

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME MARCON ZAGO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**MODELO DE MOTOR LINEAR A PARTIR DE MOTOR
ROTATIVO CORTADO**

Porto Alegre

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE MOTOR LINEAR A PARTIR DE MOTOR ROTATIVO CORTADO

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para Graduação em
Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis
Loureiro

Porto Alegre
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME MARCON ZAGO

MODELO DE MOTOR LINEAR A PARTIR DE MOTOR ROTATIVO CORTADO

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor (Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
Porto Alegre, Brasil)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica (University Of Wales College Of Cardiff –
Cardiff, País de Gales)

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica (UFRGS – Porto Alegre, Brasil)

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica (UNICAMP – Campinas, Brasil)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que me apoiaram incondicionalmente em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e à minha irmã, que sempre me apoiaram incondicionalmente.

Aos meus familiares, que sempre estiveram comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pelo tempo dedicado e pela disposição em me ajudar sempre que precisei.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma breve introdução sobre máquinas elétricas para depois introduzir o conceito de máquina setorial e demonstrar que essa pode ser utilizada para emular o comportamento de uma máquina linear. Serão apresentadas as diferenças entre os motores de indução rotativos e lineares. Serão apresentados parâmetros de construção e desempenho de um motor linear. A partir dos parâmetros mencionados, foi utilizado um estator cortado de um motor de indução rotativo para construir um motor setorial. Foram calculados os parâmetros de bobinagem e os enrolamentos foram refeitos para que o motor voltasse a funcionar.

Palavras-chave: Motor de indução linear, motor setorial

ABSTRACT

This paper presents a brief introduction about electrical machinery to then introduce the concept of the sector motor and demonstrate that it can be used to emulate the behavior of a linear motor. Differences between rotary and linear induction motors will be presented. Construction and performance parameters of the linear induction motor will be presented. Using the previously mentioned parameters, a stator was cut from a rotary induction motor to build a sector motor. The winding parameters were calculated and the winding was rebuilt, so that the motor started working again.

Key words: Linear induction motor, sector motor

Sumário

Sumário.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MÁQUINAS ELÉTRICAS	10
2.1 Máquinas de Corrente Contínua.....	10
2.2 Máquinas de Corrente Alterada.....	11
2.2.1 Tensão Induzida em Espira Única em Campo Magnético	12
2.2.2 Conjugado induzido em uma espira na qual circula corrente.....	14
2.2.3 Classificação de Máquinas de Corrente Alternada.....	16
2.2.3.1 Máquinas Síncronas	16
2.2.3.2 Máquinas de Indução	17
2.2.3.2.1 Aspectos Construtivos.....	17
2.2.3.2.2 Campo Magnético Girante	20
2.3 Circuito Equivalente do Motor de Indução Rotativo	22
2.3.2 Circuito Equivalente do Estator.....	22
2.3.3 Circuito Equivalente do Rotor.....	23
2.3.4 Circuito Equivalente Completo	25
3. MOTORES LINEARES.....	26
3.1 Características Construtivas	26
3.1.1 Motores Planos	26
3.1.2 Motores Setoriais.....	27
3.1.3 Motores Tubulares.....	28
3.1.4 Diferenças entre um motor rotativo e um motor linear	28
3.2 Campo Transladante.....	29
3.3 O Fator de Qualidade	32
3.4 Efeito Transversal de Borda.....	34
3.5 Efeito Longitudinal de Extremidade	37
3.5.1 Efeito Longitudinal de Extremidade em um MIL Setorial.....	39
3.6 Circuito Equivalente do Motor Linear	41
3.6.1 Circuito Equivalente de Duncan.....	42
3.6.2 Correntes do Circuito Equivalente	44
3.6.3 Análise do Circuito Equivalente.....	44
3.7 Bobinagem do Motor	48

3.7.1	Número de Ranhuras por Polo e por Fase	48
3.7.2	Passo da Ranhura.....	48
3.7.3	Fator de distribuição do enrolamento	49
3.7.4	Fator de passo	49
3.7.5	Fator de Enrolamento	50
3.7.6	Comprimento do Estator.....	50
3.7.7	Passo Polar.....	51
3.7.8	Fluxo magnético por polo.....	51
3.7.9	Número de espiras por fase	53
3.7.10	Seção do Fio	53
3.7.11	Procedimentos para cálculo de bobinagem	54
3.7.12	Ensaio para obtenção do Circuito Equivalente.....	58
3.7.13	Cálculo da potência e das perdas do motor	59
4.	CONCLUSÃO.....	61
	Referências Bibliográficas.....	62

