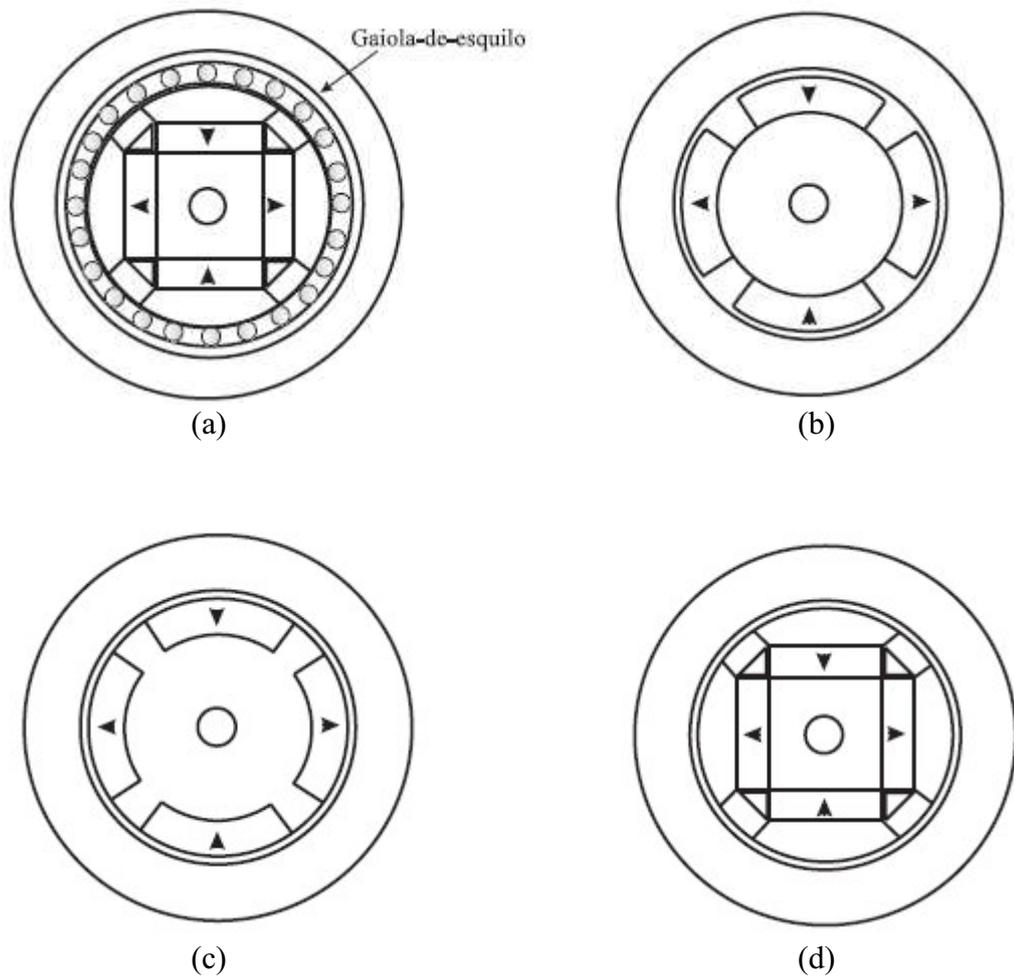


Fonte: Functionbay, 2018

As máquinas síncronas a ímãs permanentes podem ser construídas sob as mais diversas variações. Em geral, podem ser classificadas das seguintes formas:

- Ímãs montados no núcleo do rotor com gaiola-de-esquilo (Figura 4 (a));
- Ímãs montados na superfície do rotor (surface mounted magnets) (Figura 4 (b));
- Ímãs implantados no núcleo do rotor (inset magnets) (Figura 4 (c));
- Ímãs alocados no interior do rotor (interior magnets) (Figura 4 (d));

Figura 4. Formas Construtivas do Rotor a Ímã Permanente



Os motores PMSM vêm ao longo dos anos se destacando em suas diversas aplicações, isto pode ser explicado primeiramente pelos grandes avanços nos estudos de materiais magnéticos, a escolha correta dos materiais a serem utilizados nos projetos e também aos circuitos e controladores presentes em seus acionamentos [9].

Outra vantagem que podemos identificar nos motores PMSM é possibilidade de controle da velocidade através do número de polos em seu interior. Assim, para motores de indução de 2 polos e em 60 Hz, a velocidade é inferior a 3600 rpm e em 50Hz, inferior a 3000rpm, devido ao seu escorregamento.

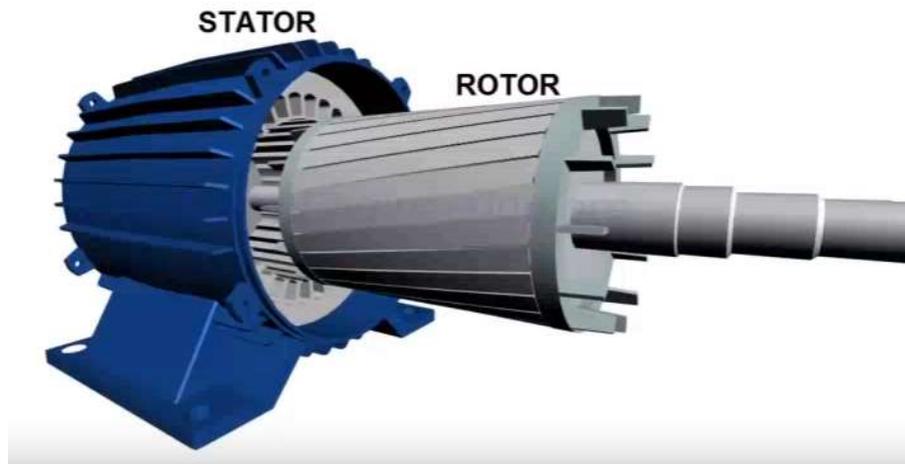
Com a possibilidade de trabalho em rotações menores que 3600 rpm, o motor PMSM apresenta ruído e vibração menores, além de poder ser projetado para trabalhar com eficiências maiores nestes pontos de velocidade inferior. No ponto nominal, possuem eficiência em torno de 75% e em outros pontos específicos de carga podem alcançar uma eficiência de 2 a 3 vezes maior quando comparado ao de indução. Estes dois pontos se destacaram na escolha do desenvolvimento do motor PMSM: o aumento da eficiência e a diminuição do ruído [10].

2.2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO

Atualmente a máquina de indução são as mais utilizadas na indústria [1]. Em geral as máquinas de indução possuem baixo custo quando comparadas as demais alternativas disponíveis no mercado, principalmente as máquinas de corrente contínua. Isso se deve ao fato de não possuir comutador o que a torna uma máquina de construção mais simples. Possui vantagens em aplicações de boa eficiência em uma estreita faixa de velocidades, podendo ser empregada numa grande quantidade de aplicações. Ainda assim, sua maior vantagem é o baixo custo, seu preço é o maior atrativo para a indústria em geral.

A máquina de indução é composta basicamente pelos mesmos elementos presentes no motor PMSM apresentado anteriormente, são eles, estator e rotor, vistos na Figura 5. O nome desta máquina deriva do fato das correntes alternadas serem induzidas no rotor pelo campo magnético girante produzido no estator.

