



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rodrigo Ferreira de Medeiros

ESTUDO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS FORÇAS RADIAIS NO ROTOR DO
MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO PARA CONDIÇÕES DE EXCENTRICIDADE

Florianópolis
2023

Rodrigo Ferreira de Medeiros

ESTUDO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS FORÇAS RADIAIS NO ROTOR DO
MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO PARA CONDIÇÕES DE EXCENTRICIDADE

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. Eng.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Medeiros, Rodrigo Ferreira de
Estudo, modelagem e simulação das forças radiais no rotor
do motor de indução monofásico para condições de
excentricidade / Rodrigo Ferreira de Medeiros ;
orientador, Nelson Jhoe Batistela, 2023.
56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Motor de indução. 3.
Excentricidade. 4. Forças radiais. I. Batistela, Nelson
Jhoe. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação
em Engenharia Elétrica. III. Título.

Rodrigo Ferreira de Medeiros

ESTUDO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS FORÇAS RADIAIS NO ROTOR
DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO PARA CONDIÇÕES DE
EXCENRICIDADE

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
“Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 11 de julho de 2023.



Documento assinado digitalmente
Miguel Moreto
Data: 12/07/2023 07:31:11-0300
CPF: ***.850.100-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Nelson Jhoe Batistela
Data: 11/07/2023 12:13:59-0300
CPF: ***.929.939-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Nelson Sadowski
Data: 11/07/2023 11:47:22-0300
CPF: ***.384.389-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
ALESSANDRO SCHOFFEN ROMAO
Data: 11/07/2023 11:38:47-0300
CPF: ***.468.169-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Eng^o. Alessandro Schoffen Romão
Nidec Global Appliance

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, amigos, colegas, professores e orientador pelo apoio durante a graduação.

Agradeço também à empresa Nidec Global Appliance pelo apoio fornecido para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho aborda, através de estudo teórico, modelagem e simulação, as forças radiais presentes no motor de indução monofásico devido à excentricidade. O estudo abrange casos de excentricidade estática e dinâmica. Foi desenvolvido um método e, posteriormente, um *script* para modelagem do MIM no *software* de cálculo de campos por elementos finitos *Ansys Maxwell*. Foram simuladas condições encontradas na literatura que sugerem influenciar na magnitude dessa força resultante. Os resultados obtidos confirmaram, em partes, o que se encontrou na literatura disponível.

Palavras-chave: Motor de indução monofásico; Excentricidade; Forças radiais.

ABSTRACT

The present work addresses, through theoretical study, modeling, and simulation, the radial forces present in the single-phase induction motor due to eccentricity. The study covers cases of static and dynamic eccentricity. A method was developed and, subsequently, a script for modeling the single-phase induction motor in the finite element analysis software Ansys Maxwell. Conditions found in the literature that suggest influencing the magnitude of this resultant force were simulated. The results obtained partially confirmed what was found in the available literature.

Keywords: Single-phase induction motor; Eccentricity; Radial forces.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estator de um motor de indução monofásico	21
Figura 2: Rotor e seus componentes.....	22
Figura 3: Estator visto de cima, com os enrolamentos principal e auxiliar deslocados em 90° no espaço	23
Figura 4: Elemento básico da malha de cálculo em 2D.....	25
Figura 5: (a) excentricidade estática e (b) excentricidade dinâmica	26
Figura 6: Distribuição das forças ao longo do entreferro sob excentricidade.....	27
Figura 7: Modelo 2D do motor no <i>software Ansys Maxwell</i>	30
Figura 8: Região do entreferro, com as 3 bandas criadas	30
Figura 9: Dataset criado para aceleração do motor.....	32
Figura 10: Curva BH do aço utilizado nas simulações.....	33
Figura 11: Circuito equivalente, responsável pela excitação	34
Figura 12: Planilha com os dados do motor a ser modelado.....	36
Figura 13: Gráficos de força no tempo para rotor bloqueado sob diferentes excentricidades	40
Figura 14: Gráficos de força no tempo para período transiente sob 54% de excentricidade	41
Figura 15: Gráficos de força no tempo para regime permanente sob diferentes excentricidades	42
Figura 16: Comparação entre (a) lâmina padrão e (b) lâmina saturada	43
Figura 17: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, sob saturação e excentricidade	43
Figura 18: Gráfico de força no tempo para período transiente, sob saturação e excentricidade	44
Figura 19: Gráfico de força no tempo para regime permanente, sob saturação e excentricidade	44
Figura 20: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, com conexão tipo série dos enrolamentos e excentricidade	45
Figura 21: Gráfico de força no tempo para regime permanente, com conexão tipo série dos enrolamentos e excentricidade	46
Figura 22: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, sem inclinação das barras da gaiola do rotor e com excentricidade.....	48

Figura 23: Gráfico de força no tempo para regime permanente, sem inclinação das barras da gaiola do rotor e com excentricidade	48
Figura 24: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, com uma barra ausente, com (em verde) e sem (em vermelho) excentricidade	49
Figura 25: Gráfico de força no tempo para regime permanente, com uma barra ausente, com (em cinza/verde) e sem (em azul/vermelho) excentricidade	50
Figura 26: Gráfico de força no tempo para regime permanente, sob excentricidade dinâmica	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações sobre o motor utilizado nas simulações	39
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CSCR	Capacitor Start Capacitor Run
CSIR	Capacitor Start Induction Run
FFT	Fast Fourier Transform
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIM	Motor de Indução Monofásico
PTC	Positive Temperature Coefficient
RSCR	Resistance Start Capacitor Run
RSIR	Resistance Start Induction Run
TSD	Time Starting Device
UMP	Unbalanced magnetic pull
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO.....	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.2.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2.2	OBJETIVOS METODOLÓGICOS	15
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO EM COMPRESSORES HERMÉTICOS	19
2.1	CICLO DA REFRIGERAÇÃO.....	19
2.2	COMPRESSOR HERMÉTICO ALTERNATIVO	20
2.3	MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO	21
2.3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	22
2.3.2	TIPOS DE MIM	23
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
2.5	EXCENTRICIDADE	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	28
3.2	DEFINIÇÃO DO DESENHO	29
3.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	30
3.4	NOVO SISTEMA DE COORDENADAS PARA CONDIÇÃO DE EXCENTRICIDADE ESTÁTICA	31
3.5	CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO	31
3.6	MATERIAIS EMPREGADOS NO MIM.....	33
3.7	CIRCUITO EXTERNO E EXCITAÇÃO	33
3.8	PASSO DE CÁLCULO E TEMPO DE SIMULAÇÃO	35
3.9	<i>SCRIPT</i> IMPLEMENTADO	36
4	RESULTADOS E ANÁLISES	38
4.1	MOTOR PADRÃO UTILIZADO	38
4.2	EFEITO DA SATURAÇÃO	42
4.3	EFEITO DA CONEXÃO EM PARALELO	45
4.4	EFEITO DO <i>SKEW</i>	47

4.5	EFEITO DE FALHAS NA GAIOLA DO ROTOR.....	49
4.6	EFEITO DA EXCENTRICIDADE DINÂMICA	51
5	CONCLUSÃO	53
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda a questão das forças indesejáveis devido a excentricidades que se desenvolvem em motores de indução monofásicos empregados em compressores herméticos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Motores de indução, com seus relativos pequenos entreferros, são especialmente vulneráveis a pequenas variações nas dimensões de estator, rotor, anéis e rolamentos [Salah et al., 2019].

Segundo relatórios de [Group, 1985] e [EPRI, 1982], falhas nos rolamentos são as mais pronunciadas em motores de indução. A porcentagem de falhas no rolamento depende de alguns fatores, dentre eles o tamanho do motor. Para um motor de pequeno porte, caso dos motores de indução monofásicos para aplicação em compressores herméticos, esse número pode chegar a 90%.

Casos acentuados de excentricidade resultam em uma força radial na direção de menor entreferro e podem levar à falta no motor por contato físico entre estator e rotor. Casos mais leves podem não apresentar um problema de imediato, mas com o tempo o rolamento vai se desgastando até eventualmente apresentar uma falha.

A força radial resultante com característica desbalanceada devido à excentricidade costuma ser denominada na literatura por UMP (*Unbalanced Magnetic Pull*). Conhecendo sua magnitude para determinado modelo de motor, é possível adotar estratégias para contê-la, como modificar o modelo do rolamento utilizado ou mudar parâmetros de projeto de forma a diluir o desbalanceamento desta força no entreferro.

Neste contexto, o presente trabalho – em que parte das atividades foram desenvolvidas na empresa *Nidec Global Appliance*, que disponibilizou sua estrutura e suporte de seus colaboradores, os modelos CAD de lâminas e o *software* de cálculo de campos por elementos finitos – realiza modelagens do motor de indução monofásico em *software* de elementos finitos, onde foi desenvolvida uma rotina para automatizar o desenvolvimento do processo. São, então, simuladas condições especiais, encontradas na literatura, que demonstram influenciar na magnitude da força resultante devido à excentricidade, particularizando para aquelas em motores de indução monofásicos para aplicação em compressores herméticos.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é realizar a modelagem e simulações do motor de indução monofásico em *software* de elementos finitos para a condição de excentricidade do rotor.

1.2.2 OBJETIVOS METODOLÓGICOS

Os objetivos metodológicos são listados a seguir:

- Encontrar, a partir de uma revisão na literatura, condições que demonstram influenciar na magnitude de forças ocasionadas pela excentricidade do rotor;
- Desenvolver *script* com a finalidade de modelar os motores de indução monofásicos da empresa *Nidec Global Appliance* em *software* de cálculo de campos por elementos finitos.
- Simular motores de indução monofásicos da empresa *Nidec Global Appliance* no *software Ansys Maxwell* com a finalidade de avaliar as condições encontradas em revisão bibliográfica.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se a seguir uma breve revisão do assunto na literatura. Procurou-se encontrar referências que abordassem a questão, principalmente aquelas mais próximas à aplicação de motores de que trata este trabalho.

Em [Covo, 1954] foi realizado um dos primeiros estudos de relevância sobre as forças magnéticas resultantes na condição de excentricidade no motor de indução. Até a realização do estudo de [Covo, 1954], algumas equações haviam sido desenvolvidas para o cálculo das forças, porém apenas para baixos graus de excentricidades (até 10% do entreferro médio). O trabalho, então, tentou desenvolver um método analítico para o cálculo da UMP para uma extensão maior de excentricidades. As equações obtidas no estudo são aplicáveis para motores com

conexão série, operando sem carga ou com baixa carga, e os efeitos de correntes do rotor e inclinação da gaiola foram ignorados.

Em [Mariott, 1994] a força radial resultante devido à excentricidade é calculada para um motor de indução monofásico utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados foram comparados com os obtidos utilizando o método analítico desenvolvido por [Covo, 1954]. Como já mencionado, o trabalho de [Covo, 1954] foi desenvolvido considerando apenas o caso sem carga, e também foi focado em máquinas trifásicas. As forças simuladas para um motor de indução monofásico no caso sem carga estão de acordo com as obtidas utilizando o equacionamento de [Covo, 1954]. Nos casos de carga nominal e rotor bloqueado, as forças são menores ou iguais à condição sem carga. Pode-se concluir desse trabalho que a formulação de [Covo, 1954] apresenta uma estimativa conservadora da força radial resultante em um motor de indução monofásico na presença de excentricidades.

Importante ressaltar que as análises realizadas nesse trabalho foram em duas dimensões e com o rotor rotacionando em relação ao seu eixo e deslocado em relação ao eixo do estator (excentricidade estática). Assim, não são necessariamente válidas para todos os tipos de excentricidade.

Em [DeBortoli et al., 1993] foi realizado um estudo que teve como objetivo avaliar os efeitos da excentricidade ao variar o tipo de conexão dos enrolamentos do estator. Foram obtidas a indução magnética e a força resultante no rotor para excentricidades estática e dinâmica. Os tipos de conexão dos enrolamentos do estator foram os seguintes: (1) Conexão totalmente em série; (2) Dois ramos de enrolamentos em paralelo sendo os polos adjacentes conectados em paralelo e os polos opostos conectados em série; (3) Dois ramos de enrolamentos em paralelo sendo os polos adjacentes conectados em série e os polos opostos conectados em paralelo; (4) Conexão totalmente em paralelo.

Os diferentes tipos de conexão dos enrolamentos foram comparados entre si através da aplicação da FFT nas formas de onda de fluxo no entreferro e de força radial, identificando as harmônicas que surgiram devido à excentricidade. Através da análise, encontrou-se que o caso (4), onde a conexão dos enrolamentos é totalmente em paralelo, apresentou maior potencial de mitigar os efeitos da excentricidade, com uma redução de cerca de 23% da força resultante na direção do menor entreferro. Para excentricidade dinâmica, resultados semelhantes foram obtidos.

Em [Williamson et Al., 1997] são descritos os dois tipos mais comuns de falhas na gaiola do rotor. As falhas abordadas são as por porosidade, devidas a bolhas de gás ou elementos contaminantes formados na gaiola, e as falhas no isolamento entre o alumínio da gaiola e o aço do pacote do rotor. Vinte motores de indução monofásicos identificados como possuindo expressivos valores de UMP tiveram sua força resultante medida através de um transdutor piezoelétrico, chegando a um valor aproximado de 23 [N] de média com um alto desvio padrão de 24 [N].