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação de máquina CC	10
Figura 2 – Espira única em campo magnético constante.....	11
Figura 3 - Vista frontal de espira em campo magnético uniforme	12
Figura 4 - Tensão induzida x Ângulo da Espira	14
Figura 5 - Representação da força exercida nos 4 segmentos da espira.....	15
Figura 6 - Rotor de máquina síncrona com anéis coletores.....	17
Figura 7 - Estator de máquina de indução	18
Figura 8 - Rotor bobinado de máquina de indução	19
Figura 9 - Rotor gaiola de esquilo	19
Figura 10 - Representação de enrolamento de estator trifásico.....	21
Figura 11 - Análise gráfica da soma dos campos magnéticos.....	22
Figura 12 – Circuito Equivalente do Primário de um Motor de Indução	23
Figura 13 - Circuito Equivalente do Rotor	25
Figura 14 - Circuito Equivalente Completo	25
Figura 15- Representação de motor rotativo planificado	26
Figura 16 - Representação de estator desenrolado para formar motor linear	27
Figura 17 - Motor Setorial	27
Figura 18 - Representação da construção do motor tubular	28
Figura 19 - Campo magnético no estator planificado.....	30
Figura 20 - Representação do Motor de Indução Linear	34
Figura 21 - Distribuição da densidade de fluxo ao longo do eixo z	35
Figura 22 - Modelo de motor linear se movimentando	37
Figura 23 - Densidade do fluxo magnético na borda de entrada e na borda de saída	38
Figura 24 - Representação de MIL de Estator Curto.....	39
Figura 25 - Forças devido ao efeito longitudinal de borda.....	40
Figura 26 - Circuito equivalente do motor linear	41
Figura 27 - Circuito equivalente de Duncan.....	43
Figura 28 – Diagrama fasorial com as correntes desequilibradas do MIL.....	44
Figura 29 – Função $\frac{1-e^{-Q}}{Q}$ em função de Q	45
Figura 30 - Tensões em bobinas com enrolamento de passo pleno e encurtado	49
Figura 31- Representação do estator do motor setorial	51
Figura 32 - Curva da densidade de fluxo magnético do aço silício.....	52
Figura 33 - Esquema de bobinagem de 2 polos utilizado.....	55
Figura 34 - Configuração dos testes do motor.....	58
Figura 35 Parâmetros do circuito equivalente	59
Figura 36 - Corrente medida x corrente calculada	59

1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas foram inventadas no século XIX, e vem sendo aprimoradas desde então. São largamente utilizadas na indústria, fazendo parte da grande maioria das máquinas componentes dos processos industriais. No entanto, não estão presentes apenas dentro de complexos industriais. Máquinas elétricas estão presentes no dia a dia dos seres humanos nas mais variadas aplicações, desde eletrodomésticos, elevadores até mais recentemente como motores de carros elétricos.

A versatilidade das máquinas elétricas é muito grande, permitindo que sejam utilizadas nos mais diversos processos. Uma mesma máquina pode ser utilizada para diferentes fins, podendo até mesmo atuar como gerador ou como motor, gerando energia elétrica a partir de energia mecânica no primeiro caso, ou realizando a operação contrária no segundo.

As máquinas rotativas representam a grande maioria das máquinas de conversão eletromecânica de energia. Os conceitos utilizados para desenvolver uma máquina rotativa, no entanto, são similares aos utilizados para desenvolver outras máquinas de conversão eletromecânica de energia, como as máquinas lineares. Boa parte da teoria das máquinas rotativas pode ser utilizada para desenvolver a teoria sobre os motores lineares

Embora as máquinas lineares existam há praticamente o mesmo tempo em que existem as máquinas rotativas, apenas mais recentemente começaram a surgir em uma gama maior de aplicações, que em sua maioria são divididas em duas categorias, máquinas de alta aceleração e baixa aceleração. Nas aplicações de alta aceleração, os motores lineares são utilizados para estudar colisões em alta velocidade ou propulsão de veículos espaciais. As aplicações de baixa aceleração envolvem geralmente transporte terrestre.

É apresentada neste trabalho uma visão geral sobre máquinas rotativas para depois ser introduzida a teoria das máquinas lineares, bem como a diferença entre os dois tipos de conversores eletromecânicos de energia.

A partir de uma máquina rotativa cortada, foi construída uma máquina setorial, que como será mostrado, pode ser considerada uma máquina linear. Será feita uma análise

sobre as características de construção e performance dos motores lineares. A partir dessas características, serão refeitos os enrolamentos do motor no estator cortado para que o mesmo volte a funcionar.