Figura 5 Elementos Principais do Motor de Indução

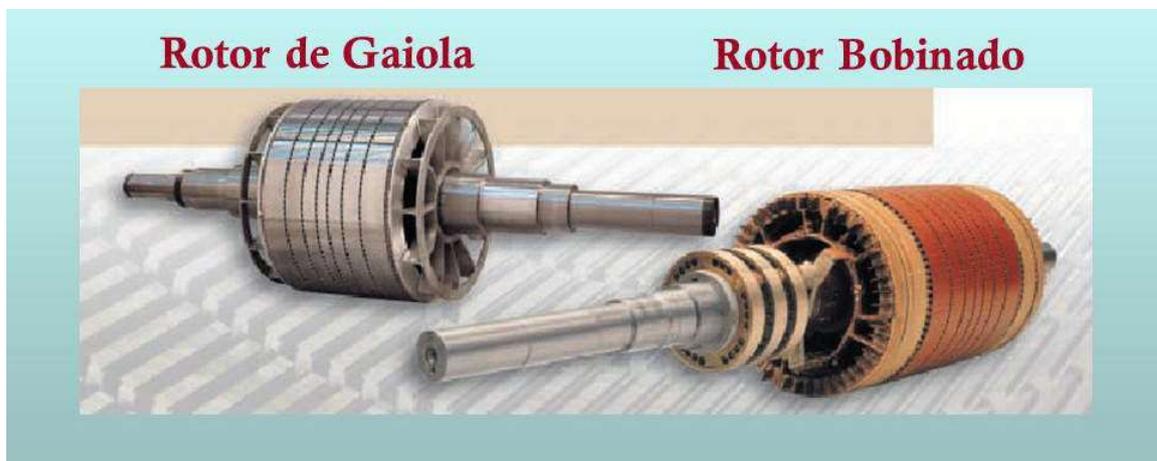


Fonte: Eng Easier, 2017

A aplicação de tensão alternada nos enrolamentos do estator produz campos magnéticos pulsantes que geram um campo magnético resultante girante com a frequência da rede. O fluxo magnético no estator induz tensão alternada no enrolamento trifásico do rotor que produz um fluxo magnético no rotor que tentará se alinhar com o campo magnético girante do estator.

Existem dois tipos de máquinas de indução e eles diferem na configuração do rotor: rotor em gaiola e rotor bobinado, como visto na Figura 6. O motor com rotor em gaiola é o mais comum principalmente em virtude do menor preço.

Figura 6 Configurações do Rotor da Máquina de Indução



Fonte: USJT, 2014

O motor de indução, diferente de outros motores, apresenta escorregamento, ou seja, o rotor gira com rotação levemente mais baixa que o campo girante do enrolamento de armadura. Se o rotor girasse com a mesma velocidade do campo girante não haveria tensão induzida no rotor e assim ele iria perder velocidade.

O motor de indução possui uma estreita faixa de velocidades junto com uma alta eficiência em altas velocidades. Um ponto negativo é o fato da corrente de magnetização necessária e das perdas ôhmicas no rotor reduzirem a eficiência, que diminui na faixa nominal de velocidades em comparação com o motor de ímãs permanentes.

2.3 O MOTOR LSPMSM

O motor síncrono a ímã permanente conectado à rede (LSPMSM – Line Start Permanent-Magnet Synchronous Motor) consiste na composição de um rotor com ímãs permanentes (elemento característico das máquinas síncronas a ímã permanente), envolto pela gaiola de esquilo, esta pertencente aos motores de indução, tornando assim um motor considerado híbrido [6].

Com o objetivo de proporcionar um motor a ímãs permanentes que funcionasse sem o auxílio de um sistema de acionamento, foi adicionada uma gaiola de esquilos ao rotor para que o mesmo, quando conectado à rede, possa produzir um torque assíncrono suficiente para garantir a partida do motor e também para suprimir o fluxo de sequência negativa [8] [13]. A Figura 7 apresenta os elementos constituintes do motor LSPMSM.

Figura 7 Motor LSPMSM e seus elementos constituintes

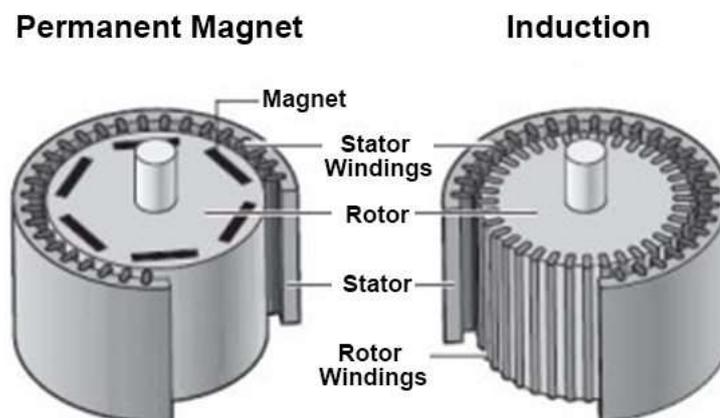


Fonte: Ugur Demir, 2017

O funcionamento do motor LSPMSM pode ser entendido da seguinte forma, durante a partida, correntes são induzidas na gaiola do rotor. Estas correntes, por sua vez, produzem um campo magnético que interage com o campo do estator gerando assim torque assíncrono responsável por acelerar o motor. Quando o rotor atinge velocidade próxima à velocidade síncrona, considerando que a carga e também a inércia não sejam elevadas, o campo do rotor entra em sincronismo com o campo gerado pelo estator. Após a sincronização, as correntes induzidas na gaiola do rotor desaparecem e conseqüentemente o torque assíncrono é eliminado. Logo, o motor atua como um motor síncrono em regime [16]. Esta combinação permite a operação em regime permanente do LSPMSM sem a necessidade de um módulo eletrônico [13].

Dessa forma, esse motor combina características do motor de indução trifásico quando funcionando abaixo da velocidade síncrona, e ainda características do motor síncrono a ímã permanente convencional quando atinge a velocidade síncrona, onde a variação da velocidade síncrona atingida vai ser mínima, mesmo com a variação de carga acoplada ao eixo da máquina. Por se tratar de um motor síncrono a ímã permanente, o motor a ímã LSPMSM apresenta a característica de elevada relação potência/volume sendo aplicado em instalações industriais, em especial, aplicações que utilizem o motor de indução trifásico [8]. A Figura 8 apresenta uma comparação construtiva dos rotores da máquina de indução e do motor LSPMSM

Figura 8 Rotor a ímãs permanentes e rotor de indução



Exemplos de aplicações industriais empregando o motor a ímã permanente com partida direta são bobinadeiras de papel, máquinas-operatrizes, esteiras transportadores, extrusoras, bombas, compressores e sistemas de ventilação [7]. A Figura 9 mostra duas aplicações típicas de motores a ímã LSPMSM. Devido a essas características o motor a ímã LSPMSM tem sido utilizado em veículos elétricos [5].

Figura 9 Aplicações industriais de motores síncronos a ímã permanente LS-PMSM (a) bobinadoras de papel, (b) compressores.