Para o estudo de defeitos de porosidade nas barras do rotor, foi aumentado o valor da resistência em algumas delas. A força resultante da soma da UMP já presente com a força gerada devido a essa anomalia é muito baixa sem carga conectada, e chega à ordem de 7 [N] no caso com carga. Defeitos da mesma natureza nos anéis do rotor têm resultados de força produzida parecidos. Simulações de força resultante devido à falha no isolamento entre gaiola e pacote do rotor mostraram que o valor da força resultante de desbalanceamento é negligenciável perto dos valores obtidos para a força resultante devido às porosidades.

Em [Dorrell, 1996] foram realizados ensaios e simulações para avaliar a UMP em pequenos motores de indução trifásicos sob excentricidade dinâmica, comparando rotores com e sem desvio angular nas barras do rotor (*skew*). O autor obteve concordância de resultados entre um modelo analítico construído e resultados obtidos de ensaios. A conclusão foi que o desvio angular nas barras do rotor leva a um aumento da UMP sob condição de excentricidade dinâmica. Um estudo anterior [Dorrell, 1993] concluiu que a magnitude da UMP é influenciada pelo desvio angular também sob excentricidade estática.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto deste trabalho de conclusão de curso é organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduziu o assunto, apresentando a problemática e os objetivos a serem atingidos com o trabalho, e finalizou citando trabalhos encontrados na literatura. O segundo capítulo apresenta alguns conceitos sobre o sistema do motor de indução monofásico utilizado em compressores herméticos, o método dos elementos finitos, e o problema da excentricidade e sua força resultante gerada no rotor. O terceiro capítulo trata da modelagem do motor no *software* de cálculo de campos por elementos finitos e explica o *script* desenvolvido para automatização do

processo de modelagem. O quarto capítulo apresenta resultados de simulações e análises realizadas. O quinto capítulo descreve conclusões sobre o trabalho desenvolvido e propõe possíveis temas para trabalhos futuros.

2 MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO EM COMPRESSORES HERMÉTICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns conceitos gerais sobre a teoria que envolve este trabalho. Inicialmente será abordado brevemente o ciclo da refrigeração e o compressor hermético, e posteriormente o motor de indução monofásico será introduzido de maneira mais detalhada. Após, é apresentado de maneira bem sucinta o método de cálculo por elementos finitos (MEF). Por fim, o problema da excentricidade é apresentado, assim como uma parte da teoria que trata das forças ocasionadas por ela.

2.1 CICLO DA REFRIGERAÇÃO

O ciclo da refrigeração consiste na transferência de calor de uma área com temperatura mais baixa para uma com temperatura mais alta, contrariando a tendência natural. Esse processo se dá por meio de quatro componentes principais, seguindo o sentido a seguir apresentado: (1) Compressor, (2) Condensador, (3) Dispositivo de expansão, (4) Evaporador.

Todos os componentes acima citados estão interligados enquanto um fluido refrigerante passa por eles e realiza as trocas de calor.

Inicialmente o compressor recebe o fluido na forma gasosa pela válvula de sucção e este então adentra uma câmara cilíndrica, onde é comprimido tendo sua pressão e temperatura aumentadas. Depois, é liberado pela atuação da válvula de descarga.

O fluido, então, possuindo temperaturas muito elevadas passa por uma serpentina, geralmente localizada na parte traseira do refrigerador, trocando calor com o meio externo e, conseqüentemente, tendo sua temperatura diminuída. Ao final do percurso sua temperatura já é bem inferior e seu estado é totalmente líquido, o que o permite adentrar no dispositivo de expansão.

O dispositivo responsável pela expansão pode ser uma válvula de expansão ou um tubo capilar. Em ambos, é oferecida resistência a passagem do fluido e, aliado a diferença de diâmetro entre os dutos na saída para o evaporador, sua pressão é diminuída.

Nesse ponto o fluido, na forma líquida, já está a uma temperatura extremamente baixa, ideal para passar pelo evaporador e trocar calor com, por exemplo, alimentos localizados na parte interna do refrigerador. No final desse processo sua temperatura terá sido elevada, seu estado é novamente gasoso e está pronto para adentrar o compressor pela válvula de sucção e começar o ciclo mais uma vez.

2.2 COMPRESSOR HERMÉTICO ALTERNATIVO

O compressor hermético é o componente de mais importância e de mais complexa construção do ciclo da refrigeração abordado acima.

Para aplicação em refrigeradores domésticos, o compressor hermético alternativo, ou recíproco, é o mais utilizado. Esse tipo de compressor possui normalmente um motor de indução monofásico, com o seu eixo do rotor conectado a um conjunto de virabrequim e biela para a transformação do movimento rotacional do rotor em linear oscilante do pistão.

O pistão atua dentro de uma câmara cilíndrica aumentando e diminuindo seu volume de maneira cíclica. De maneira mais detalhada, quando o pistão está no ponto mais avançado, a pressão do vapor no volume restante do cilindro é um pouco maior que no tubo de descarga, nesse momento as válvulas ainda estão fechadas. No momento que o pistão move aumentando o volume do cilindro, a pressão do vapor internamente diminui até o ponto onde ela é menor que a pressão no tubo de sucção, quando a válvula de sucção abre e o gás refrigerante adentra a câmara. Quando o pistão chega no ponto de máximo volume no cilindro, a válvula de sucção é fechada e a compressão do fluido se inicia por movimento do pistão até chegar a uma pressão maior que a contida no tubo de descarga, fazendo a válvula de descarga abrir e o conteúdo do cilindro fluir pelo tubo.

O compressor hermético tem como grande vantagem o não vazamento de refrigerante através do eixo, como pode ocorrer com os compressores abertos. A desvantagem é que não permite acesso aos componentes internos para o caso de manutenção. Como consequência, em caso de queima do motor elétrico ou qualquer outro dano, a única solução é a substituição total do compressor [Sotomayor, 2015].

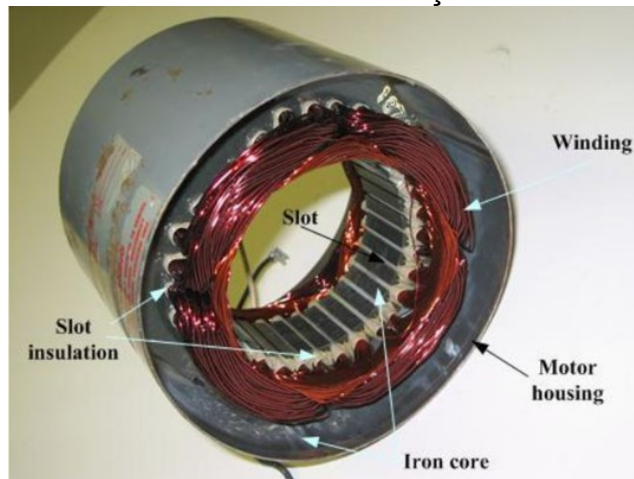
Os compressores herméticos para refrigeração são selecionados de acordo com a capacidade de refrigeração necessária, o tipo de refrigerante utilizado, a aplicação específica e outros requisitos técnicos.

2.3 MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

Esse tipo de motor é o mais utilizado em aplicações domésticas, onde necessita-se de apenas uma fase do sistema trifásico da rede elétrica. Como boa parte dos outros motores elétricos, possui dois componentes principais: estator e rotor. Como pode-se inferir de seus nomes, o estator não se movimenta e geralmente envolve o rotor, a parte girante.

O estator, que pode ser visualizado na Figura 1, é formado por um pacote de lâminas de aço com ranhuras internas onde são dispostos os enrolamentos. A sua forma laminada evita a formação de correntes induzidas no aço, pois as lâminas empilhadas idealmente não têm contato elétrico com as outras por terem passado por tratamento térmico, formando uma fina camada de isolamento. Os enrolamentos são constituídos por um material condutor, geralmente cobre ou alumínio, e esmaltado para isolamento.

Figura 1: Estator de um motor de indução monofásico



Fonte: *Slideplayer* (2019).

O rotor, assim como o estator, é produzido por material laminado que contém ranhuras onde são inseridas as barras da gaiola, que por sua vez são constituídas de alumínio fundido. No final de cada lado das gaiolas há um anel que as conecta, produzindo o curto-circuito. A

Figura 2 mostra, em sequência: rotor, pacote do rotor, gaiola do rotor.

Figura 2: Rotor e seus componentes



Fonte: Ramirez (2000).

Entre o estator e o rotor existe o entreferro, que é o espaço físico preenchido por ar, criado para que não haja contato entre estator e rotor. O entreferro deve permitir a passagem do fluxo magnético entre os dois componentes citados de maneira eficiente. O seu tamanho é projetado de maneira otimizada, sendo que um entreferro relativamente muito pequeno pode levar a problemas, tais como atrito e aquecimento excessivo, enquanto um entreferro relativamente muito grande pode resultar em perdas magnéticas elevadas, correntes de magnetização de ordem maior e diminuição do desempenho.

2.3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

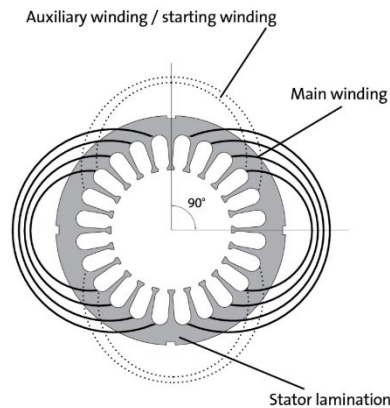
A partir de uma tensão senoidal aplicada na entrada de um motor de indução, é gerada uma corrente também senoidal que percorre os enrolamentos do estator. Essa corrente, segundo lei de Ampere, gera um campo magnético que tem sua direção dada através da regra de Fleming, ou regra da mão direita.

Para um motor com apenas um conjunto de enrolamentos (relativo a uma única fase) o movimento do campo é alternante no tempo, com direção fixa e sentido mudando periodicamente. Isso é incapaz de realizar a rotação no motor, pois essa configuração não gera torque de partida. Portanto, para que esse torque seja produzido, é necessário utilizar-se de alguns artifícios.

Os principais meios de produzir o campo girante nesse caso é através da criação de um conjunto de enrolamentos auxiliares posicionados à 90° no espaço em relação ao enrolamento principal, como mostra a Figura 3. Este enrolamento auxiliar,

em alguns casos, é ligado somente durante a partida do motor e em seu estado transitório. Existem alternativas também largamente utilizadas, como a utilização de capacitores de partida e/ou de funcionamento conectados em série com o enrolamento auxiliar, a depender dos requisitos de projeto.

Figura 3: Estator visto de cima, com os enrolamentos principal e auxiliar deslocados em 90° no espaço



Fonte: ElectricPortal (2023).

A partir da formação do campo girante, uma tensão induzida será gerada na gaiola do rotor, que por sua vez terá uma corrente passando sobre a mesma. Uma força é então gerada, segundo lei da força de Lorentz, perpendicularmente à direção da corrente e do campo magnético, fazendo com que o rotor se movimente.

A seguir serão detalhados os tipos de Motores de Indução Monofásicos (MIMs) mais utilizados no contexto de compressores herméticos para refrigeradores. Os MIMs de polos sombreados, portanto, foram ocultados do presente trabalho por não ter literatura disponível que relacione seu uso em compressores herméticos [Caviativa, 2013].

2.3.2 TIPOS DE MIM

O *split-phase*, que também é denominado por RSIR (*Resistance Start Induction Run*), recebe esse nome por ter apenas os enrolamentos divididos como forma de defasar no tempo a corrente dos enrolamentos principal e auxiliar, sem nenhum outro artifício. Por conta disso, sua defasagem temporal é pequena (cerca de 20-30°) e gerada através da diferença na relação resistência/reatância dos seus enrolamentos. Quando o rotor atinge cerca de 75% da velocidade síncrona, o enrolamento auxiliar é

desconectado através da atuação de relés de corrente, dispositivo do tipo PTC (*Positive Temperature Coeficient*) ou TSD (*Time Starting Device*). As características mencionadas fazem com que esse tipo de motor tenha seu uso em casos que demandam baixo ou moderado torque de partida e aplicações de baixas potências.

O MIM com capacitor de partida, ou CSIR (*Capacitor Start Induction Run*), tem sua aplicação em situações que exigem alto torque de partida, já que o capacitor aumenta a defasagem temporal entre os enrolamentos de 20-30° para um valor muito próximo de 90°, fazendo com que o motor se comporte como um motor de indução bifásico equilibrado durante sua partida e transitório. Depois, o dispositivo de partida entra em ação desligando a fase auxiliar.

O MIM com capacitor permanente, ou RSCR (*Resistance Start Capacitor Run*), é projetado para ótimo funcionamento em regime permanente. O capacitor utilizado possui capacitância de 10 a 15 vezes menor que os utilizados como capacitor de partida [Amaral, 2017], por conta disso seu torque de partida é baixo.

O MIM com capacitores de partida e funcionamento, ou CSCR (*Capacitor Start and Run*), combina o alto torque de partida com o ótimo funcionamento em regime. Para isso os dois capacitores são inseridos em paralelo no circuito e, após o transitório, uma chave abre e desconecta o capacitor de partida do circuito, restando apenas o de funcionamento. Naturalmente seu custo é o mais alto entre os motores apresentados.

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O software *Maxwell* foi criado em 1996 pela empresa britânica *Ansoft* e adquirido posteriormente pela americana *Ansys*. Este *software* utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM) para determinar a distribuição dos campos eletromagnéticos em um domínio de estudo. A partir desse método, são resolvidas equações diferenciais parciais, com um grau de precisão definido.