2. MÁQUINAS ELÉTRICAS

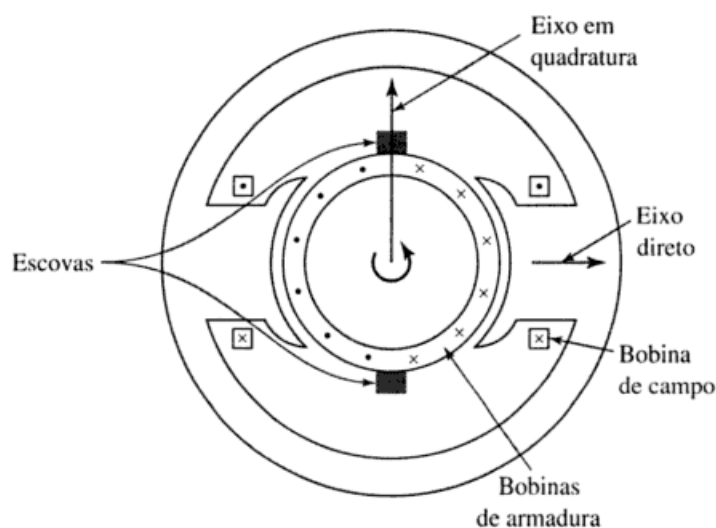
Podem ser consideradas máquinas elétricas quaisquer dispositivos que produzam energia elétrica a partir de energia mecânica ou que produzam energia mecânica a partir de energia elétrica. No primeiro caso, as máquinas elétricas são geradores, e no segundo, motores (Chapman, 2012) (Fitzgerald, 2006). Grande parte dessas máquinas pode atuar como um ou como outro, já que pode converter energia de uma forma para a outra através de campos magnéticos.

As máquinas elétricas pode ser divididas basicamente em dois grupos: máquinas CA(corrente alternada) e CC(corrente contínua).

2.1 Máquinas de Corrente Contínua

A máquina CC apresenta em sua construção dois enrolamentos. O enrolamento de campo, localizado no estator, é responsável pela geração do fluxo magnético principal na máquina e é excitado através de corrente contínua. O enrolamento de armadura, que fica no rotor, é o enrolamento onde uma tensão é induzida para que seja criado um campo que vai interagir com o campo do estator. A figura 1 apresenta uma representação da máquina de corrente contínua:

Figura 1 - Representação de máquina CC



FONTE: (Fitzgerald, 2006)

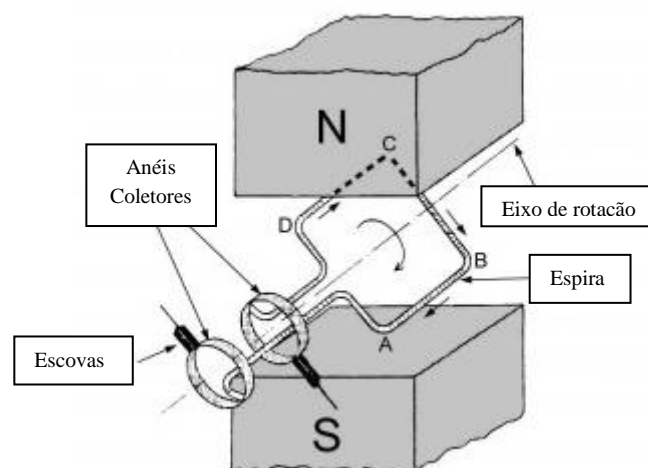
A tensão induzida no enrolamento de armadura é alternada, logo, deve ser retificada. Essa retificação é feita mecanicamente através de um comutador montado no rotor, embora seja isolado do mesmo. Escovas de carvão conectam o comutador à armadura, permitindo que o circuito externo receba uma tensão unidirecional. A corrente CC no enrolamento de campo cria uma distribuição de fluxo estacionário em relação ao estator e o comutador faz com que a armadura crie um distribuição de fluxo que também é fixa e que geralmente é perpendicular ao eixo de campo.

O conjugado é criado a partir da interação dessas duas distribuições de fluxos magnéticos. Ele atua contra a rotação se a máquina estiver atuando como gerador e a favor da rotação se a máquina estiver atuando como motor.

2.2 Máquinas de Corrente Alterada

A representação mais simples de uma máquina que produz uma tensão CA de forma senoidal é uma única espira em um campo magnético constante (Chapman, 2012). Embora o fluxo magnético não seja constante em um motor ou gerador CA, os fatores que controlam a tensão e o torque na espira, considerada neste exemplo como o rotor, são os mesmos de uma máquina real. A figura 2 representa essa situação:

Figura 2 – Espira única em campo magnético constante



FONTE: <<http://www.itacanet.org/basic-electrical-engineering/part-6-electromagnetic-induction/>>

2.2.1 Tensão Induzida em Espira Única em Campo Magnético

Conforme Chapman(2012), Se a espira sofrer movimento, uma tensão será induzida nela. A magnitude e o sentido desta tensão dependem do alinhamento da espira em relação ao campo magnético e da velocidade com que essa espira se move, e são dados pela equação 1:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot l \quad (1)$$

Onde e_{ind} = tensão induzida no fio [V]