(a)

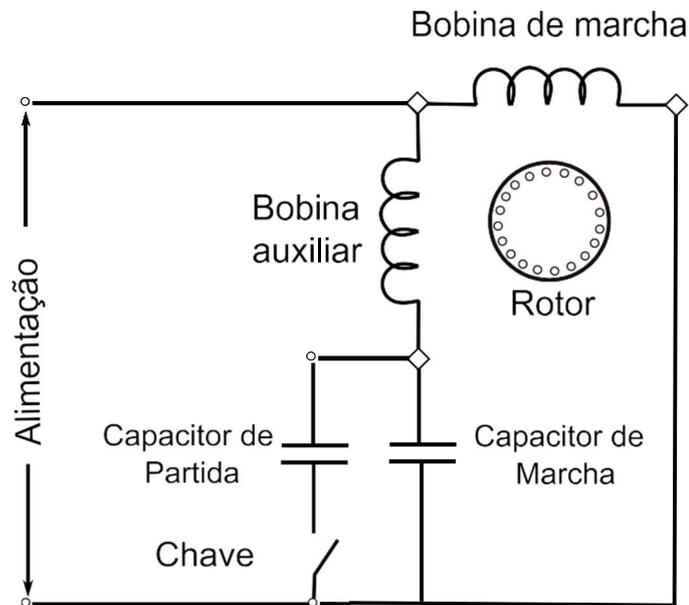


(b)

Fonte: NWE Energy and Fuel, 2017

Para os motores LSPMSM monofásicos, ainda é necessário o uso de capacitores de partida e de funcionamento devido à redução do torque de partida causado pelo torque negativo dos ímãs. Já para motores trifásicos não é necessário o uso de dispositivos adicionais [17]. A Figura 10 representa o circuito de ligação do motor LSPMSM monofásico, o capacitor de marcha presente no circuito é responsável por aumentar a eficiência do motor durante o funcionamento, diminuindo a assimetria do motor e, portanto, reduzindo a magnitude das correntes retóricas, que por sua vez reduzem o efeito joule presente na gaiola de esquilos. O capacitor de partida é responsável promover um torque elevado na partida e posteriormente é retirado por meio de chaves eletromecânicas após o início do funcionamento do motor [17].

Figura 10 esquema de ligação do motor LSPMSM monofásico



Fonte: O Próprio Autor

2.3.1 Vantagens do LSPMSM

O motor LSPMSM possui características que o tornam uma opção atrativa para determinadas aplicações, sendo a refrigeração doméstica é uma delas. Uma das características mais importantes é a alta eficiência deste motor. Quando em regime, o motor trabalha como um motor síncrono e, teoricamente, isto significa que não existem perdas resistivas nas barras da gaiola do rotor. Por não haver indução de correntes no rotor em regime, as perdas associadas a esta magnetização no estator podem ser reduzidas a valores próximos de zero no ponto de carga nominal em um projeto de motor bem dimensionado.

Devido à redução das perdas, a eficiência do motor é alta quando comparada ao motor de indução convencional. Alguns motores LSPMSM projetados apresentaram redução nas perdas entre 30% a 40%, quando comparados aos motores de indução [18] e [19].

Adicionalmente apresenta baixo consumo de potência reativa devido à presença dos ímãs permanentes que assumem o papel de magnetizar o circuito. Portanto, estes motores são

caracterizados por funcionar com alto fator de potência, apresentando valores entre 0,9 e 1,0 para uma ampla faixa de pontos de carga [16].

Tratando do ponto de vista de fabricação, os motores LSPMSM também apresentam algumas das boas qualidades do motor de indução convencional, tais como robustez e baixo custo com manutenção.

2.3.2 Desvantagens do LSPMSM

Talvez a maior desvantagem do motor LSPMSM seja o alto custo de produção, que se deve ao preço relativamente elevado dos ímãs e também devido à maior complexidade na estrutura do rotor.

Aquém da questão econômica, existem ainda pontos negativos relacionados ao conceito deste motor. A partida tem menor desempenho quando comparada à partida do motor convencional de indução de mesma dimensão. O torque assíncrono médio do motor LSPMSM é reduzido principalmente em função da presença do torque de frenagem gerado pelos ímãs durante a partida.

Outro ponto a ser destacado é o fato de que a sincronização deve ocorrer logo após a partida do motor, pois caso contrário, correntes elevadas percorrerão o rotor causando o rápido aumento da temperatura dos ímãs. Com isso, a capacidade dos ímãs de suportarem campos desmagnetizantes fica reduzida, podendo levar à sua desmagnetização durante a operação do motor. Adicionalmente, se a temperatura atingir valores maiores que a temperatura de Curie (temperatura na qual o material perde suas propriedades magnéticas), a desmagnetização permanente dos ímãs pode ocorrer com o motor em operação mesmo sobre a influência de baixos campos desmagnetizantes.

2.3.3 A literatura do motor LSPMSM

O primeiro projeto de um LSPMSM proposto por MERRIL em 1954 [14]. O objetivo principal foi relacionar um motor síncrono de relutância com um motor de indução convencional, na configuração trifásica. Para isso, MERRIL realizou a inserção de ímãs na laminação de um rotor típico de um motor de indução para excitar a máquina de tal modo a preservar o perfil circular do rotor, garantindo assim a redução da saliência, a que é tipicamente alta nos motores de relutância.

Com base nas descobertas de MERRIL, vários trabalhos surgiram acerca da modelagem matemática dos motores LSPMSM, que serviriam com base de análise de muitos fenômenos elétricos e eletromagnéticos no estudo de máquinas elétricas.

Dando prosseguimento aos estudos, HONSINGER [21] propôs equações analíticas generalizadas do motor trifásico para modelar o seu funcionamento. As equações relacionavam a tensão, fluxo magnético e corrente de tal forma a descrever o comportamento do motor durante a partida.

Em 1984, foi desenvolvido por MILLER [22] um modelo matemático de um motor LSPMSM para estudar o comportamento da máquina elétrica no momento da sincronização. Sua proposta constituía em utilizar ferramentas computacionais para a execução dos cálculos via simulação computacional de tal forma a prever o comportamento da máquina elétrica antes da construção de um protótipo. A utilização de ferramentas computacionais para simulação de máquinas vinha se apresentando como uma tendência, e desta forma o motor LSPMSM foi incluído nesta abordagem gozando assim das vantagens da simulação computacional.

Em 1985, MILLER [26], após ter elaborado o modelo matemático trifásico, elaborou um modelo do motor monofásico. Sua proposta foi permitir os cálculos em regime permanente, em regime transitório e também o desempenho na partida assíncrona do motor. O motor monofásico opera geralmente desbalanceado, o que gera a necessidade de análise dos componentes de sequência positiva e negativa. Nesse trabalho, o autor apresentou um conjunto de transformações matemáticas em seu modelo de tal forma a permitir a fácil integração com a simulação computacional. Esse trabalho foi retomado em 2004 [8].

Em 1996 foi proposta por HERSLOF [16] uma metodologia para um projeto de um exemplar de motor LSPMSM trifásico para aplicação em bombas d'água. O autor realizou uma análise bem detalhada do motor discutindo, as principais características do seu funcionamento nas várias etapas de operação: partida, sincronização e regime permanente, propondo um modelo para cada uma destas etapas.

No ano 2000, foi apresentado por KNIGHT e MCCLAY [23] um trabalho que tinha como objetivo diminuir o consumo energético de um motor de indução convencional de tal forma a atingir o maior índice de eficiência estabelecido pela legislação Europeia. Para tanto, os autores propuseram algumas alterações no rotor com o intuito de diminuir as perdas resistivas nas barras da gaiola. Embora estas modificações tenham aumentado a eficiência da máquina, os valores de consumo de potência ainda estavam longe da meta estabelecida.

Dois anos mais tarde, em 2002, LIBERT, SOULARD e ENGSTROM [24] estudaram o comportamento do motor LSPMSM trifásico por meio da análise de seu projeto. Os autores desenvolveram uma metodologia de projeto propondo um sistema para relacionar as etapas de simulação realizadas através de programas computacionais por cálculos analíticos. Os autores também discutiram a influência da espessura do entreferro da máquina e da saturação do dente do rotor, variando o formato da gaiola, espessura dos ímãs e os valores das reatâncias síncronas.