A simulação é realizada levando em conta um compromisso entre dois fatores principais: a precisão dos cálculos e o tempo. Nesse compromisso entram alguns fatores, tais como passo de cálculo, grau de refinamento das malhas, recursos computacionais disponíveis e necessidades do usuário.

Por predefinição, o *software* analisa todos os objetos e divide-os em elementos menores de geometria simplificada que, no caso da simulação 2D, são triângulos. A

Figura 4 mostra os elementos triangulares que são compostos por seis nós. Esses nós são pontos localizados nas arestas e vértices dos elementos nos quais os cálculos serão executados pelo software [Morgado, 2018].

Figura 4: Elemento básico da malha de cálculo em 2D



Fonte: Morgado (2018).

Será utilizada a simulação no *software Maxwell* do tipo transiente, pois busca-se avaliar todos os instantes de operação do motor.

2.5 EXCENTRICIDADE

Existem variações intrínsecas ao processo de fabricação de motores de indução que podem levar ao aparecimento de assimetrias elétricas ou mecânicas. Essas irregularidades na produção irão existir independentemente do nível de precisão ferramental. Porém, são mantidas sob controle de forma que as especificações sejam cumpridas.

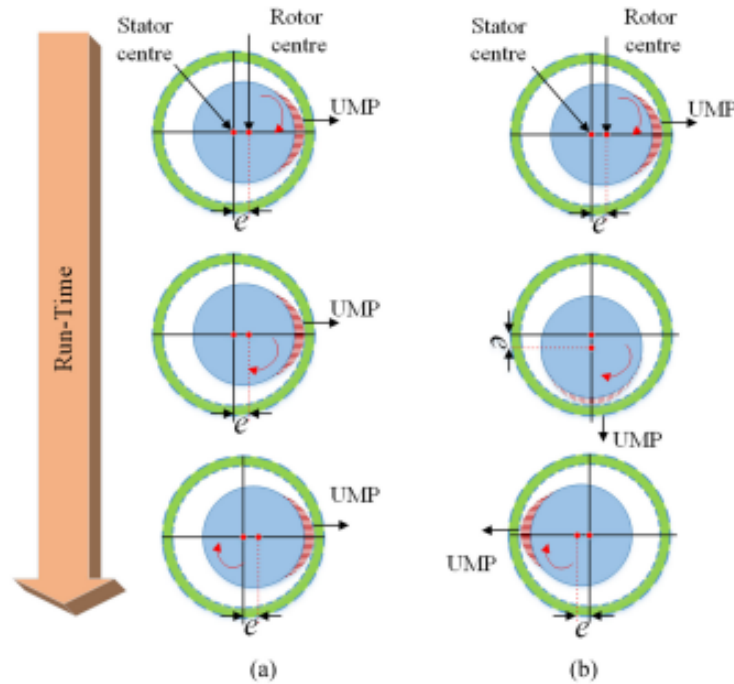
Dentre essas variações intrínsecas, está a excentricidade, que é a condição na qual o estator e o rotor não estão com seus eixos perfeitamente centralizados e alinhados. Essa condição pode ser causada por mau posicionamento do rolamento, deformações no eixo, problemas dimensionais na estampagem das lâminas de aço elétrico, entre outros fatores. Existem três principais tipos de excentricidade: estática, dinâmica e mista. Esta última é uma combinação das outras duas.

A excentricidade estática, exemplificada na Figura 5(a), acontece quando o rotor e seu eixo se deslocam em relação ao centro geométrico do estator, com o rotor ainda rotacionando ao redor do seu eixo. Nesse caso, o ponto de menor entreferro é fixo durante o período de rotação. Assim, o seu deslocamento ocasiona em um entreferro não uniforme, o que leva ao aparecimento de uma força resultante na direção do menor entreferro.

A excentricidade dinâmica, exemplificada na Figura 5(b), acontece quando o rotor se desloca em relação ao eixo de rotação, fazendo com que ele realize um movimento de translação dentro do entreferro. Nesse caso, também há o

aparecimento de uma força resultante na direção do menor entreferro. Porém, essa direção varia durante o período de translação.

Figura 5: (a) excentricidade estática e (b) excentricidade dinâmica

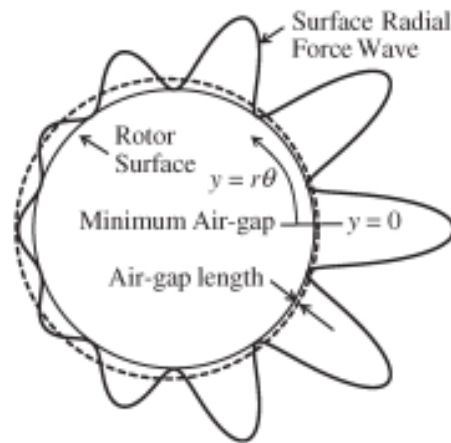


Fonte: Salah et al. (2019).

A excentricidade mista é a combinação dos dois tipos de excentricidade acima citados, como já mencionado. Na prática, este modo é o que ocorre de forma mais comum. Por outro lado, sua dinâmica é de difícil modelagem e foi poucas vezes abordada na literatura, não sendo objeto de estudo desse trabalho.

A Figura 6 exemplifica a excentricidade de rotor, que leva a assimetrias magnéticas ao longo do entreferro, resultando em distribuições de forças com a sua resultante diferente de zero. Essa força resultante, então, é aquela comumente denominada na literatura por UMP (*Unbalanced magnetic pull*). Ela está direcionada para o ponto de menor entreferro e pode causar diferentes tipos de problemas no motor, como desgastes no rolamento até eventualmente contato físico entre estator e rotor, como já mencionado.

Figura 6: Distribuição das forças ao longo do entreferro sob excentricidade



Fonte: Salah et al. (2019)

O tensor de Maxwell é um dos tratamentos mais eficazes para o cálculo de forças sobre um corpo submetido à ação de campos magnéticos [Bastos, 2018]. Para sua aplicação prática em um corpo é necessário o conhecimento da distribuição do campo magnético que o permeia, e que este corpo esteja envolto pelo ar ou por um material com a mesma permeabilidade.

Seja uma superfície $S(V)$ e \mathbf{n} um vetor unitário de direção e sentido normais a ela. O tensor de *Maxwell* sob a forma de densidade superficial de força é dado pela equação a seguir [Bastos, 2018].

$$\frac{d\mathbf{F}}{ds} = -\frac{\mu_0}{2} H^2 \mathbf{n} + \mu_0 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{H} \quad (1)$$

Onde:

H = campo magnético;

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo.

A Eq. (1) fornece a parcela infinitesimal de força presente em uma porção infinitesimal de área. Ao se integrar essa equação, obtém-se a força atuando sobre o centro de gravidade do corpo [Bastos, 2018].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será mostrado como foram modelados os motores de indução monofásicos e como foi desenvolvido um *script* para que essa modelagem seja realizada de maneira automática para os MIMs da empresa *Nidec Global Appliance* no *software* de análise por elementos finitos *Ansys Maxwell*. Essa rotina foi criada com o objetivo específico para posterior análise da força radial devido à excentricidade do rotor no motor de indução. Assim, a modelagem do motor no *software* levará isso em consideração em vários momentos.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Primeiramente é inicializado um projeto no *Maxwell* com sistemas de coordenadas XY, do tipo transiente e em 2D, que foi escolhido dessa forma por se esperar atender satisfatoriamente às necessidades, e também consumir um tempo inferior de simulação.

Algumas das limitações típicas relativas a simulações em 2D são as impossibilidades de contemplar as indutâncias de “cabeça de bobina” do estator, os anéis de curto-circuito do rotor e o ângulo formado pelas barras da gaiola do rotor em relação ao eixo, chamado de ângulo do *skew*. Para contornar essas limitações foram utilizadas as seguintes estratégias.

Segundo [Morgado, 2018], a indutância no *software* utilizado é calculada a partir da soma de duas componentes, sendo a primeira parcela representando a soma da indutância própria com a indutância mútua e a segunda parcela relativa à indutância de dispersão.

A primeira parcela é calculada automaticamente pelo *software* durante a simulação [Morgado, 2018]. A segunda parcela foi obtida simulando o mesmo motor no *software RMXprt*. Ao realizar essa simulação, é solicitada a criação de um modelo no *Maxwell*, que é feito automaticamente, e é gerado um circuito equivalente semelhante ao da seção 3.7, que será visto mais adiante, com o valor da indutância de dispersão do motor utilizado. Esse valor então é copiado ao circuito equivalente que será utilizado nas simulações.

O *RMXprt* é uma ferramenta de modelagem de máquinas elétricas baseada em modelo que oferece rápidos cálculos analíticos de desempenho, e produz geometrias

2D e 3D para cálculos mais detalhados por elementos finitos no *Ansys Maxwell* [EM Infinity, 20--].

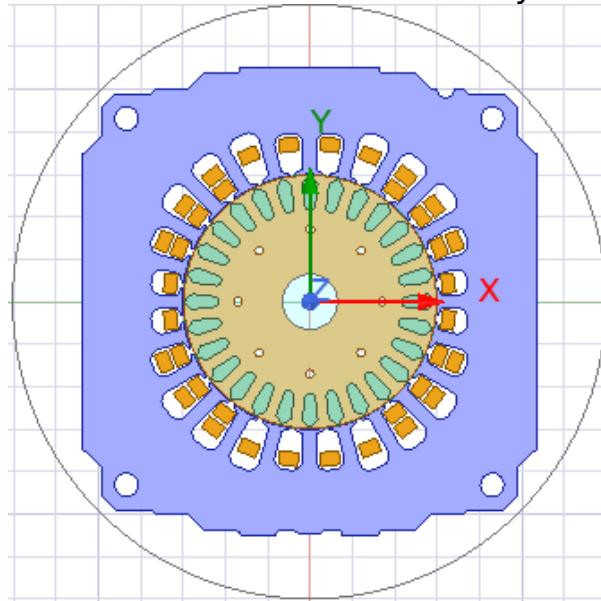
Os anéis de curto-circuito também foram modelados a partir de uma ferramenta do programa, onde são fornecidas as suas dimensões. O *software* calcula seus valores de resistência e indutância. Já no caso do *skew*, foi utilizado a ferramenta *skew model* disponível na aba *Design Settings* do *Maxwell*, que permite simular este efeito através do corte do rotor em um número de fatias especificadas pelo usuário, juntamente com o ângulo formado entre a primeira e a última fatia.

3.2 DEFINIÇÃO DO DESENHO

Com o projeto inicializado, o primeiro passo é importar os desenhos CAD 2D das lâminas de estator e rotor. Os arquivos de desenho, que estão na extensão .DXF, foram fornecidos pela empresa *Nidec Global Appliance* com a finalidade da realização deste trabalho. Após importadas para o *Maxwell*, as geometrias são alinhadas para que seus centros coincidam com o centro do sistema de coordenadas do projeto.

Os modelos dos enrolamentos do estator foram gerados a partir da ferramenta *ConCoil*, disponível na aba *Draw* do *Maxwell*. Porém, como o modelo utilizado é 2D, o resultado final são pequenos retângulos de “condutor” vistos de cima do plano, que representam o conjunto de fios esmaltados que formam cada enrolamento.

O desenho da lâmina do rotor fornecido não possuía as barras da gaiola de esquilo. Para gerá-las, ferramentas de geometria do *Maxwell* foram utilizadas, gerando-se um círculo com o mesmo raio do rotor, clonando-o e depois subtraindo dele o desenho da lâmina do rotor. A Figura 7 mostra o modelo do motor no *software* visto de cima do plano.

Figura 7: Modelo 2D do motor no *software Ansys Maxwell*

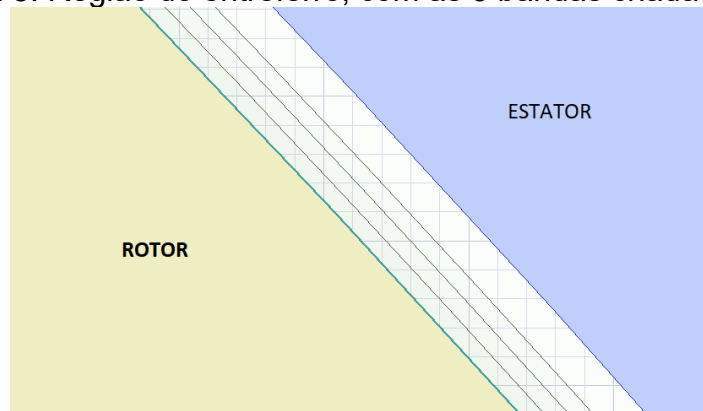
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

É necessário definir as condições de contorno do problema, com fronteiras ou bandas para o rotor, que será a parte móvel do esquema, como também para o domínio de cálculo como um todo.

A banda que envolve o rotor se localiza no entreferro, e delimita onde será gerado o movimento no domínio de cálculo. Outras duas bandas foram criadas - também no entreferro - interna e externamente à banda principal, separando o espaço entre estator e rotor em quatro partes, como aparece na Figura 8, onde foi dado um *zoom* na região do entreferro.

Figura 8: Região do entreferro, com as 3 bandas criadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A malha das bandas deve ser dividida em vários segmentos. Quanto maior o número de segmentos, mais fina é a malha, com maior precisão. Porém, o esforço computacional também aumenta. Portanto, essa quantidade deve ser escolhida seguindo um compromisso entre esses dois fatores.

A fronteira que contém todo o domínio de cálculo, que pode ser observada na Figura 7, é necessária pois define a extensão do domínio de análise, eliminando a necessidade de análise de forças além dela e permitindo um correto dimensionamento de malhas do problema, além de melhorar a eficiência computacional e dos resultados de cálculo. Foi definido um valor constante e igual a zero para o vetor potencial magnético nessa fronteira.