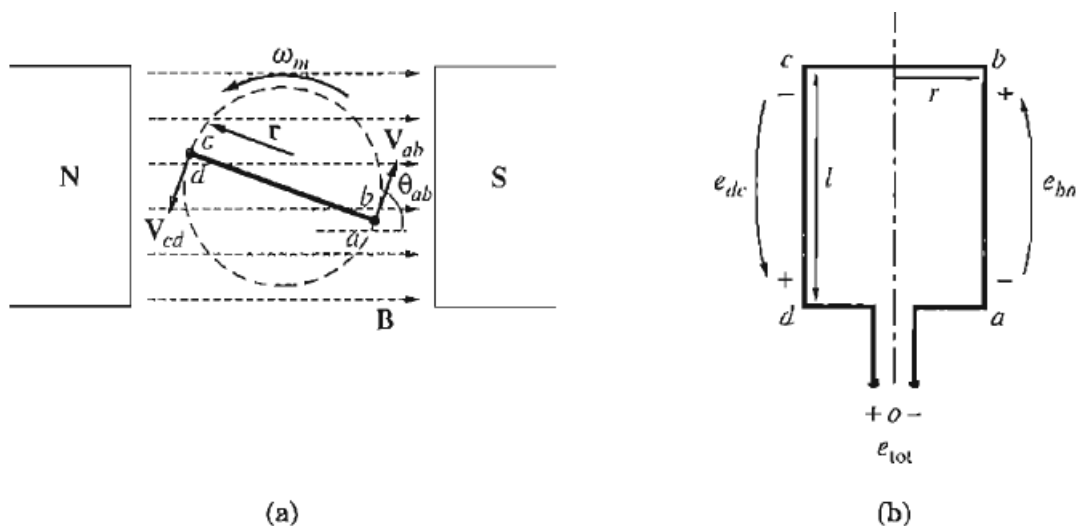
\vec{v} = vetor velocidade do fio [m/s]

\vec{B} = vetor densidade de fluxo magnético [T]

l = comprimento do condutor no campo magnético [m]

A figura 3(a) apresenta a vista em corte da espira em campo magnético apresentada na figura 2. São mostrados nessa figura para onde apontam o vetor da densidade de fluxo do campo magnético e o vetor velocidade. A figura 3(b) mostra o sentido da tensão induzida em cada segmento da espira.

Figura 3 - Vista frontal de espira em campo magnético uniforme



FONTE: (Chapman, 2012)

Para determinar a tensão total induzida na espira, necessita-se somar a tensão em cada segmento da mesma:

Nos segmentos bc e da, tem-se que o produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ é perpendicular à direção do comprimento do fio, então a tensão induzida nesses segmentos é zero.

$$e_{bc} = e_{da} = 0 \quad (2)$$

Nos segmentos “ab” e “cd”, a velocidade do fio é tangencial ao caminho da rotação, enquanto o campo magnético linear aponta na direção norte para sul. A tensão induzida na espira tem então o seguinte formato:

$$e_{ab} = vBl \sin \theta_{ab} \quad (3)$$

$$e_{cd} = vBl \sin \theta_{cd} \quad (4)$$

Tal que θ_{ab} e θ_{cd} são os respectivos ângulos entre os vetores velocidade da espira e densidade de fluxo do campo magnético. É possível observar que há uma diferença de 180° entre esses ângulos, ou seja: $\theta_{ab} = \theta_{cd} - 180^\circ$. Utilizando-se da identidade trigonométrica $\sin \theta = \sin \theta - 180^\circ$, tem-se que:

$$e_{AB} = e_{CD} = vBl \sin \theta \quad (5)$$

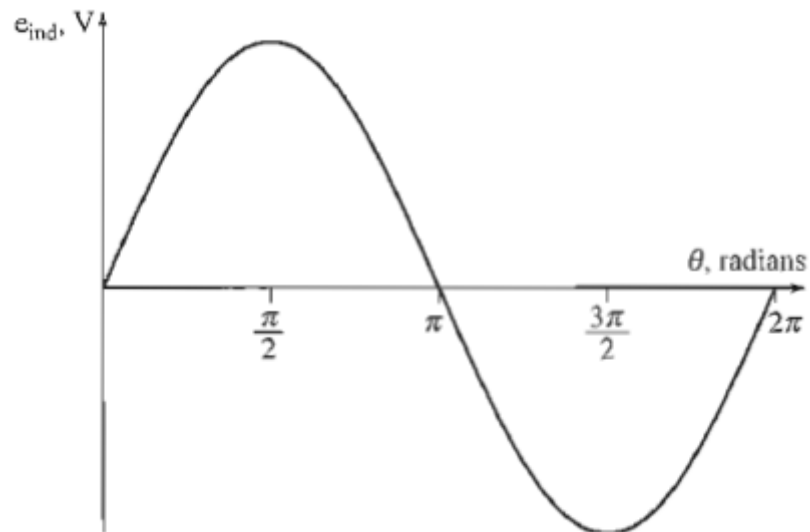
A tensão induzida total na espira é a soma da tensão em cada segmento da espira:

$$e_{ind} = e_{ab} + e_{bc} + e_{cd} + e_{da} \quad (6)$$

$$e_{ind} = 2vBl \sin \theta \quad (7)$$

A figura 4 apresenta a tensão em função do ângulo de giro da espira:

Figura 4 - Tensão induzida x Ângulo da Espira



FONTE: (Chapman, 2012)

Pode-se observar que a tensão da espira é máxima quando o vetor velocidade e o campo magnético são perpendiculares.