Dando sequência, SILVA [25] também formulou uma metodologia para projeto de um motor LSPMSM trifásico. A autora, além de propor o modelo analítico e numérico para os cálculos de desempenho do motor, ressaltou a importância na determinação do ângulo de carga no ponto de operação da máquina.

Os trabalhos apresentados anteriormente direcionaram o foco de seus respectivos estudos para os motores trifásicos, no entanto muitos outros abordaram a proposta de modelar o comportamento dos motores monofásicos. O emprego em larga escala dos motores de indução monofásicos convencionais gerou interesse por parte das indústrias na tentativa de disponibilizar um novo produto no mercado, e também das universidades para desenvolvimento de tecnologia.

Adicionalmente em 2006 MILLER e outros [27] realizaram novos estudos contribuíram com o modelo proposto em [26]. Nos motores de indução monofásicos típicos, a influência de componentes harmônicos introduzidas na fem do motor devido à bobinagem acarreta a criação de torques parasitas no motor, o que causa afundamentos na curva torque

versus velocidade da máquina. No motor LSPMSM a análise destes torques é complexa, pois para este tipo de máquina tanto o rotor quanto o estator são assimétricos. Além disso, existem ainda outros fatores que devem ser levados em consideração, tais como: fonte de alimentação desbalanceada e rotação do ímã que produz torques de frenagem, além de torques oscilatórios provenientes dos componentes harmônicos do estator. Os autores propuseram um modelo analítico levando em consideração as dificuldades apresentadas anteriormente para incluir no modelo a influência dos componentes harmônicos nos torques do motor.

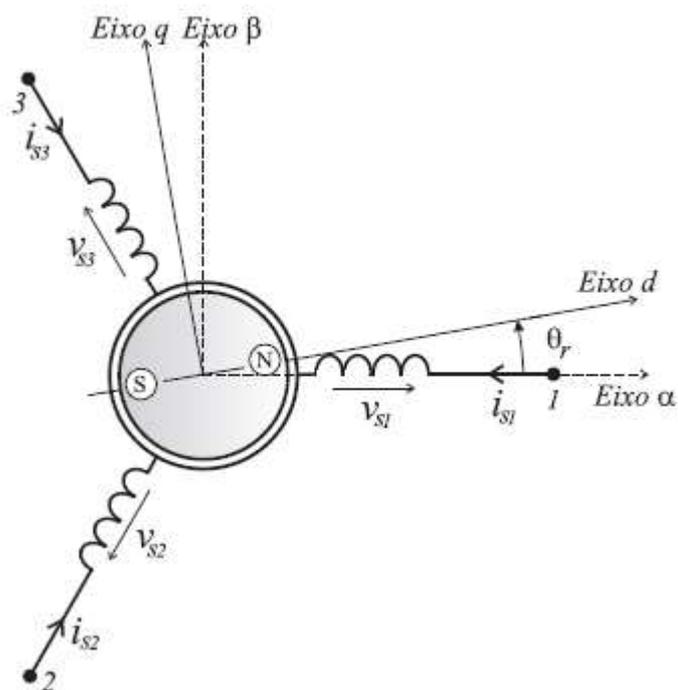
Muitos trabalhos continuaram sendo desenvolvidos, principalmente no âmbito de aplicações, redução de consumo energético, aumento da densidade, potência x volume e estudo de materiais e espessuras considerando os aspectos construtivos.

3. MODELAGENS MATEMÁTICAS

3.1 MODELO MATEMÁTICO DO MOTOR SÍNCRONO A ÍMÃ PERMANENTE

A representação da máquina de forma trifásica, como visto na Figura 11, é de melhor visualização das suas grandezas elétricas, porém no estudo das máquinas trifásicas é comum a utilização de transformações de variáveis que permitam obter relações simplificadas em apenas dois eixos.

Figura 11 Representação de uma máquina PMSM



Fonte: Eisenhauer, 2006

De modo geral, a máquina é representada por uma máquina bifásica equivalente. Um sistema bifásico o é composto por dois eixos ortogonais e uma componente homopolar isolada do eixo. A transformação é entre os referenciais 123 e $o\alpha\beta$ é dada por:

$$\mathbf{x}_{o\alpha\beta} = \mathbf{P} \mathbf{x}_{123}$$

$$\mathbf{P} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Considerando o motor síncrono a ímã permanente simétrico e equilibrado, a componente o pode ser desprezada no modelo e as equações de tensão do motor com distribuição de fluxo senoidal podem ser escritas, no eixo de referência do estator ($\alpha\beta$), como:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_\alpha & pL_\beta \\ pL_{\alpha\beta} & r_s + pL_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega_r \lambda_{pm} \begin{bmatrix} -\text{sen}\theta_r \\ \text{cos}\theta_r \end{bmatrix}$$

Onde:

v_α e v_β são as componentes de tensão do estator de eixos α e β respectivamente;

i_α e i_β são as componentes de corrente do estator de eixos α e β respectivamente;

r_s é a resistência do estator;

ω_r é velocidade angular elétrica do rotor;

λ_{pm} é o valor de pico do fluxo produzido pelo rotor que enlaça os enrolamentos do estator;

p é o operador derivada e as indutâncias L_α , L_β e $L_{\alpha\beta}$ são definidas por.

$$L_\alpha = L_0 + L_1 \cos 2\theta_r$$

$$L_{\beta} = L_0 - L_1 \cos 2\theta_r$$

$$L_{\alpha\beta} = L_1 \sin 2\theta_r$$

$$L_0 = (L_d + L_q) \frac{1}{2}$$

$$L_1 = (L_d - L_q) \frac{1}{2}$$

Uma forma mais conveniente para análise do comportamento do motor a ímã permanente é sua representação no referencial síncrono girante do rotor, referencial dq, a matriz de transformação e as equações de tensão são dadas por:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_d & \omega L_q \\ \omega_r L_d & r_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_{pm} \end{bmatrix}$$

onde as indutâncias L_d e L_q são as indutâncias de eixo d e de eixo q.

A equação mecânica de movimento e a expressão do conjugado eletromagnético completam o modelo da máquina:

$$(J + J_m) \frac{d}{dt} \omega_m = \tau_e - \tau_L$$

$$\tau_e = P [\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

Onde:

J e J_m são a inércia do rotor da máquina e a inércia da carga, respectivamente;

P é o número de pares de polos;

τ_e é o conjugado eletromagnético desenvolvido pela máquina.

A frequência angular do sistema de eixos $d_q(\omega_r)$ relaciona-se com a frequência angular mecânica do rotor (ω_m) por:

$$\omega_m = P \omega_r$$

3.2 MODELO MATEMÁTICO DO MOTOR DE INDUÇÃO

As correntes do rotor são determinadas então pelas magnitudes das tensões induzidas e pela impedância apresentada pelo rotor na frequência de escorregamento. Por sua vez, as correntes do rotor produzem uma onda de fluxo que gira em sincronismo com a onda de fluxo produzida do estator, quando acontece a interação entre esses dois fluxos é então criado o torque da máquina

$$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt}$$

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt}$$

$$v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt}$$

$$v_{ar} = 0 = r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt}$$

$$v_{br} = 0 = r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt}$$

$$v_{cr} = 0 = r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt}$$

Em que,

v - tensões por fase a, b e c para o estator e rotor;

r - resistência dos enrolamentos do estator e rotor;

i - correntes das fases para o estator e rotor;

λ - fluxo concatenado dos enrolamentos a, b e c no estator e rotor.