3.4 NOVO SISTEMA DE COORDENADAS PARA CONDIÇÃO DE EXCENTRICIDADE ESTÁTICA

Um novo sistema de coordenadas também deve ser gerado para a simulação da condição de excentricidade estática. A origem do novo sistema de coordenadas na direção x deve ser o valor da excentricidade do rotor. Com isso, a banda de movimento será referenciada a esse sistema e o rotor irá rotacionar sempre sobre seu eixo. Caso contrário, quando excêntrico, o rotor iria realizar movimentos de translação em relação a origem do sistema global de coordenadas (0,0,0), condição que representa excentricidade dinâmica.

3.5 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Uma variável relacionada ao movimento do rotor na direção x deve ser gerada. Esta variável é responsável por gerar a excentricidade no motor. A variável é relacionada com os objetos móveis - lâminas do pacote do rotor e barras da gaiola de esquilo – e, então, tem seu valor modificado para avaliação da excentricidade em várias extensões.

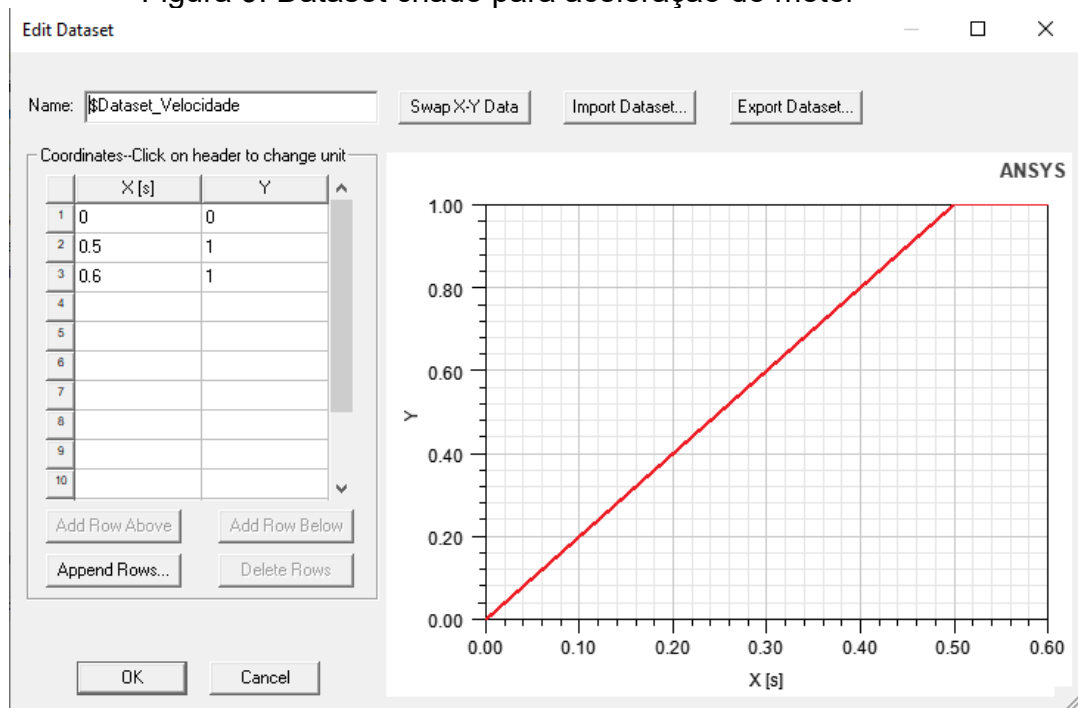
O motor de indução monofásico tem a particularidade de necessitar de métodos específicos de partida para seu funcionamento. Esse método consiste, na maior parte das vezes, na inserção de um enrolamento auxiliar, e o acréscimo ou não de um capacitor em série com esse enrolamento. Por conta dessa particularidade, a sua simulação no *software* utilizado se torna um pouco mais desafiadora. Para isso, foram concebidas três condições onde as forças radiais serão avaliadas: (1) Rotor

bloqueado; (2) Comportamento em período transitório; (3) Comportamento em regime permanente.

A primeira condição é importante pois é nela que ocorrem as forças máximas sobre o rotor. Para implementar, basta ajustar a velocidade angular do rotor para o valor nulo.

O comportamento em período transitório simula o comportamento do motor desde a sua energização até o momento em que o enrolamento auxiliar é desligado a partir da atuação do dispositivo de partida, geralmente quando o motor atinge 75% da sua velocidade nominal. Para se efetuar esta simulação, foi gerado um *dataset*, como mostra a Figura 9, onde a velocidade é aumentada de forma linear até 0,5 [ms] e, após, estabiliza até 0,6 [ms].

Figura 9: Dataset criado para aceleração do motor



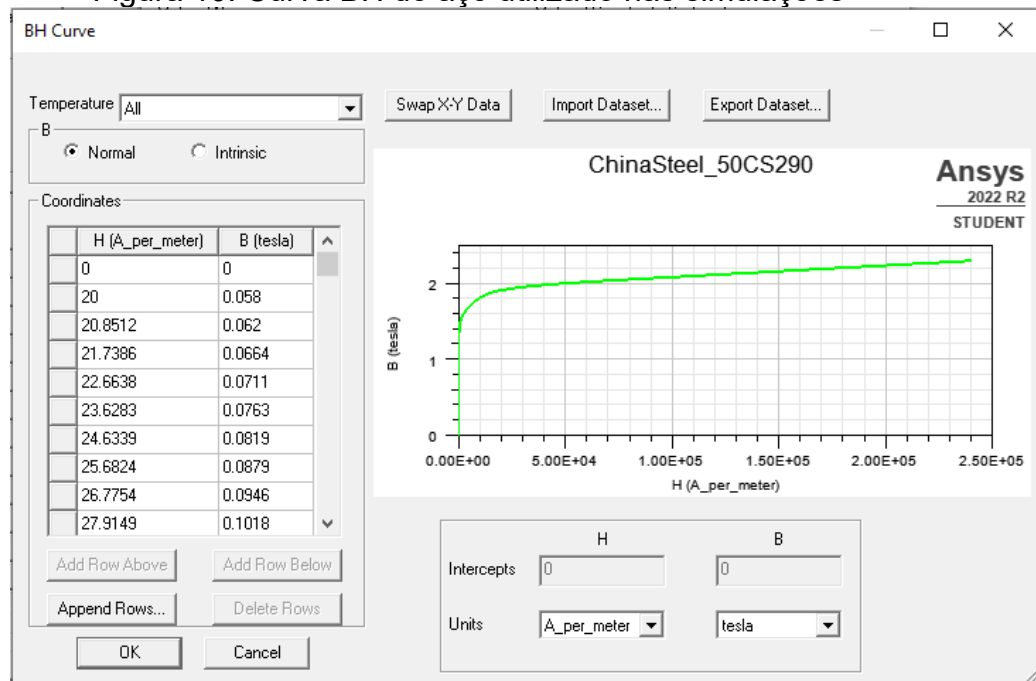
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em regime permanente, o rotor já parte de sua velocidade final. Por esse motivo, nesse caso, no início dos gráficos é comum aparecer um comportamento transitório com valores muito mais altos que os de fato presentes nessa condição de operação. Portanto, para a apresentação dos resultados no presente trabalho, foram desconsiderados os valores de força gerados antes de 100 [ms] nessa condição de operação, passando a serem contabilizados somente após esse instante de tempo.

3.6 MATERIAIS EMPREGADOS NO MIM

Os materiais utilizados para atribuição aos componentes do motor elétrico neste trabalho são todos disponíveis por padrão na biblioteca do *software* utilizado. O aço elétrico, utilizado nas lâminas de estator e rotor, é o *ChinaSteel 50CS290*. O *grade* do aço é 0,5 [mm] de espessura e 2,9 [W/kg] de perdas quando submetido a 1,5 [T] à 50 [Hz] - níveis de perdas comuns em aços elétricos que constituem o núcleo de motores com características e aplicações semelhantes ao utilizado. A curva de magnetização inicial deste aço é o gráfico da curva BH da Figura 10.

Figura 10: Curva BH do aço utilizado nas simulações



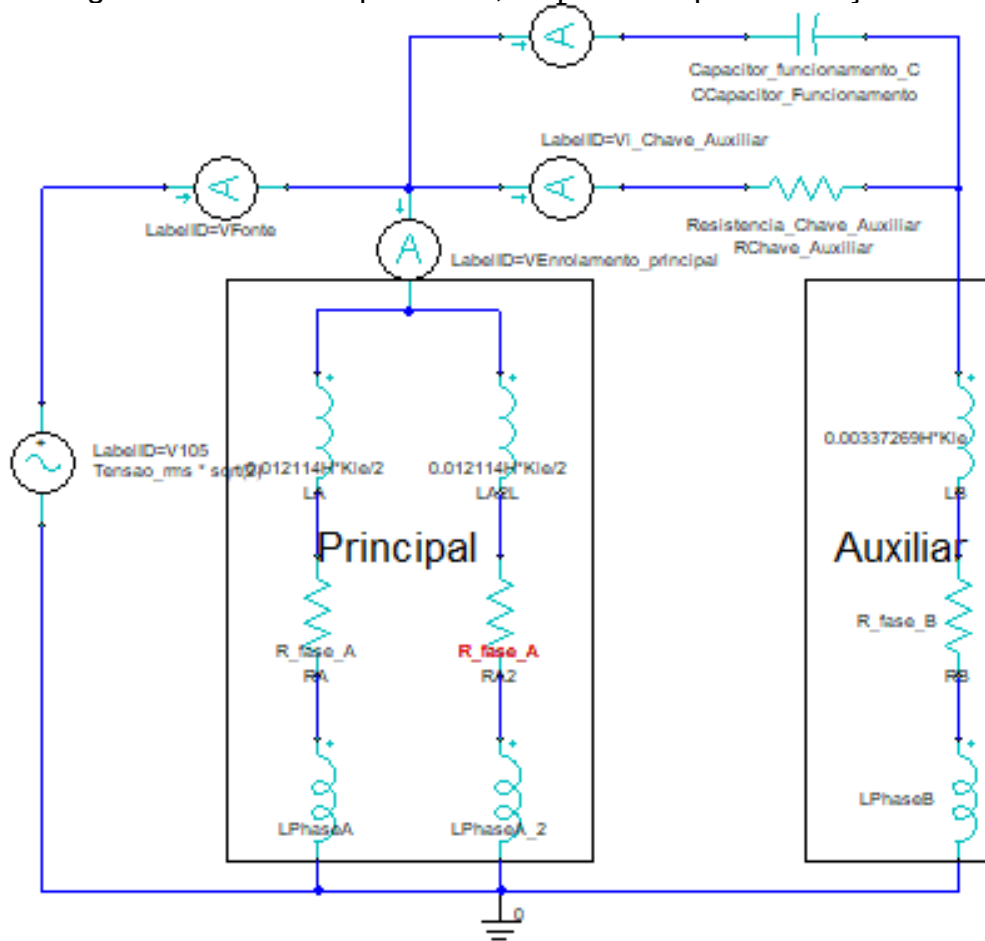
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O material utilizado para modelar os enrolamentos do estator e a gaiola do rotor é o alumínio, igualmente comum em enrolamentos de motores deste tipo.

3.7 CIRCUITO EXTERNO E EXCITAÇÃO

A excitação do motor irá ser gerada por um circuito externo, através da ferramenta *Maxwell Circuit Design*. Para isso, o circuito foi construído com os componentes dispostos da maneira conforme mostra a Figura 11.

Figura 11: Circuito equivalente, responsável pela excitação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando o esquema da Figura 11, percebe-se que se trata de um motor com capacitor de funcionamento, comumente conhecido como RSCR. Nesse caso, a dinâmica do dispositivo de partida foi emulada criando-se dois circuitos diferentes. O primeiro simulando as condições de rotor bloqueado e de período transiente, no qual o contato da chave está fechado – condição emulada por uma resistência de valor muito baixo ($0,1 \Omega$) em paralelo com o capacitor. O segundo circuito simula o comportamento em regime permanente, quando a chave centrífuga se abre com o alto giro do rotor, que no circuito é representada por uma resistência de valor extremamente elevado ($10 \text{ k}\Omega$) em paralelo ao capacitor.

O circuito ilustrado na Figura 11, assim como o circuito pertencente ao motor padrão utilizado nas simulações, conta com dois ramos em paralelo representando o enrolamento principal, que está fisicamente também conectado dessa forma. Em uma das simulações realizadas, avaliou-se a diferença nas forças radiais devido ao tipo de

conexão dos enrolamentos, comparando as conexões série e paralelo. Para esse caso, o circuito acima foi modificado para a conexão série no enrolamento principal.

Cada retângulo contido nas ranhuras do estator no desenho da Figura 7, representando a vista 2D superior dos enrolamentos, possui uma quantidade de fios (condutores), que foi especificada na construção do modelo. Eles possuem também uma polaridade, para sinalizar o sentido da corrente no enrolamento. Dividindo esse desenho da Figura 7 horizontalmente em duas partes iguais, os retângulos da parte superior referentes ao enrolamento principal foram definidos com polaridade positiva e os da parte inferior, negativa. Para o enrolamento auxiliar prosseguiu-se de maneira análoga, com os retângulos da parte esquerda definidos com polaridade positiva e da parte direita, negativa.