2.2.2 Conjugado induzido em uma espira na qual circula corrente

Segundo Chapman(2012), Fitzgerald(2006), se uma espira está em um ângulo θ em relação a um campo magnético uniforme, e por essa espira circular corrente, será induzida na espira uma força que a fará rotacionar. A força em cada segmento da espira é dada pela equação (8):

$$F = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (8)$$

Onde : i = corrente no segmento da espira [A]

\vec{l} = comprimento do segmento da espira, tal que a direção de l é direção em que a corrente flui [m]

\vec{B} = vetor densidade de fluxo magnético [T]

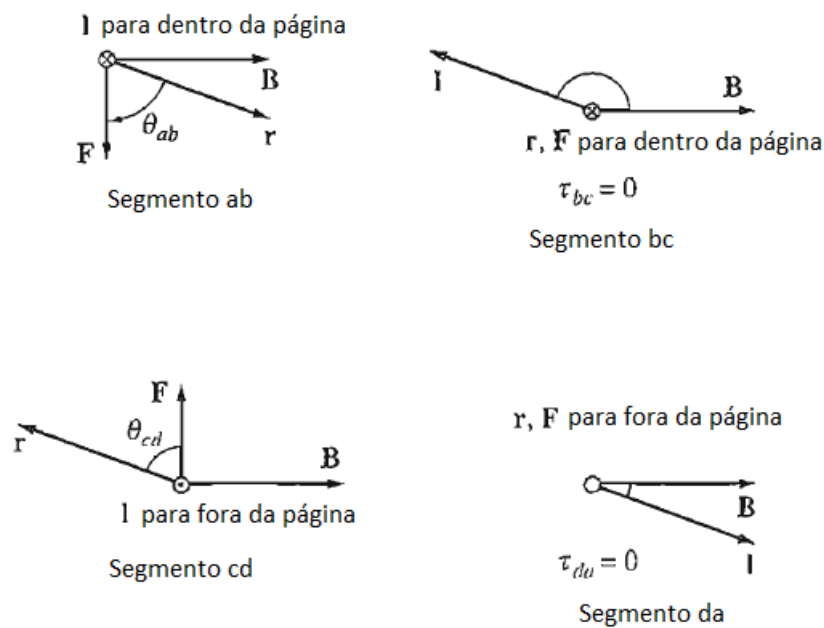
Observando a espira presente na figura 3, o valor do conjugado produzido pela força na espira será dado por:

$$\tau = F \cdot r \cdot \sin \theta \quad (9)$$

Onde θ é ângulo entre o segmento r da espira e a direção da força produzida.

A figura 5 mostra um esquema com a direção da força nos 4 segmentos da espira em um campo magnético da figura 3:

Figura 5 - Representação da força exercida nos 4 segmentos da espira



FONTE: (Chapman, 2012)

O conjugado produzido no segmento ab é dado por:

$$\tau_{ab} = F \cdot r \cdot \sin \theta_{ab} \quad (10)$$

$$\tau_{ab} = rilB \sin \theta_{ab} \quad (11)$$

No sentido horário.

Enquanto o conjugado produzido no segmento cd é dado por:

$$\tau_{cd} = F \cdot r \cdot \sin \theta_{cd} \quad (12)$$

$$\tau_{cd} = rilB \sin \theta_{cd} \quad (13)$$

Também no sentido horário.

Nos segmentos bc e da não é produzido conjugado.

O conjugado total é a soma do conjugado produzido em cada segmento da espira, dado por:

$$\tau_{total} = \tau_{ab} + \tau_{cd} \quad (14)$$

$$\tau_{total} = rilB \sin \theta \quad (15)$$

Nota-se que o conjugado é máximo quando a força é perpendicular ao segmento r da espira.