As tensões do rotor são nulas uma vez que seus terminais de enrolamento são curto-circuitados, se tratando de uma máquina de indução gaiola de esquilo. As Equações anteriores podem ser resumidas na forma matricial,

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -1/2 L_m & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & L_{ls} + L_m & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & -1/2 L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -1/2 L_m & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & L_{lr} + L_m & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & -1/2 L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = L_m \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix}.$$

L_{ls} e L_{lr} correspondem às indutâncias de dispersão do estator e rotor,

L_m corresponde à indutância de magnetização,

θ_r corresponde a posição angular elétrica do rotor, e $L_{sr} = (L_{rs})$.

As equações apresentadas para o sistema trifásico do motor de indução representam um modelo não-linear, e para análise o sistema torna-se muito complexo, assim, faz-se uma simplificação no equacionamento destas por meio da transformação de coordenadas nas variáveis, assim,

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + L'_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L'_s i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{dr}}{dt}$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + L'_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \left(L'_s i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} \right).$$

v_{ds} - tensão do estator de eixo direto;

i_{ds} - corrente do estator de eixo direto;

L_s' - parâmetro de indutância definido como $L_s' = L_s - L_m^2 / L_r$

L_s e L_r - parâmetro de indutância definido a partir dos parâmetros do circuito equivalente, sendo: $L_s = L_{ls} + L_m$ $L_r = L_{lr} + L_m$;

ω_r - velocidade angular do fluxo de rotor (rad/s);

λ_{dr} - fluxo concatenado no enrolamento fictício do rotor de eixo direto.

Uma vez que os terminais dos enrolamentos do rotor são curto circuitados, as tensões nos enrolamentos do rotor são nulas. Os fluxos concatenados do rotor, resultantes da transformação são apresentados pelas equações abaixo, escolhe-se o eixo direto (d) do sistema dq0 como sendo alinhado com o fluxo do rotor, dessa forma o fluxo concatenado de eixo em quadratura (q) para o rotor é nulo,

$$\lambda_{qr} = L_m i_{qs} + (L_{lr} + L_m) i_{qr} = 0$$

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} + (L_{lr} + L_m) i_{dr}.$$

Então, o torque mecânico no eixo do motor de indução é dado por:

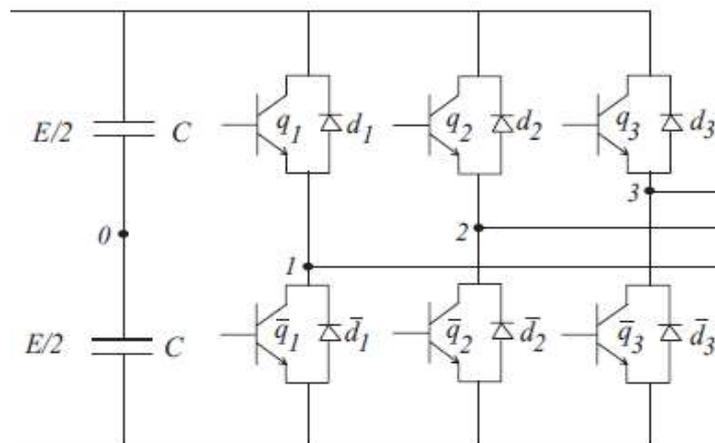
$$T_{mec} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(\frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \right).$$

4. INVERSOR FONTE DE TENSÃO

O inversor fonte de tensão é o conversor estático empregado em sistemas de acionamento de máquinas elétricas de corrente alternada. A topologia básica deste inversor é ilustrada na Figura 12. O inversor é construído em forma de ponte e dividido em ramos (braços), cada ramo contém dois interruptores (chaves) de potência, a carga é conectada ao ponto central do braço.

A tensão do barramento CC (DC Link) é obtida a partir de um circuito retificador. Os pulsos das chaves são gerados de forma tal que as chaves de cada braço sejam comutados de forma complementar. As tensões de saída do inversor são produzidas a partir de uma técnica de modulação por largura de pulsos. As tensões geradas têm valores instantâneos cujo valor médio, em um intervalo de tempo T , é igual a tensão de referência.

Figura 12 Inversor Fonte de Tensão



Fonte: O Próprio Autor

4.1 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS (PWM)

O inversor trifásico da Figura 12 é composto por seis chaves $q_1, q_2, q_3, -q_1, -q_2$ e $-q_3$ e seus respectivos diodos. As chaves q_1, q_2 e q_3 são comandadas de forma complementar as chaves $-q_1, -q_2$ e $-q_3$.

As tensões aplicadas a máquina dependem da configuração das chaves do inversor. As chaves assumem valores binários (0 ou 1). As tensões de saída do inversor são dadas por:

$$v_{s1} = v_{s10} + v_{0N}$$

$$v_{s2} = v_{s20} + v_{0N}$$

$$v_{s3} = v_{s30} + v_{0N}$$

Onde v_{0N} é a diferença de tensão do ponto médio do barramento CC (“0”) para o neutro da máquina. As tensões de pólo v_{s10}, v_{s20} e v_{s30} são dadas por:

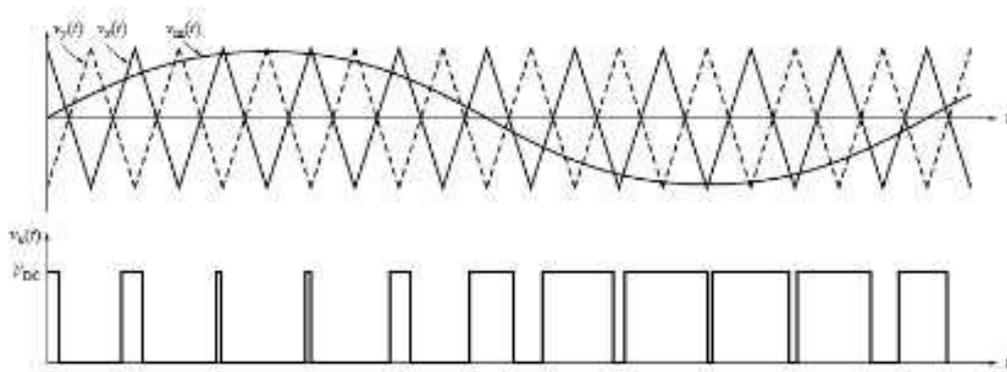
$$v_{s10} = q_1 \frac{E}{2} - \bar{q}_1 \frac{E}{2} = (2q_1 - 1) \frac{E}{2}$$

$$v_{s20} = q_2 \frac{E}{2} - \bar{q}_2 \frac{E}{2} = (2q_2 - 1) \frac{E}{2}$$

$$v_{s30} = q_3 \frac{E}{2} - \bar{q}_3 \frac{E}{2} = (2q_3 - 1) \frac{E}{2}$$

A figura 13 ilustra a geração de um sinal PWM, a partir de uma onda senoidal (modulante) que é comparado a um sinal triangular de alta frequência (portadora).