Por ser uma geometria 2D, as barras da gaiola do rotor não estão inicialmente conectadas entre si através do anel. Para resolver esta questão, existe uma ferramenta no *software* que realiza essa ligação, bastando informar os valores de resistência e indutância entre duas barras. Esses valores foram obtidos através de simulação prévia no *software RMXprt*.

Para excitar o motor é necessário conectar o circuito externo criado ao modelo que está sendo produzido. Em cada ramo do circuito da Figura 11 há um elemento responsável pelo acoplamento do circuito com o modelo do motor no *Maxwell*. Novamente, como o motor utilizado como padrão possui conexão do enrolamento principal em paralelo, o desenho do motor da Figura 7 foi dividido verticalmente na metade e os “retângulos” - que representam a vista 2D dos enrolamentos da esquerda foram associados a um ramo do enrolamento principal do circuito e os da direita ao outro ramo. O enrolamento auxiliar, que está representado no desenho pelos quadrados da parte mais externa das ranhuras do estator e disposto de forma perpendicular ao enrolamento principal, também foi conectado ao ramo auxiliar do circuito externo.

3.8 PASSO DE CÁLCULO E TEMPO DE SIMULAÇÃO

As soluções foram definidas para um passo de cálculo de 0,833 [ms], valor aproximadamente vinte vezes menor que o período de rotação do motor, e que se mostrou satisfatório. Os tempos de simulação para as três condições de operação foram escolhidos empiricamente utilizando-se de uma regra arbitrada que o valor da

força em um ponto no tempo não poderia exceder em mais do que 3% a força no mesmo ponto no período imediatamente anterior.

3.9 SCRIPT IMPLEMENTADO

O *script* comentado no início deste capítulo foi criado com a intenção de automatizar o *setup* dos dados do motor no *software*, reduzindo o tempo despendido para esta tarefa de mais de uma hora para cerca de três minutos.

O código foi escrito na linguagem *VBscript*, comumente utilizada para automação de tarefas e suportada pelos *softwares Microsoft Excel e Ansys Maxwell*, permitindo a comunicação entre os dois. Para a sua criação, primeiro foi obtida uma base de dados em arquivo *Excel* contendo todos os motores da empresa e atualizada diariamente de forma automática através de *macros*. A partir desses dados foi criada uma planilha onde, ao entrar com o código do motor e o tipo de rotor no campo solicitado, as características construtivas pertinentes à simulação no *Maxwell* aparecem na tela.

Um exemplo da planilha criada pode ser visto na Figura 12, onde a maior parte dos dados construtivos foram propositalmente omitidos por questões de sigilo.

Figura 12: Planilha com os dados do motor a ser modelado

Motor	--	Search	Clear	Create Maxwell Design				
Select rotor lamination								
Lam type	--	MW mat	Al	AW mat	Al	Kit nº	--	
Rotor lamination	--	MW diam	--	AW diam	--	Start system	PTC / TSD	
Air gap	--	MW res	--	AW res	--	Type of motor	RSIR	
Steel type	--	MW R1	--	AW R1	--	Start capacitor	--	
Voltage supply	220	MW R2	--	AW R2	--	Run capacitor	--	
Freq	60	MW R3	--	AW R3	--			
Conn. Type	B	MW R4	--	AW R4	--			
Rotor ID	--	MW R5	--	AW R5	--			
Rotor OD	--	MW R6	--	AW R6	--			
Stator ID	--							
Stator OD	--							
Rotor speed	3515rpm							
Rated output power	--							
Rotor radial shift	54%							
Rotor end ring width	--							
Rotor end ring height	--							
Rstart	0.1ohm							
Rrun	1000ohm							
Switching Speed	2700rpm							
Stack Height	--							

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base nesses dados da planilha, o usuário pode tanto realizar testes fazendo modificações nos valores das células, quanto apenas conferir a consistência dos dados apresentados e pressionar o botão *Create Maxwell Design* para o *script* realizar o seu trabalho. O código basicamente realiza todos os passos descritos no presente capítulo, exceto alguns raros pontos onde o programa *Ansys Maxwell* não aceita automações. Nesses casos, foram criadas caixas de diálogo informando o usuário a tarefa a ser realizada.

Neste capítulo foram apresentados todos os procedimentos utilizados para a modelagem do motor de indução no *software* de análise por elementos finitos *Ansys Maxwell*, assim como a apresentação de uma rotina criada para a automação desse processo. No próximo capítulo a modelagem aqui apresentada será colocada em simulação e algumas variações no motor padrão serão testadas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas a partir da modelagem do motor de indução monofásico no software de análise por elementos finitos *Ansys Maxwell*, apresentada no capítulo anterior. Serão realizadas alterações construtivas em um motor da empresa *Nidec Global Appliance*, que será utilizado como padrão.

As alterações realizadas visam testar condições encontradas na literatura que demonstram influenciar na magnitude da força resultante devido à excentricidade do eixo do rotor em relação ao centro geométrico do estator. Dessa forma, deseja-se avaliar por meio de simulações essas condições para posterior validação prática na continuidade deste presente trabalho, caso benéficas para o motor.

Em um primeiro momento será discutida a influência da variação da saturação na UMP. Depois, dois diferentes tipos de conexão dos enrolamentos do estator (série e paralelo) terão seus resultados de simulação avaliados. O desvio angular (*skew*) nas barras da gaiola de esquilo terá sua influência analisada nas forças geradas com um rotor excêntrico. Posteriormente, será simulada a condição de falhas na gaiola do rotor em motores com e sem excentricidade. Todos os testes citados até então serão avaliados para uma condição de excentricidade estática. Por fim, será avaliada a condição de excentricidade dinâmica e seus valores de força resultantes comparados à excentricidade estática, para uma excentricidade de mesmo nível.

A excentricidade padrão utilizada durante todas as simulações apresentadas a seguir, exceto quanto dito contrário, é um deslocamento do rotor causando uma redução de cerca de metade do comprimento do entreferro (54,54%) na direção positiva do eixo x.

Ainda, os termos “força radial” e “UMP” daqui em diante serão utilizados como sinônimos e irão se referir à força resultante no rotor devido à sua excentricidade em relação ao estator.

4.1 MOTOR PADRÃO UTILIZADO

Por questões de padronização foi escolhido arbitrariamente um motor utilizado na empresa onde o trabalho foi desenvolvido e realizadas simulações de força radial. Posteriormente, a partir dele, foram realizadas modificações construtivas com a

finalidade de testar estratégias, realizar comparações e atingir os objetivos propostos do trabalho. Os dados desse motor padrão para as simulações estão na Tabela 1.

Tabela 1: Informações sobre o motor utilizado nas simulações

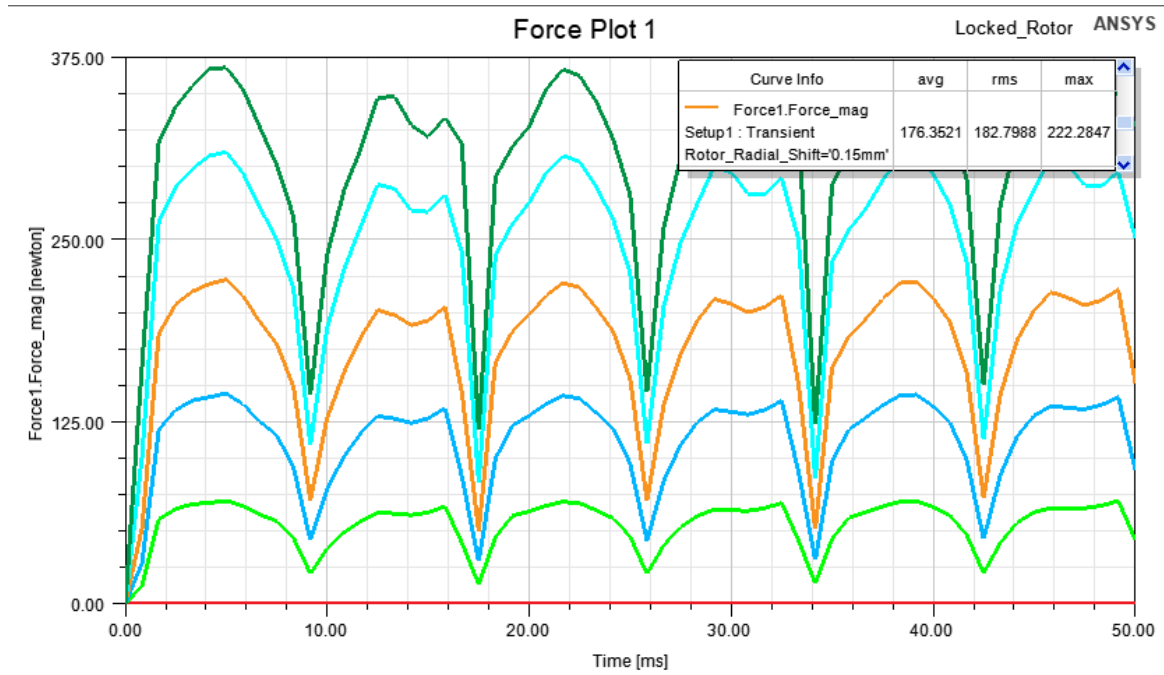
Tensão	220 V
Frequência	60 Hz
Número de polos	2
Tipo de motor	RSIR
Tipo de conexão dos enrolamentos do estator	Paralelo

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Utilizando-se da função *Optimetrics* do *Ansys Maxwell*, na condição de rotor bloqueado, foi realizada sequencialmente a simulação do motor padrão primeiramente com o rotor não apresentando excentricidade para fins de validação do modelo e, depois, introduziu-se diferentes níveis de deslocamento do eixo do rotor na direção positiva do eixo x. Aqui, o deslocamento é mostrado na forma de porcentagem em relação ao valor do entreferro total: 0%; 18%; 36%; 54%; 72%; 84%. A Figura 13 apresenta as formas de onda da força radial para os valores de excentricidade, onde na cor vermelha é para o caso de 0%; na cor verde claro 18% e assim sucessivamente.

A força resultante para o primeiro caso da Figura 13 (em vermelho), sem excentricidade, é nula como esperado, já que com o rotor concêntrico as forças se anulam, pois o caminho magnético é igual em lados diametralmente opostos do entreferro. Nota-se, como esperado, que com o aumento da excentricidade, as amplitudes das forças radiais também aumentam.

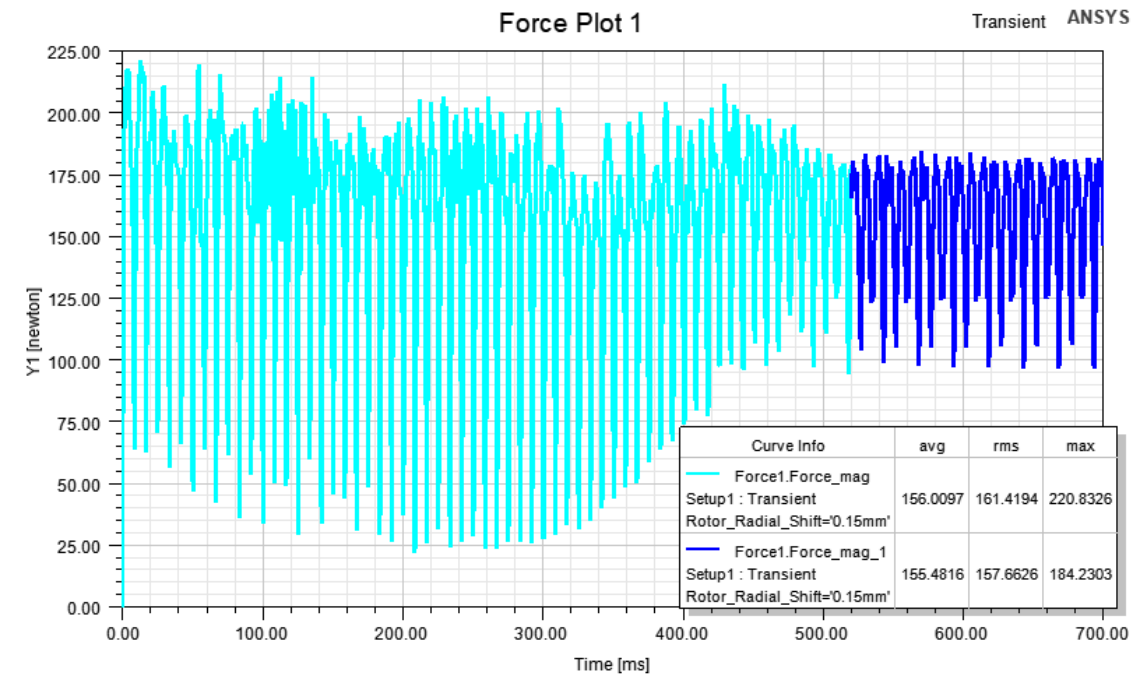
Figura 13: Gráficos de força no tempo para rotor bloqueado sob diferentes excentricidades



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A evolução das forças radiais para uma excentricidade de 54% no período de transiente, onde os dois enrolamentos estão conduzindo corrente e gerando campo magnético, está mostrada na Figura 14. Durante o período de transiente, o valor de pico da força resultante é da mesma magnitude do valor de pico na condição de rotor bloqueado para mesmo nível de excentricidade (vide Figura 13, cor laranja).