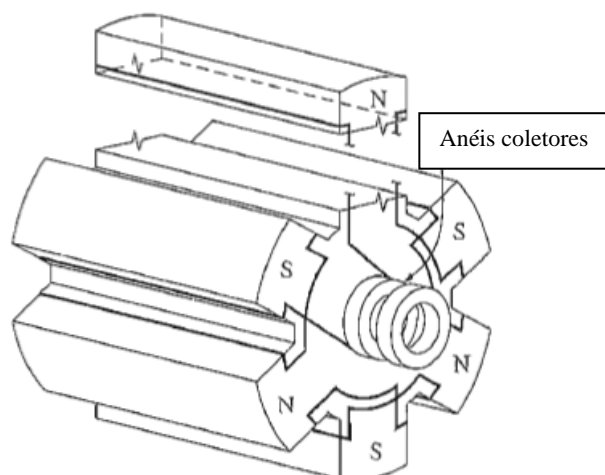
2.2.3 Classificação de Máquinas de Corrente Alternada

Conforme Fitzgerald(2006), as máquinas de corrente alternada tradicionais classificam-se em duas categorias, as máquinas síncronas e as de indução. As máquinas síncronas têm a corrente induzida no rotor através de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Nas máquinas de indução, a corrente do rotor é induzida porque há uma corrente no estator e há movimento do rotor em relação ao estator.

2.2.3.1 Máquinas Síncronas

O campo magnético do rotor pode ser produzido em uma máquina síncrona aplicando uma corrente contínua ao mesmo para criar um eletroímã. Como o rotor irá girar, a forma mais comum de fazer com que a corrente chegue a ele é através de anéis coletores e escovas de carvão. Os anéis coletores geralmente são fixados na ponta do eixo, e a escova está em contato com eles. Se uma fonte de tensão contínua é aplicada com o terminal positivo em uma escova e o terminal negativo na outra, tem-se uma tensão fixa no rotor, independente de seu ângulo de giro. A figura 6 mostra um esquema de um rotor que deixa em evidência os anéis coletores que ficam em contato com o eixo.

Figura 6 - Rotor de máquina síncrona com anéis coletores



FONTE: (Chapman, 2012)

A corrente de campo do motor síncrono produz um campo magnético estático e um conjunto de tensões trifásicas aplicadas ao estator produz um fluxo de corrente trifásico nos enrolamentos que resultam em um campo girante de amplitude uniforme.

Sendo assim, há dois campos na máquina que tendem a se alinhar, o do estator e o do rotor. Como o campo do estator é um campo girante, o campo do rotor irá buscar o alinhamento, e para isso fará com que o eixo gire. O princípio básico de operação do motor síncrono é que o rotor persegue continuamente o campo criado pelo estator, mas nunca irá alcançá-lo, girando sempre que houver um campo no estator.

2.2.3.2 Máquinas de Indução

Geralmente essas máquinas são conhecidas como motores de indução, pois o número de motores de indução é muito maior que o número de geradores de indução.

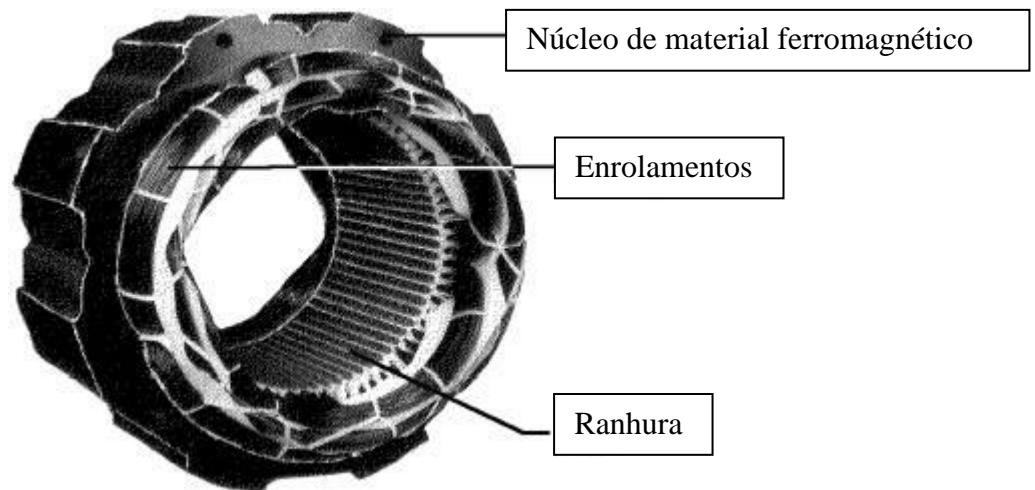
Uma máquina de indução não necessita de corrente contínua para funcionar. Nela, as correntes alternadas são aplicadas diretamente no estator são induzidas no rotor, sem que haja qualquer tipo de contato físico.

2.2.3.2.1 Aspectos Construtivos

Uma máquina de indução possui basicamente dois componentes, o rotor e o estator.

O estator é composto por lâminas de aço silício que possuem ranhuras igualmente espaçadas em sua superfícies interna, onde são colocados os enrolamentos. Os enrolamentos devem ser idênticos, mas defasados em 120° elétricos, para que seja formado um campo girante constante. A figura 7 mostra um estator de uma máquina de indução com seu enrolamento:

Figura 7 - Estator de máquina de indução



FONTE: <http://www.wisdompage.com/SEUhtmDOCS/SEU18_files/image004.jpg>

O rotor de uma máquina de indução pode ser de dois tipos, bobinado ou gaiola de esquilo. No rotor bobinado há espiras de bobinas distribuídas uniformemente, enquanto o rotor gaiola de esquilo é composto por barras de alumínio fundidas e curto circuitadas por anéis de metal na extremidade do eixo.