Figura 13 Modulação PWM



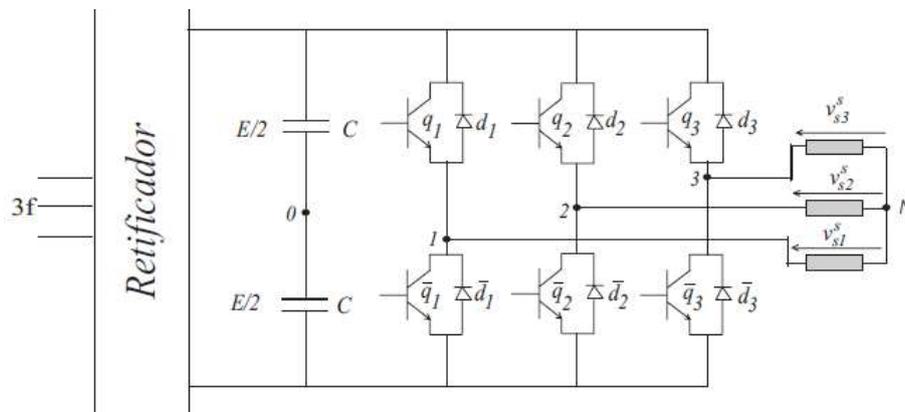
Fonte: O Próprio Autor

5. MATERIAL E MÉTODOS

O processo de simulação dos motores apresentados é de grande valia para avaliar o comportamento síncrono e assíncrono do motor LSPMSM. Para realização deste processo tido como complexo, houve uma divisão de etapas que se iniciou pelo estudo do acionamento de uma carga RL, para posterior substituição pelos modelos matemáticos apresentados.

Para simular o processo de acionamento do motor conectado à rede, é necessário a implementação de um sistema de controle por meio de um inversor fonte de tensão. A Figura 14 representa, de forma simplificada, o sistema de acionamento proposto, na qual as correntes trifásicas da rede são convertidas em correntes contínuas para poderem servir de entrada para o inversor fonte de tensão. Este por sua vez converte a corrente agora contínua em corrente alternada controlada por meio do sinal PWM gerado, conectado as chaves comutadoras.

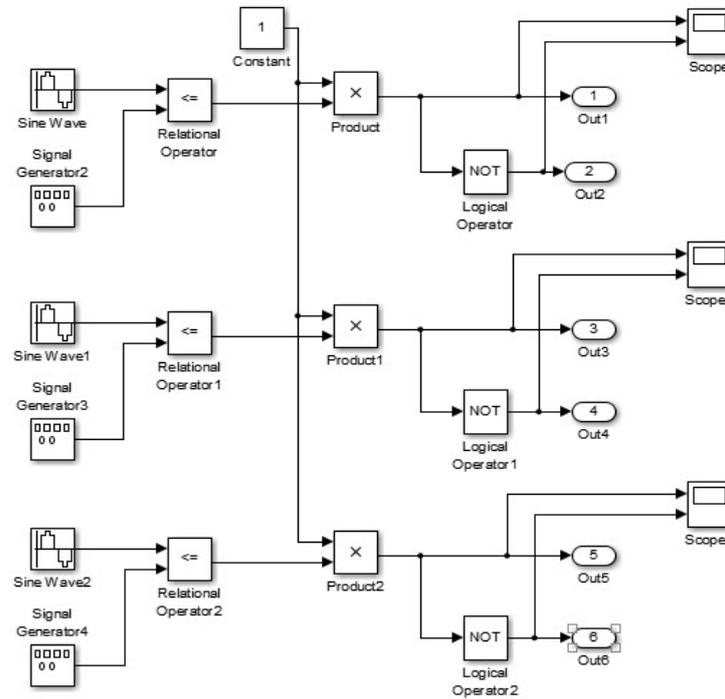
Figura 14 Sistema de acionamento de um motor



Fonte: O Próprio Autor

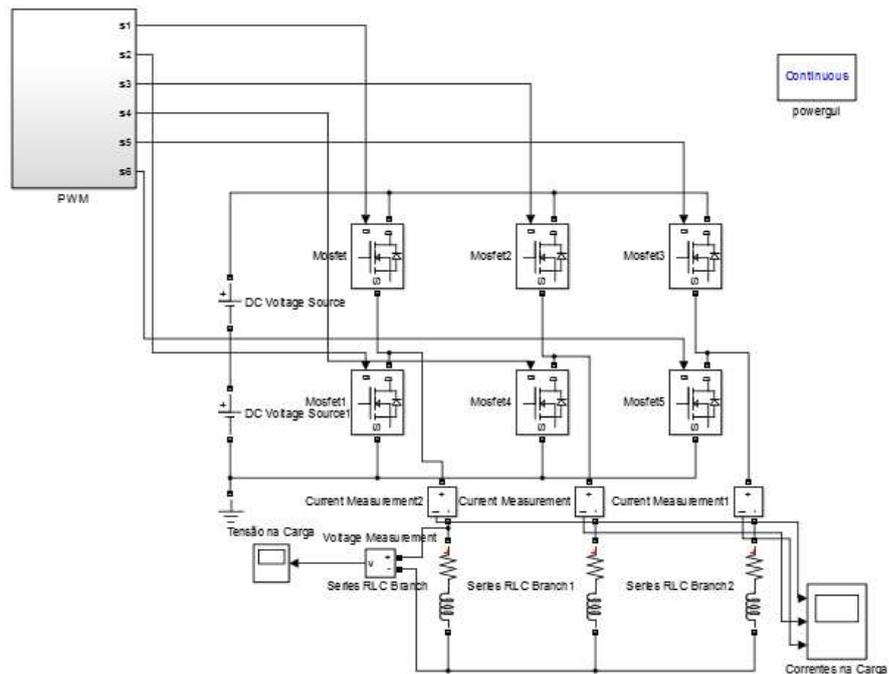
A primeira etapa consistiu no estudo de inversores fonte de tensão e modulação por largura de pulso, afim de entender o processo de controle do motor, esta etapa foi desenvolvida em código próprio no software Matlab e também por diagrama de blocos no software Simulink, como visto na Figuras 15 e 16.

Figura 15 Geração do Sinal PWM, Simulink



Fonte: O Próprio Autor

Figura 16 Inversor Fonte de Tensão controlado pelo sinal PWM gerado.

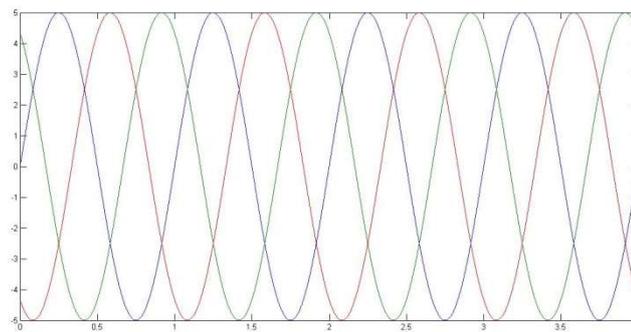


Fonte: O Próprio Autor

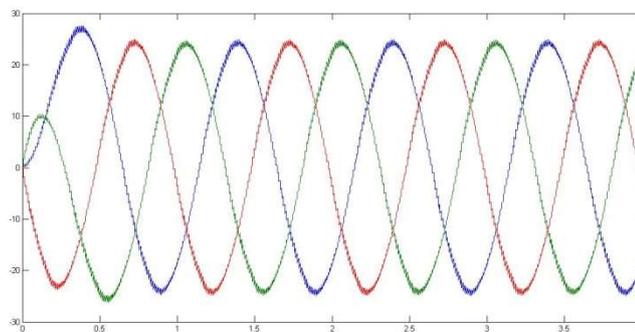
A partir do conhecimento adquirido modulação por largura de pulso e inversores fonte de tensão foi iniciado a segunda etapa das simulações, que consistiu no acionamento de uma carga RL, monofásica, bifásica e trifásica, utilizando a regra de integração de Euler, os resultados podem ser vistos na Figura 17.

Figura 17 Tensões de referência para geração do PWM (a),
Correntes nas Carga RL.