Figura 14: Gráficos de força no tempo para período transiente sob 54% de excentricidade

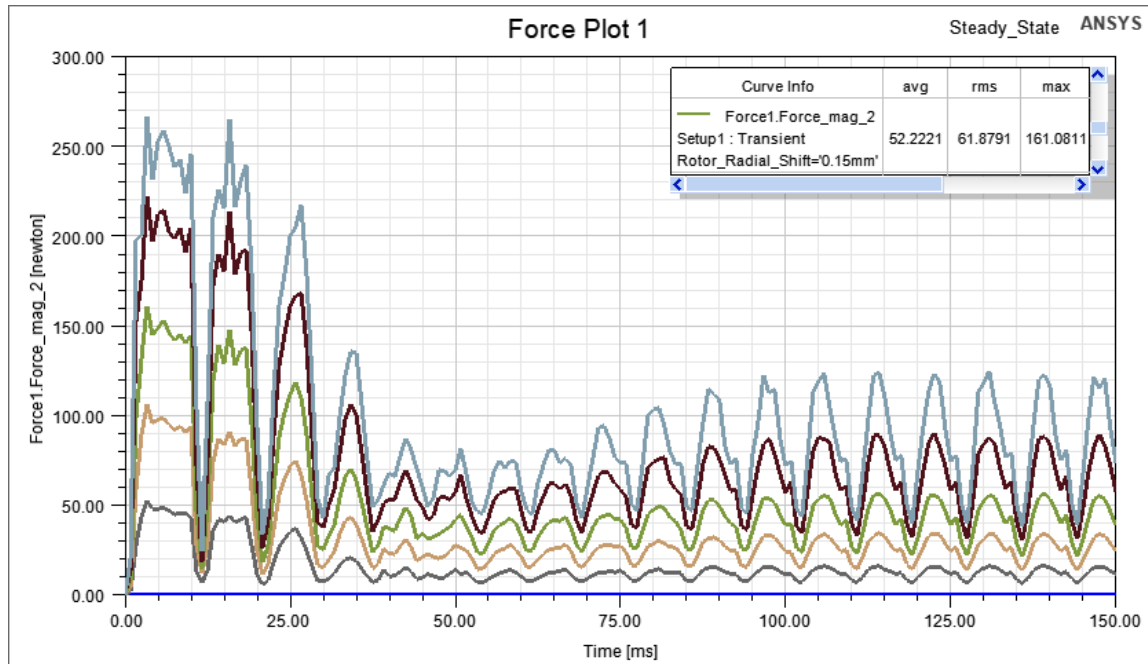


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Utilizando-se novamente da função *Optimetrics*, na condição de regime permanente, foi realizada sequencialmente a simulação do motor padrão primeiramente com o rotor não apresentando excentricidade para fins de validação do modelo e, depois, introduziu-se diferentes níveis de deslocamento do eixo do rotor na direção positiva do eixo x. Aqui, o deslocamento é mostrado na forma de porcentagem em relação ao valor do entreferro total: 0%; 18%; 36%; 54%; 72%; 84%. A Figura 15 apresenta as formas de onda da força radial para os valores de excentricidade, onde na cor azul é para o caso de 0%; na cor cinza 18% e assim sucessivamente.

Observa-se passados 100 [ms], determinado como o tempo a partir do qual as curvas se estabilizam, que o aumento das forças resultantes não é linear com o nível de excentricidade imposto.

Figura 15: Gráficos de força no tempo para regime permanente sob diferentes excentricidades



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

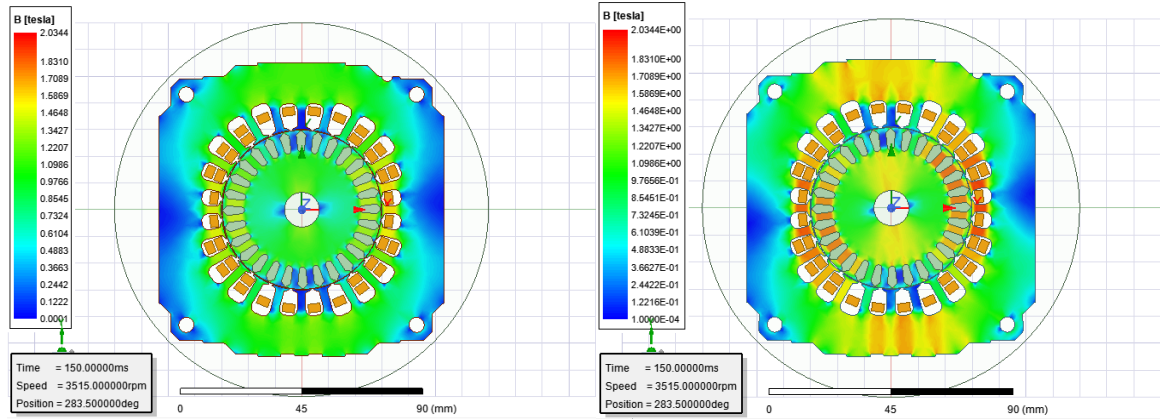
4.2 EFEITO DA SATURAÇÃO

A saturação nos dentes pode causar uma redistribuição do fluxo magnético para uma forma mais regular, uma vez que o caminho de relutância é aumentado consideravelmente na porção mais estreita do entreferro por conta do fluxo concentrado [Dorrell, 1999]. Isso teria como resultado a diminuição da força radial resultante.

Utilizando o motor padrão apresentado como base, a estratégia rápida utilizada para aumentar a saturação do aço foi diminuir a altura do pacote de lâminas em aproximadamente 27%. Um valor extremamente alto, mas que foi escolhido dessa forma como uma maneira didática para que o efeito, se ocorrer, fique pronunciado.

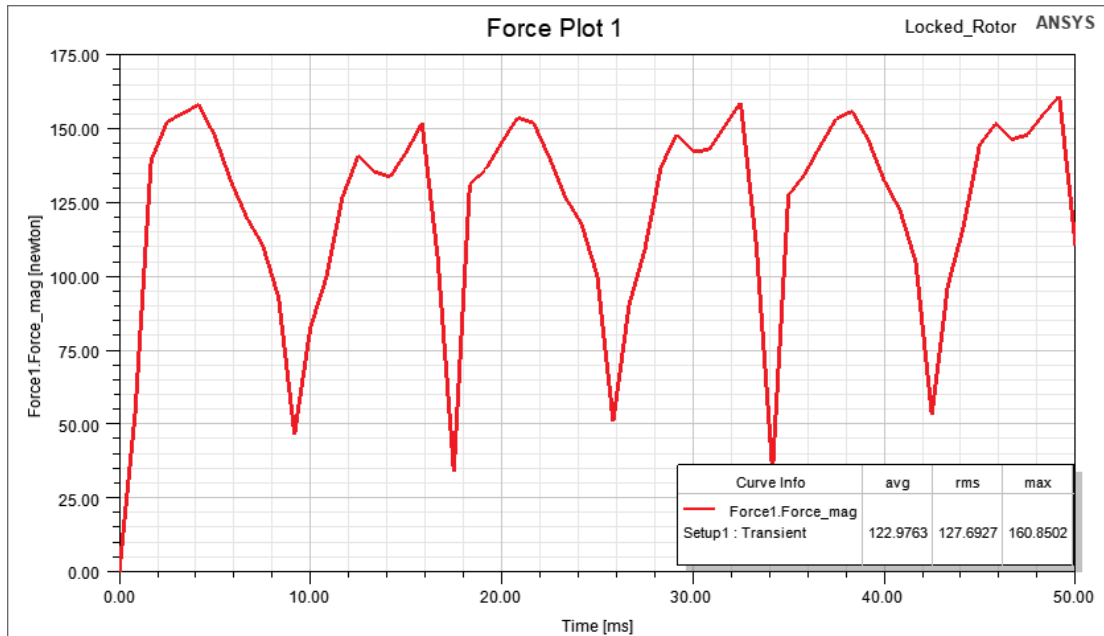
Na Figura 16 pode ser visualizado o efeito da saturação nas lâminas, onde percebe-se que é mais pronunciado na região próxima dos dentes. Em seguida, na Figura 17, Figura 18 e Figura 19 são mostrados os gráficos da força resultante para três condições: rotor bloqueado, regime transitório e regime permanente.

Figura 16: Comparação entre (a) lâmina padrão e (b) lâmina saturada



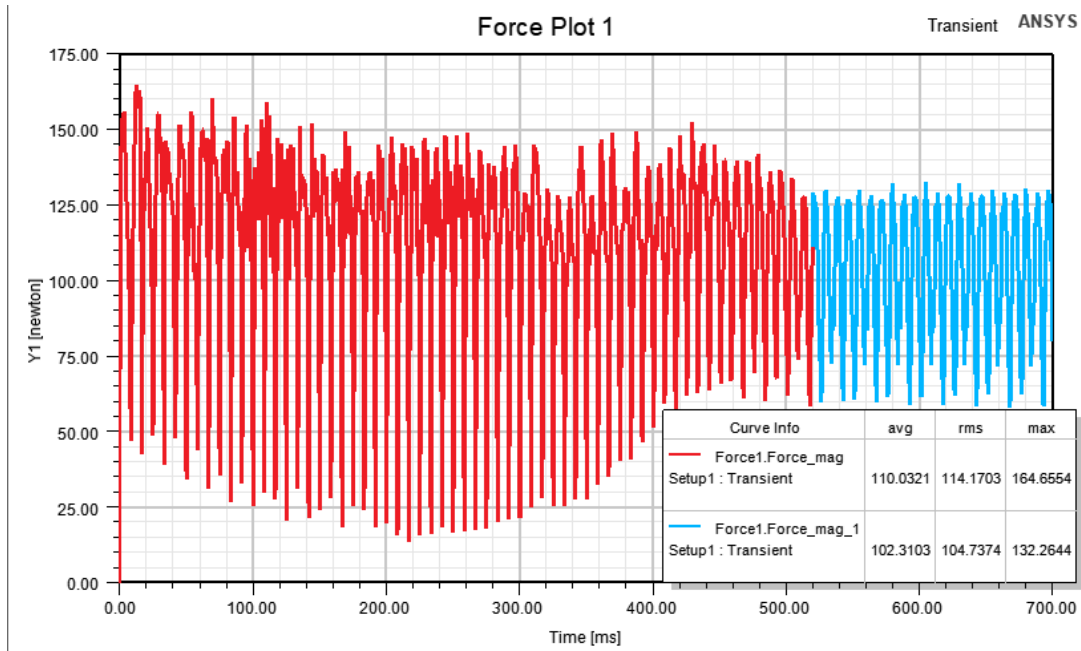
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 17: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, sob saturação e excentricidade



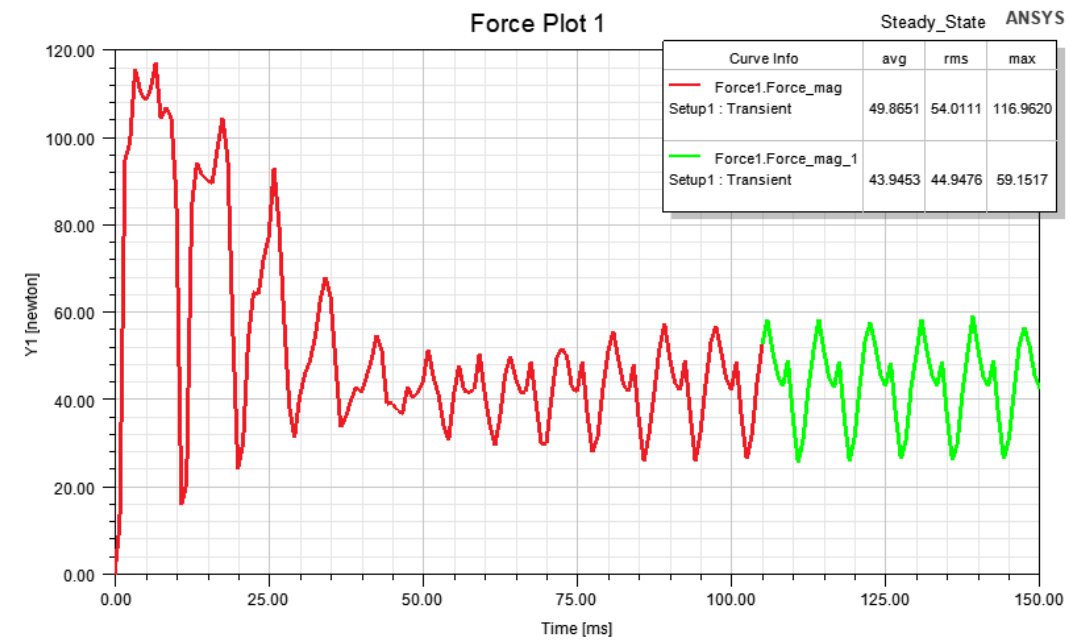
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 18: Gráfico de força no tempo para período transiente, sob saturação e excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 19: Gráfico de força no tempo para regime permanente, sob saturação e excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando agora os resultados dos gráficos da força radial no tempo para as três condições previamente estabelecidas, percebe-se que com o acréscimo da saturação há uma redução significativa de cerca de 30% na média da força radial para o caso de rotor bloqueado. Essa mesma redução é visível durante o período transiente, onde o enrolamento auxiliar ainda está ligado. Porém ao atingir regime

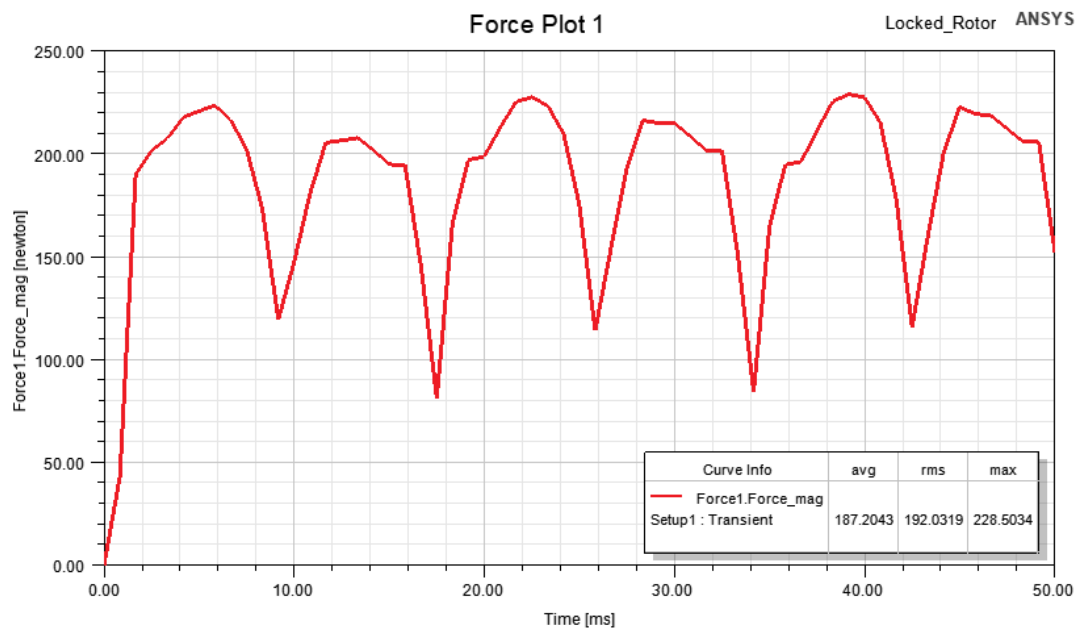
permanente, não é possível verificar alteração significativa nessa mesma força (vide Figura 19).