O rotor bobinado possui seu próprio conjunto de bobinas trifásicas, similares às presentes no estator. Há um curto circuito entre as bobinas feito por anéis em contato com escovas que permitem acesso externo a esses enrolamentos, e é possível através desse dispositivo modificar as características de conjugado e velocidade do motor. A figura 8 mostra um rotor bobinado que contém em seu eixo os anéis coletores:

Figura 8 - Rotor bobinado de máquina de indução



FONTE: <http://dc311.4shared.com/doc/UccNRjkp/preview_html_2e03c1da.gif>

O rotor gaiola de esquilo é o mais comum em motores de indução, pois sua construção é simples e barata. Sua construção influi diretamente no desempenho do motor. Se as barras de alumínio forem grandes e próximas do entreferro, o conjugado será baixo e a corrente será alta na partida, enquanto um rotor com barras pequenas e próximas da superfície terá um conjugado de partida elevado. A figura 9 mostra um rotor gaiola de esquilo:

Figura 9 - Rotor gaiola de esquilo



FONTE: <<http://www.profelectro.info/?p=3040>>

O entreferro é a distância entre o rotor e o estator que é preenchida pelo ar e deve ser atravessada pelo campo magnético produzido pelo estator. Para magnetizar o ar é necessária uma grande força magneto motriz. O limite mínimo do entreferro é determinado por restrições mecânicas.

2.2.3.2.2 Campo Magnético Girante

Nas máquinas de indução, o estator é excitado através de correntes no estator e as correntes no rotor são produzidas por indução. Se um campo magnético é produzido pelo estator e outro pelo rotor, um conjugado será induzido no rotor para que ele seja alinhado com o campo do estator. Segundo Chapman(2012), o princípio básico de uma máquina rotativa é fazer com que o campo magnético do estator rotacione, para que assim o campo do rotor gire também, buscando alinhar-se com o campo do estator.

Ainda segundo Chapman(2012), se um conjunto trifásico de correntes de mesma magnitude, porém defasadas em 120° elétricos, for aplicado a um enrolamento trifásico, produzirá um campo magnético girante de magnitude constante. Essas correntes podem ser representadas pelas equações (16) a (18):

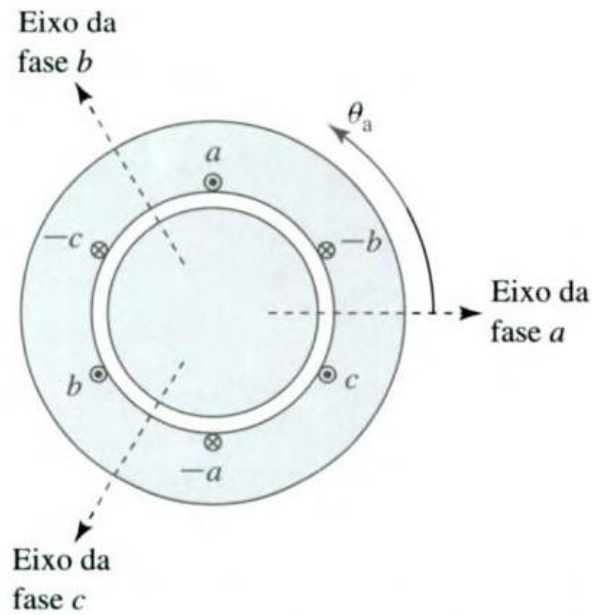
$$i_{aa'} = I_M \sin \omega t \text{ [A]} \quad (16)$$

$$i_{bb'} = I_M \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \text{ [A]} \quad (17)$$

$$i_{cc'} = I_M \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \text{ [A]} \quad (18)$$

A figura 10 mostra a representação de um estator com 3 espiras, cada uma representando uma fase. Cada uma das correntes das equações (19) a (21) entra em lado da respectiva espira e sai no outro, produzindo uma força magneto motriz.

Figura 10 - Representação de enrolamento de estator trifásico



A força magneto motriz gerada por cada uma das espiras é representada pelas equações de (15) a (17):

$$F_1 = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} + \omega t) \right] \text{ [A.espira]} \quad (19)$$

$$F_2 = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} + \omega t + \frac{2\pi}{3}) \right] \text{ [A.espira]} \quad (20)$$

$$F_3 = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} + \omega t - \frac{2\pi}{3}) \right] \text{ [A.espira]} \quad (21)$$

Onde θ_{ae} representa a distância em graus elétricos do eixo da fase a.