(a)



(b)



Fonte: O Próprio Autor

Com base nas figuras acima é possível perceber que a corrente na carga é controlada através do sinal modulante na geração do sinal PWM do controlador, teoria fundamental para simulação posterior do motor.

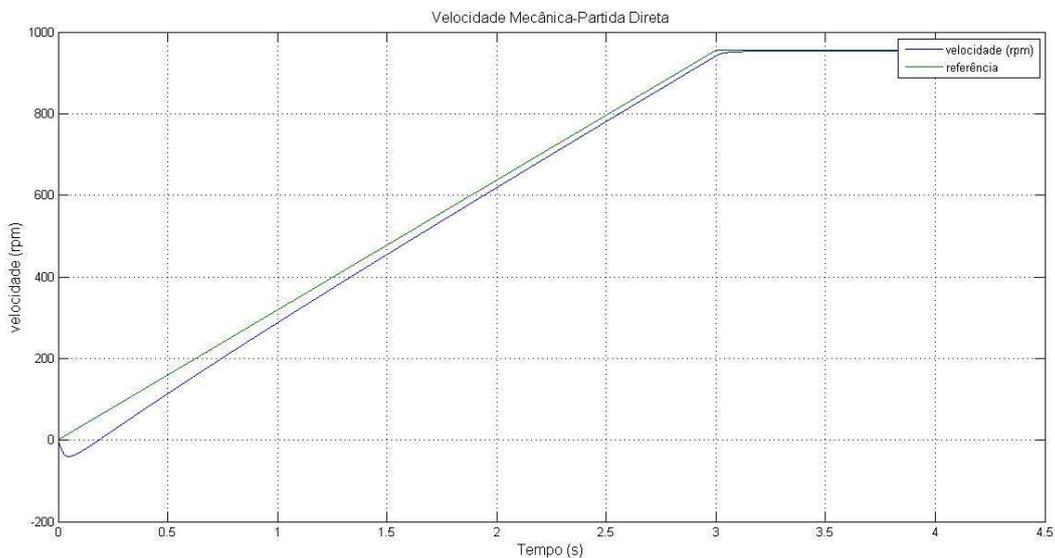
A terceira etapa das simulações ocorreu com base na literatura do funcionamento do motor, tendo em vista seu funcionamento assíncrono até atingir a velocidade nominal, e o

funcionamento síncrono após o acoplamento magnético quando atingida a velocidade síncrona.

Foram formulados códigos de controle de velocidade da máquina a ímã permanente e da máquina de indução no software Matlab. De posse dos parâmetros dos motores, das matrizes do modelo elétrico e mecânico contínuo e dos parâmetros do controlador foi possível realizar laços de simulação. A rotina de controle é implementada a partir das tensões de referência que são geradas a partir de pulsos PWM escalares do inversor.

Analisando o controle de velocidade de uma máquina de indução, visto na Figura 18, com parâmetros estabelecidos na Tabela 2, é possível perceber que em todo o período de simulação a máquina não atinge a velocidade de referência, e de fato isso não ocorre para esse tipo de motor, pois existe um escorregamento (slip), assim velocidade de eixo é sempre menor que a velocidade do campo girante, o parâmetro que define essa diferença é o fator de escorregamento da máquina.

Figura 18 Levantamento do controle de Velocidade da máquina de Indução



Fonte: O Próprio Autor

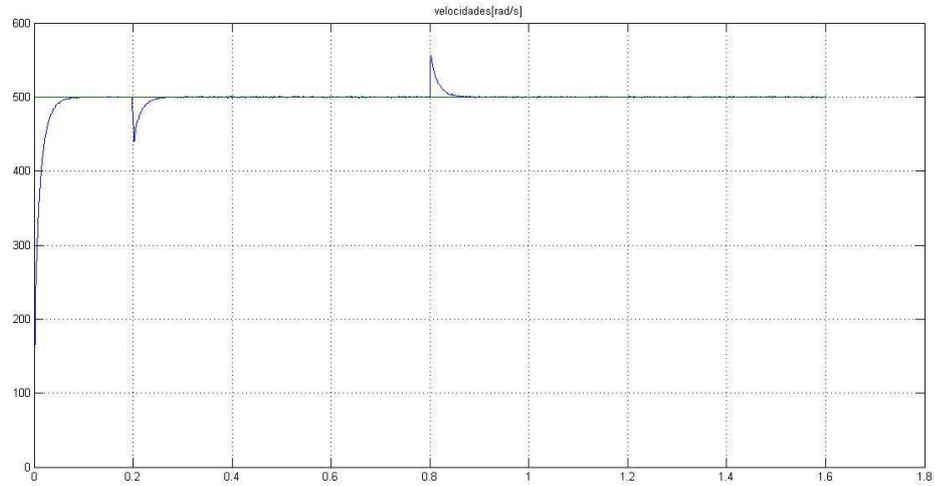
Tabela 2 Parâmetros do Motor de Indução (Norma)

PARAMETRO	VALOR
Resistência Estator	$r_1 = 2,839;$
Reatância Estator	$x_1 = 7,65;$
Resistência Rotor	$r_2 = 1,5;$
Reatância Rotor	$x_2 = 11,249;$
Reatância de Magnetização	$x_m = 64,101;$
Perdas no Núcleo	$r_{fe} = 645,017;$
Constante de Inércia do eixo do motor	$j_m = 0,0267;$
Coefficiente de atrito	$f_m = 0,0297;$

Fonte: O Próprio Autor

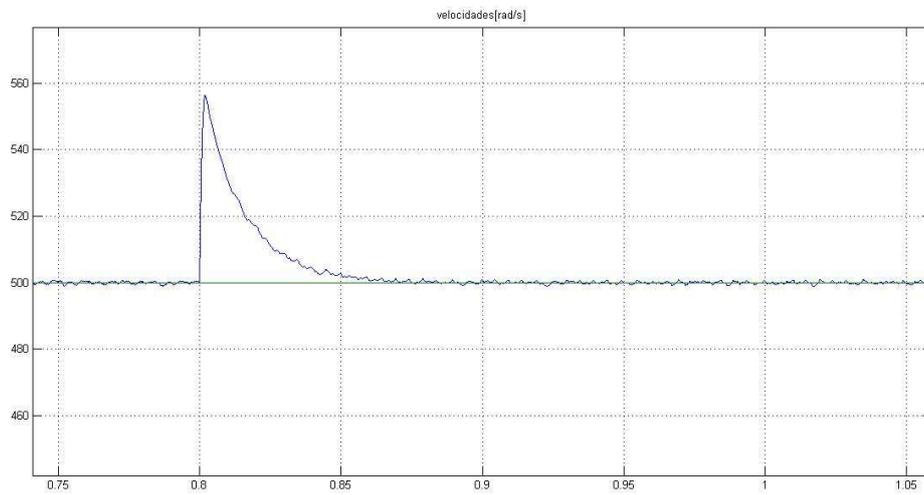
Analisando agora o motor a imã permanente, com parâmetros estabelecidos na Tabela 3, pode-se ver através das figuras 19 e 20 que a máquina segue a referência de controle de velocidade, pois a velocidade do eixo sempre seguirá a velocidade do campo girante, sem que haja escorregamento, mesmo com o aparecimento de cargas durante seu funcionamento a velocidade volta a torna-se a de referência, mesmo que necessite de maiores níveis de corrente para isso.

Figura 19 Levantamento do controle de Velocidade do Motor Síncrono a Ímã Permanente.