4.3 EFEITO DA CONEXÃO EM PARALELO

De acordo com o estudo de [DeBortoli et al., 1993], a conexão dos enrolamentos do estator em paralelo mitigaria os efeitos da excentricidade do rotor, pois a corrente localizada nos enrolamentos do lado onde o entreferro é maior teria seu valor aumentado, de forma a compensar o desbalanceamento de fluxo causado pela maior relutância. Do mesmo modo, a corrente no lado de menor entreferro teria, naturalmente, seu valor reduzido. Com isso, a distorção na indução magnética gerada pela excentricidade seria reduzida.

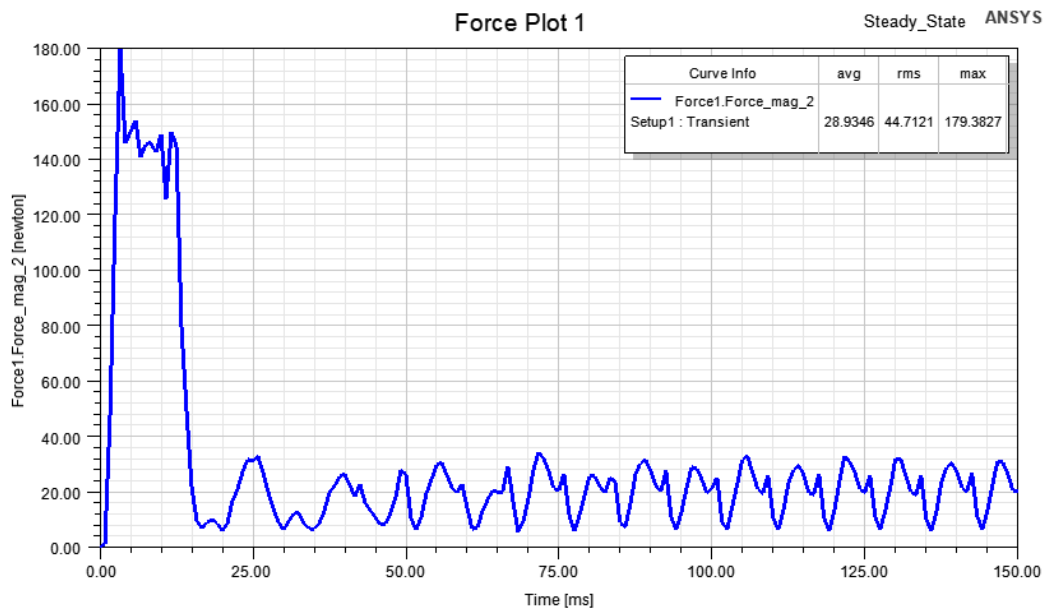
Como o motor utilizado como padrão já possui os enrolamentos do estator conectados em paralelo, foi adotada a estratégia de modificar os enrolamentos para uma conexão em série, a fim de realizar as comparações desejadas. Os resultados das simulações realizadas para conexão dos enrolamentos em série estão apresentados na Figura 20 e Figura 21 para as condições de rotor bloqueado e regime permanente, respectivamente.

Figura 20: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, com conexão tipo série dos enrolamentos e excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 21: Gráfico de força no tempo para regime permanente, com conexão tipo série dos enrolamentos e excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Observando o gráfico para o caso de conexão em paralelo em regime permanente (vide Figura 15, curva na cor verde), percebe-se um aumento muito acentuado na média da UMP em relação à conexão em série (vide Figura 21), fato não esperado e que não conseguiu ser explicado pelo autor.

Para a condição de rotor bloqueado, pode-se observar uma redução de cerca de 6% na média da UMP da conexão em paralelo (vide Figura 13, curva na cor laranja) em relação à em série (vide Figura 20). É um resultado de redução relativamente baixa frente aos 23% apresentados em [DeBortoli et al., 1993]. Isso foi em partes explicado por [Dorrell et al., 1996], quando mostrou que essa estratégia é muito menos efetiva se o motor contém um rotor do tipo gaiola de esquilo, pois esta já possui uma série de conexões em paralelo que já realizam o papel de compensar o valor da corrente.

A estratégia seria mais efetiva para um motor com rotor bobinado, porém visto que não foi encontrado na literatura grandes aplicações desse tipo de rotor em motores para utilização em compressores herméticos, pode-se concluir que a estratégia é pouco efetiva para a redução da UMP no tipo de motor estudado.

4.4 EFEITO DO SKEW

O *skew*, ou desvio angular, é o ato de inclinar as barras da gaiola do rotor em um ângulo definido segundo um cálculo. Essa estratégia é utilizada por alguns motivos. Entre eles, pode-se citar:

- Aumentar o torque de partida: com a inclinação da barra, o seu comprimento aumenta. A resistência nas barras também aumenta, pois tem relação direta com o comprimento. Com isso o fator de potência é melhorado e, por consequência, o torque de partida.
- Reduzir o *cogging*: *cogging* é o efeito que ocorre quando o número de ranhuras do estator é igual ou múltiplo inteiro ao do rotor. Quando isso acontece, em alguns casos o rotor é impedido de girar devido à fenômenos magnéticos resultantes do alinhamento dos dentes do estator e do rotor. O desvio angular evita esse alinhamento.

O motor utilizado como padrão já possui o *skew*, que foi modelado a partir da ferramenta *skew model*, do *Ansys Maxwell*. Esta ferramenta simula a inclinação dividindo o rotor em fatias especificadas pelo usuário. Por conta disso, foi realizada a simulação do motor com o rotor sem o desvio angular, com a finalidade de comparar e verificar possível diferença.

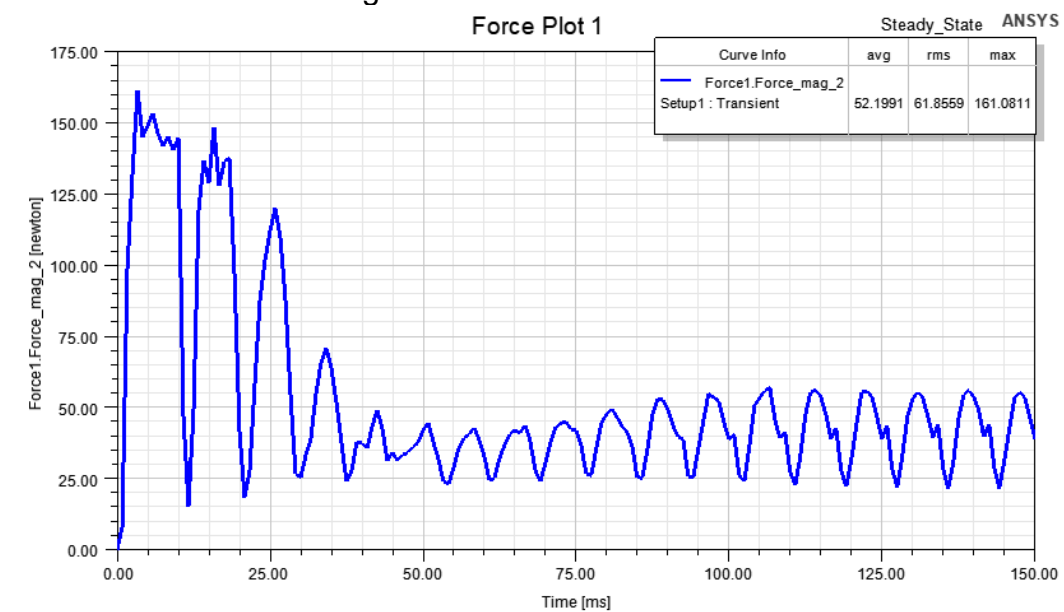
Os resultados da simulação para as condições de rotor bloqueado e regime permanente estão apresentados na Figura 22 e na Figura 23, respectivamente, a seguir.

Figura 22: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, sem inclinação das barras da gaiola do rotor e com excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 23: Gráfico de força no tempo para regime permanente, sem inclinação das barras da gaiola do rotor e com excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na situação de rotor bloqueado (vide Figura 22), foi observada uma força média resultante cerca de 16% menor em relação ao caso com o *skew* (vide Figura 13, curva na cor laranja). Isso pode indicar que o desvio angular especificado, embora seja necessário e benéfico para o motor devido aos motivos já citados, contribui para o aumento das forças radiais em caso de excentricidade do rotor. O resultado aqui obtido está de acordo com os obtidos em [Dorrell, 1996].

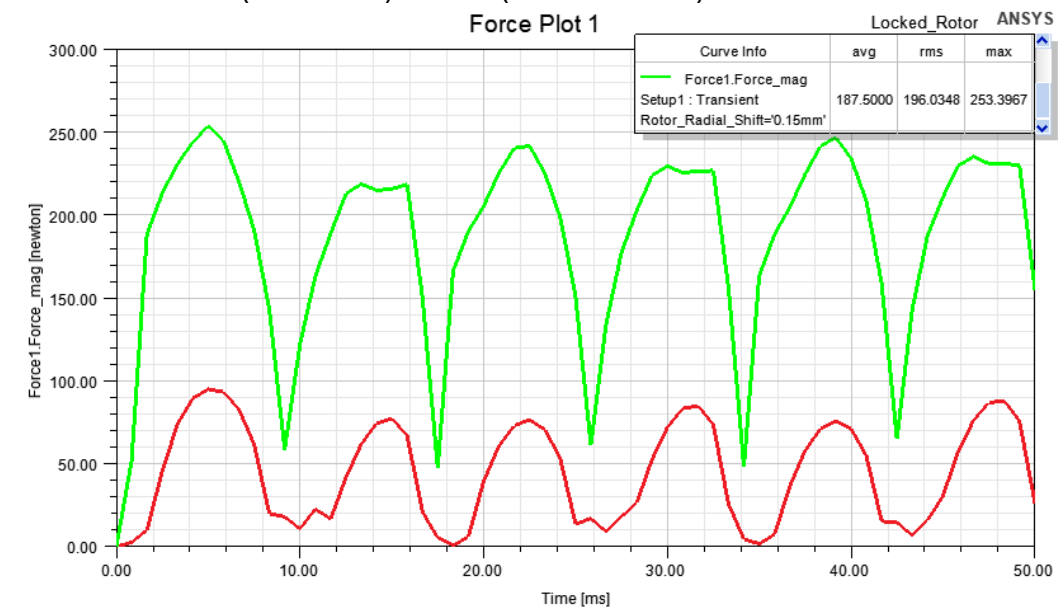
Na condição de regime permanente, não foi observada alteração na força.

4.5 EFEITO DE FALHAS NA GAIOLA DO ROTOR

O rotor do tipo gaiola de esquilo, possui barras curto-circuitadas por anéis em seus terminais, formando um meio para passagem de corrente elétrica. Falhas originadas principalmente no processo de injeção da gaiola de alumínio no pacote do rotor causam a formação de bolhas de gás, elementos contaminantes ou até mesmo a quebra de uma barra da gaiola. Isso ocasiona uma diminuição da sua seção transversal e consequente aumento da resistência no local.

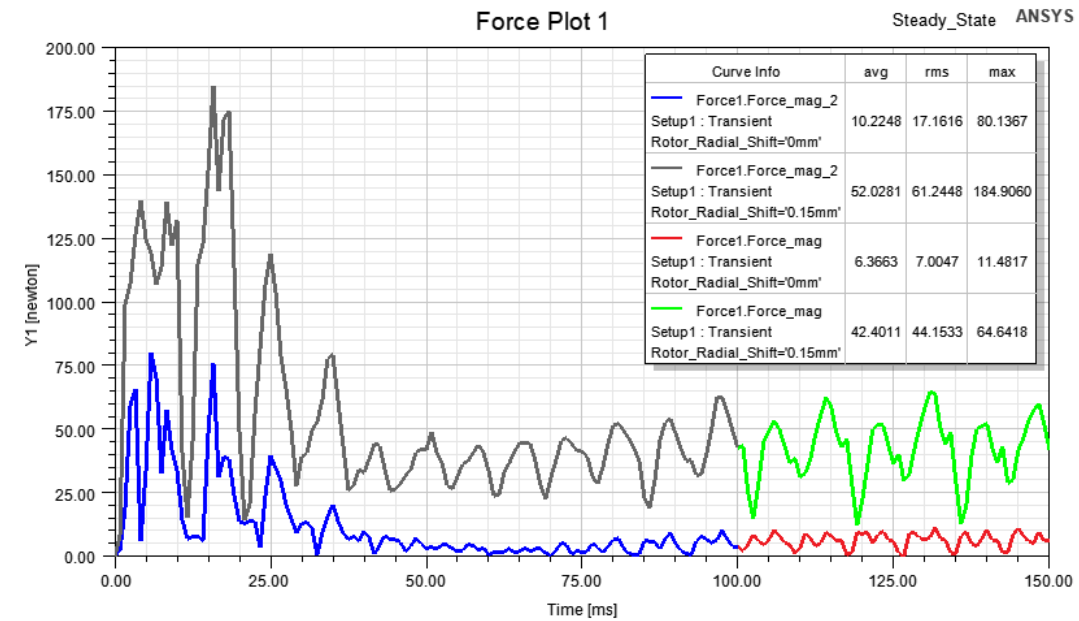
Para simulação desse efeito foi removida uma das barras do rotor do motor padrão que vem sendo utilizado, deixando-o com 27 barras. Foram simuladas as condições de rotor bloqueado e regime permanente, utilizando primeiramente o rotor concêntrico e depois adicionando excentricidade. Os resultados estão mostrados na Figura 24 e na Figura 25 abaixo, onde mostra os resultados para as condições de rotor bloqueado e regime permanente, respectivamente.

Figura 24: Gráfico de força no tempo para rotor bloqueado, com uma barra ausente, com (em verde) e sem (em vermelho) excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 25: Gráfico de força no tempo para regime permanente, com uma barra ausente, com (em cinza/verde) e sem (em azul/vermelho) excentricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como pode ser visto na Figura 24, na cor vermelha e na Figura 25, nas cores azul/vermelha, o efeito da obstrução na gaiola do rotor se pronunciou mesmo quando a excentricidade é nula, indicando que essa falha por si só já produz certos níveis de forças radiais resultantes.

No caso de rotor bloqueado, quando aplicada a excentricidade (vide Figura 24, cor verde), a obstrução na gaiola do rotor aumentou a força radial média resultante em 6,3%, o que é um aumento baixo visto que apenas o fato do rotor apresentar essa obstrução, sem excentricidade, já havia levado a uma força média de 44,65 [N].

Com o motor em regime permanente, a força radial média resultante foi muito semelhante à do caso sem falhas na gaiola do rotor. A mudança apareceu apenas na forma de onda dessa força.

Os resultados obtidos vão relativamente de encontro aos de [Williamson et Al., 1997], onde segundo o estudo a força radial gerada devido à essa anomalia é relativamente baixa sem carga conectada, da ordem de menos de 1 [N], e chega à ordem de 7 [N] no caso com carga, para o motor de indução monofásico avaliado no estudo.

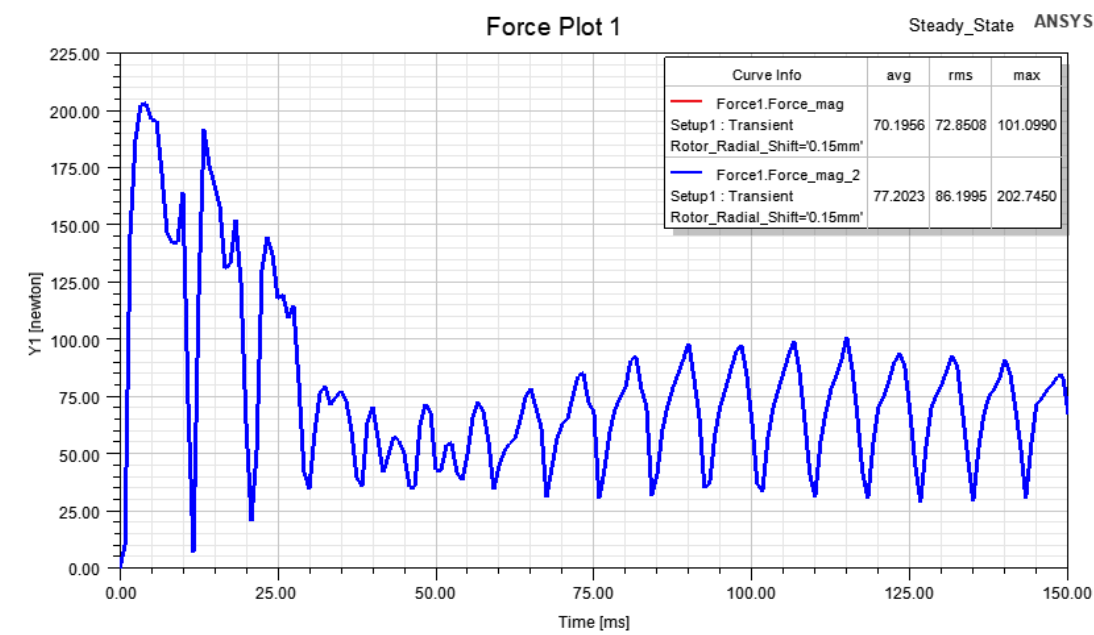
4.6 EFEITO DA EXCÊNTRICIDADE DINÂMICA

A excentricidade dinâmica ocorre quando o rotor e seu eixo rotacionam em relação ao eixo geométrico do estator, gerando um movimento de translação. Dessa forma o ponto de menor entreferro é variável durante o período de rotação.

Na condição de rotor bloqueado, espera-se que não haja diferenças nas curvas de força resultante em comparação à excentricidade estática, por conta de o deslocamento inicial sempre ser feito na direção positiva do eixo x. Essa condição foi avaliada apenas para validação das alterações realizadas no modelo para que a simulação da excentricidade dinâmica fosse realizada, e não é mostrada no presente trabalho.

Na Figura 26 é mostrado o gráfico da força resultante para a condição de regime permanente.

Figura 26: Gráfico de força no tempo para regime permanente, sob excentricidade dinâmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para a condição de regime permanente, observa-se na Figura 26 uma força média cerca de 64% maior em relação ao caso da excentricidade estática (Figura 15, curva verde) para o mesmo nível de excentricidade aplicado. Analisando o formato da curva na Figura 26, pode-se observar uma tendência de variação da sua amplitude, onde mesmo depois de 100 [ms] houve variação do seu valor de pico de 100 [N] à 85 [N].

Depois do período de tempo de 100 [ms], que para o presente trabalho foi considerado atingido o regime permanente, tomando o valor de pico na Figura 15 e na Figura 26, observa-se um aumento próximo de 80% para a condição de excentricidade dinâmica.

Os dados apresentados podem indicar que a condição de excentricidade dinâmica é a mais danosa ao motor, dentre as condições avaliadas.

Neste capítulo, apresentou-se alguns resultados da aplicação da metodologia desenvolvida empregando os *softwares* mencionados, em um motor tomado como padrão, abordando o comportamento das forças radiais em função de excentricidades aplicadas.

5 CONCLUSÃO

A excentricidade em motores de indução são problemas inerentes ao processo de fabricação e existem independentemente da precisão atingida. Porém, problemas de excentricidades são mantidos sob controle através de ações de precisão nos processos produtivos para cumprimento das especificações.

Com o desenvolvimento desse trabalho, foi possível desenvolver um método para modelagem do motor de indução monofásico no *software* de análise de campos por elementos finitos *Ansys Maxwell*, com a finalidade de estudar as forças resultantes devidas à excentricidade do rotor.

Além do método desenvolvido, foi programada uma rotina na linguagem *VBscript* para a realização da modelagem do motor de forma automática, reduzindo todo o processo que comumente levava em torno de uma hora para cerca de cinco minutos.

Realizou-se uma revisão na literatura para buscar possíveis fatores que contribuem com o aumento ou redução da força resultante devido à excentricidade. Foram simuladas numericamente variações no nível de saturação, diferentes tipos de conexão dos enrolamentos do estator, inclinação das barras do rotor (*skew*) e falhas na gaiola do rotor. Alguns dos resultados obtidos confirmaram o que se encontrou na literatura, como o tipo de conexão dos enrolamentos do estator ter pouca influência na UMP em um motor com rotor em gaiola, a inclinação nas barras da gaiola do rotor aumentar a magnitude da UMP e falhas na gaiola do rotor terem pouca influência na UMP com o motor sob excentricidade. A condição de excentricidade dinâmica foi avaliada com o objetivo de comparar com a excentricidade estática. Os resultados podem indicar que a excentricidade dinâmica é mais danosa ao motor por apresentar valores mais altos de força resultante para mesmo nível de excentricidade aplicado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As seguintes sugestões são apontadas para trabalhos futuros:

- a) Uma possível abordagem a ser testada é a simulação da excentricidade mista, a mais recorrente na prática, porém de difícil modelagem em *software*.
- b) Realizar a modelagem e simulação em 3D, comparando resultados obtidos com as simulações em 2D, e concluindo sobre a necessidade ou não de

simulações em três dimensões para esse tipo de problema. Além disso, nas simulações em 3D pode ser possível avaliar outro caso de excentricidade, onde o rotor está inclinado axialmente dentro do entreferro.

- c) Realização de análises no espectro da frequência para verificar possíveis correlações de harmônicas com a excentricidade, fazendo possível sua detecção de forma não intrusiva.

Uma sugestão importante de continuidade deste trabalho é o desenvolvimento de um método de ensaio para validação na prática das conclusões apresentadas no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

COVO, A. **Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motors with Eccentric Rotors [includes discussion]** in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 73, no. 2, pp. 1421-1425, Jan. 1954.

MARIOTT, L. **Finite Element Calculation of Rotor Sidepull Forces in Single-Phase Induction Motors** (1994). International Compressor Engineering Conference. Paper 1063.

DORRELL, D.G. **Calculation of unbalanced magnetic pull in cage induction machines**, 1993, Tese de doutorado, University of Cambridge, UK.

DORRELL, D. G. **Calculation of unbalanced magnetic pull in small cage induction motors with skewed rotors and dynamic rotor eccentricity** in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 3, pp. 483-488, Sept. 1996.

WILLIAMSON, S. et al. **Rotor cage anomalies and unbalanced magnetic pull in single-phase induction motors** in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 6, pp. 1553-1562, Nov.-Dec. 1997.

DEBORTOLI, M. J. **Effects of rotor eccentricity and parallel windings on induction machine behavior: a study using finite element analysis** in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 2, pp. 1676-1682, March 1993.

SALAH, A. A. et al. **A Review of the Monitoring and Damping Unbalanced Magnetic Pull in Induction Machines Due to Rotor Eccentricity** in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3, pp. 2569-2580, May-June 2019

SOTOMAYOR, P. O. **Caracterização e simulação de compressores alternativos utilizando fluidos com baixo potencial de aquecimento global**. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO.

CAVIATIVA, J. A. **Avaliação dos ensaios de descargas parciais e de rotor bloqueado como formas de detecção de defeitos de fabricação em estatores de motores de indução monofásicos**. Dissertação de mestrado—Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.].

AMARAL, M. H. **Estudo e avaliação de métodos de análise das correntes do estator para a medição de entreferros de motores de indução monofásicos de compressores herméticos**. Dissertação de mestrado—Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.].

MORGADO, M. F. S. **Cunhas Magnéticas num Motor de Indução e Influência de Excentricidade nas Forças Eletromotrizes Induzidas no Veio**. Dissertação de mestrado—Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: [s.n.].

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase--Estática**. 4 ed. Revisada – Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2018.

EM Infinity. **RMXPRT**. [20--]. Disponível em: <<https://eminfinity.com/rmxprt/>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

DORRELL, D. G. **Experimental behaviour of unbalanced magnetic pull in 3-phase induction motors with eccentric rotors and the relationship with tooth saturation** in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 304-309, Sept. 1999.

Single Phase Induction Motor. Slide Player, 2019. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/15452974/>. Acesso em: 01 jun. 2023.

RAMIREZ, R. A. **Desenvolvimento da centrifugação de alumínio para a produção de rotores de motores elétricos**. Dissertação de mestrado—Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.].

ElectricPortal. *Why single-phase induction motor is not self-starting-reason,make self starting?*. ElectricPortal, 16 mar. 2023. Disponível em: <https://www.electricportal.info/2019/04/why-single-phase-induction-motor-not-self-starting-reason-make-self-starting.html>. Acesso em: 21 mai. 2023.

PAIOTTI, L. R. **Vibrações induzidas pelo campo eletromagnético no estator de motores de indução de compressores herméticos**. Dissertação de mestrado—Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.].

MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP. **Report of large motor reliability survey of industrial and comercial installations**. In *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865–872, Jul. 1985.

EPRI. **Improved motors for utility applications**. EPRI, Palo Alto, CA, USA, Final Rep., 1982.

DORRELL, D. G. et al. **Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors. Part 2: Experimental investigation**. *Proc IEE on Electric Power Applications*, vol. 143, no. 3, pp. 202-210, May. 1996.