Fonte: O Próprio Autor

Figura 20 Levantamento do controle de Velocidade do Motor Síncrono a Ímã Permanente. (Vista Detalhada)



Fonte: O Próprio Autor

Tabela 3 Parâmetros do Motor Síncrono a Ímã Permanente

PARAMETRO	VALOR
Pares de polos	$p = 4;$
Indutancia d	$l_d = 24e-3;$
Indutancia q	$l_q = 33e-3;$
Resistencia elétrica	$r_s = 6,87;$
Momento de inercia	$J = 0,084e-3$
Fluxo do ima permanente (Wb)	$\phi_m = 0,0774$
Conjugado maximo (N.m)	$T_{max} = 2,0$

Fonte: O Próprio Autor

Com base nessas simulações, pode-se finalizar os resultados combinando os gráficos das duas máquinas, até atingir a velocidade síncrona, a máquina Line-Start se comportará como a máquina de indução, atingindo essa velocidade, vai haver um acoplamento magnético na máquina fazendo com que a mesma se comporte como uma máquina síncrona a ímã permanente.

Desta forma o campo de aplicação desses motores se estende, podendo serem utilizados em sistema que requerem velocidade constante ou velocidade variável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Podemos visualizar de fato o ganho em eficiência do motor LSPMSM, quando comparando seu funcionamento com os motores de indução.

O estudo do sistema de acionamento foi de fundamental importância para a realização das simulações que serviram para avaliar visualmente o funcionamento desses motores, bem como entender as limitações de atuação dos mesmos, para isso o estudo dos modelos matemáticos dos motores, assim como do sistema de acionamento, foi de suma importância para esta implementação.

Por fim, espera-se que ao longo dos anos haja um aumento da tendência da substituição dos motores de indução por motores mais eficientes, como o motor LSPMSM apresentado, promovendo uma melhora na eficiência energética do mundo, reduzindo os impactos ambientais presentes na atualidade.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se mencionar:

- Implementação do modelo matemático próprio da máquina LSPMSM;
- Realização de experimentos de comparação dos motores a ímã e motores de Indução;
- Estudo do motor PMSM como gerador voltado para Turbinas Eólicas e Veículos Elétricos;
- Estudo da técnica Sensorless para estimação de parâmetros do motor PMSM como gerador.

REFERÊNCIAS

- [1] *Atlas de energia elétrica do Brasil* / Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). 3a edição – Brasília: Aneel, 2008, pp. 21-36.
- [2] LITTLE, ARTHUR D. “*Opportunities for energy savings in the residential and commercial sectors with high-efficiency electric motors*”, 1999.
- [3] RAHMAN, M. A. e OSHEIBA, A. M., *Performance analysis of single-phase permanent magnet motors*, Electric Energy Conference, 1987.
- [4] J. K. Gieras e M. Wing, “*Permanent magnet motor technology*”, IEEE Press, Nova York, E.U.A., 1997.
- [5] Z. Xiaochen, C. Shukang L. Weili, “*Development of line-start PMSM with solid rotor for electric vehicles*,” in Proc. of VPPC, pp.1-5, Nov. 2008.
- [6] T. Marcic, B. Stumberger, G. Stumberger, “*Comparison of Induction Motor and Line-Start IPM Synchronous Motor Performance in a Variable-Speed Drive*”, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 48, n. 6, pp. 2341-2351, Nov./Dez., 2012.
- [7] *Catálogo de motores WMagnet Drive System (Weg Automação)*: disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-wmagnet-drive-system-quick-guide-50040316-quick-guide-english.pdf>. Acesso em 03/07/2018.
- [8] T. J. E. Miller, M. Popescu, C. Cossar, M. McGilp, G. Strappazzon, N. Trivillin, R. Santarossa “*Line-start permanent-magnet motor single-phase steady-state performance analysis*”, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40, n. 2, pp. 516-525, Mar/Abr., 2004.
- [9] Home, D. “*Brushless D.C.Motors*” University of Sheffield, Ed. IEEE Press, 2000
- [10] 5 GUCKELBERGER, D. e BRADLEY, B., “*Setting a new standard for efficiency: Brushless DC Motors*”, Trane Engineers Newsletter, 2004.
- [11] 2 VEINOTT, C. G. e MARTIN, J. “*Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors*”, New York, USA, Editora McGraw-Hill, 1970.
- [12] 6 KUSKO, A. & PEERAN, S. M., “*Definition of the Brushless DC Motor*”, Ed. Kusko, Electrical Division – Failure Analysis Associates, USA, 1988.

- [13] KALLUF, F. J. H., POMPERMAIER, C., FERREIRA da LUZ, M. V., SADOWSKI, N., *Magnet Flux Optimization Method for Line-Start Permanent Magnet Motors*, Proceedings of the International Electrical Machines and Drives Conference (IEMDC), 2009.
- [14] MERRILL, F. W., *Permanent-magnet excited synchronous motors*, AIEE Fall General Meeting, 1954.
- [15] TEIXEIRA, F. H. P., *Metodologia para projeto, construção e ensaio de máquina síncrona de imã permanente - MSIP*. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- [16] HERSLOF, U., *Design, analysis and verification of a line start permanent magnet synchronous motor*. Dissertação (Mestre em Ciências) - Royal Institute of Technology, 1996
- [17] SILVA, C. A., CARDOSO, J. R., CARLSON, R., *Analysis of a Three-Phase LSPMM by Numerical Method*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, 2009.
- [18] KNIGHT, A. M., WILLIAMSON, S., *Influence of magnet dimensions on the performance of a single-phase line start permanent motor*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 1999.
- [19] MILLER, T. J. E., NEUMANN, T. W., RICHTER, E., *A permanent magnet excited high efficiency synchronous motor with line start capability*, IEEE IAS Annual Meeting, 1983.
- [20] KALLUF, F. J. H., *Análise do funcionamento assíncrono de um motor monofásico síncrono de ímãs permanentes com partida direta*. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [21] HONSINGER, V. B., *Permanent magnet machines: Asynchronous operation*, IEEE Transactions Power Application Systems, vol. PAS-99, pp. 1503-1509, 1980.
- [22] MILLER, T. J. E., *Synchronization of line-start permanent - magnet AC motor*, IEEE Transactions Power Application Systems, vol. PAS-103, No 7, 1984.
- [23] KNIGHT, A. M. e MCCLAY, C. I., *The Design of High-Efficiency Line-Start Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 6, 2000.
- [24] LIBERT, F., SOULARD, J., ENGSTROM, J., *Design of 4-pole Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*, International Conference on Electric Machines (ICEM), 2002.

- [25] SILVA, C. A., *Análise dos Transitórios de Partida de um Motor Síncrono Trifásico a Ímãs Permanente com Partida Direta da Rede*. Tese (Pós Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.
- [26] MILLER, T. J. E., *Single-phase permanent-magnet motor analysis*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-21, pp. 651-658, 1985.
- [27] POPESCU, M., MILLER, T. J. E., MCGILP, M. I., KALLUF, F. J. H., SILVA, C. A., DOKONAL, L. V., *Effect of winding harmonics on the asynchronous torque of a single-phase line start permanent-magnet motor*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.42, no. 4, pp. 1014-1023, 2006.
- [28] Ministério de Minas e Energia. *Aneel estimula troca de motores elétricos para promover eficiência energética*, Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura>, Acesso em 04/07/2018.
- [29] EISENHAWER, *Estimação de posição e velocidade de uma máquina síncrona a ímã permanente*, Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, 2006.
- [30] ANEEL. Nota Técnica nº 0043/2010, disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/>, Acesso em: 03/06/2018.