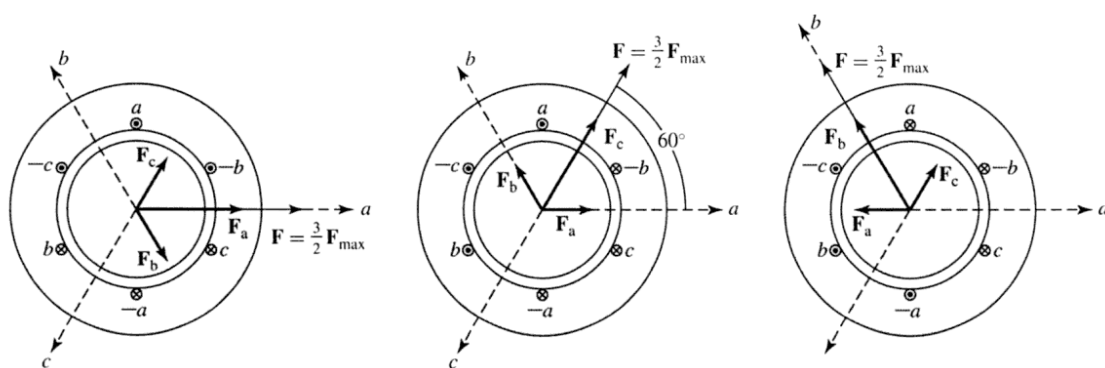
Para chegar ao valor da força magneto motriz resultante, podem-se somar as ondas de força magneto motriz. O resultado é apresentado nas equações 22 e 23.:

$$F_{total} = F_1 + F_2 + F_3 \quad (22)$$

$$F_{total} = \frac{3}{2} F_{max} \cos(\theta_{ae} - \omega t) \quad (23)$$

Somando-se as forças magneto motrizes produzidas por cada uma das fases, tem-se que a amplitude da força magneto motriz total será $1,5F_{max}$. A figura 11 mostra como se chega nesse resultado de forma gráfica:

Figura 11 - Análise gráfica da soma dos campos magnéticos



FONTE: (Fitzgerald, 2006)

Nota-se que a amplitude do campo resultante é constante, enquanto sua direção varia em 360° .

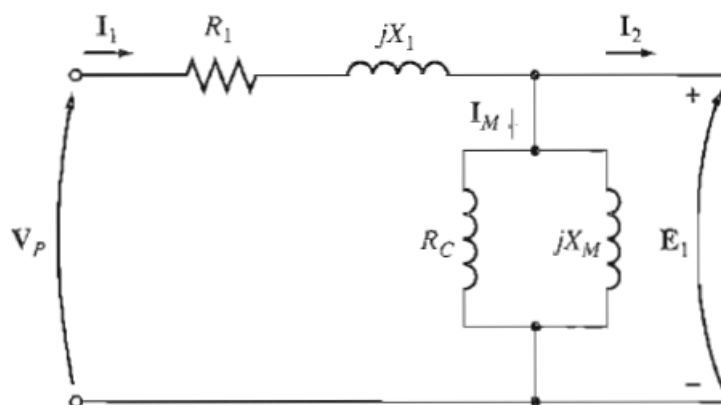
2.3 Circuito Equivalente do Motor de Indução Rotativo

O circuito equivalente apresentado é válido para uma fase de máquinas de indução polifásica em regime permanente. Os parâmetros obtidos para uma fase podem ser utilizados para as demais fases, levando-se em consideração a defasagem em 120° elétricos entre elas.

2.3.2 Circuito Equivalente do Estator

O circuito equivalente do estator pode ser representado pelo primário de um transformador. A figura 12 mostra esse circuito:

Figura 12 – Circuito Equivalente do Primário de um Motor de Indução



FONTE: (Chapman, 2012)

A onda de fluxo do entreferro gera forças contra eletromotrizes nas fases do estator. A tensão aplicada nos terminais do estator é diferente da força contra eletromotriz devido à queda de tensão quando a corrente de entrada (I_1) atravessa a impedância de dispersão do estator. Essa impedância é formada pela resistência do estator (R_1) e pela reatância de dispersão do estator (X_1).

O fluxo resultante do entreferro é criado pelas FMMs combinadas pelas correntes do estator e do rotor. A corrente do estator deve ser decomposta em duas componentes: A componente de carga e a componente de excitação.

A componente de carga (I_2) produz uma FMM que corresponde à FMM do rotor. A componente de excitação (I_M) é a corrente do estator necessária para criar o fluxo do entreferro.. A corrente de excitação atravessa o ramo formado por R_c e X_m , que representam as perdas no núcleo e a reatância de magnetização, respectivamente.

2.3.3 Circuito Equivalente do Rotor

Quando uma tensão é aplicada nos enrolamentos do estator, uma tensão é induzida no rotor. Segundo Chapman(2013), em geral, quanto maior o movimento relativo entre o rotor e o campo do estator, maior a tensão resultante no rotor e maior sua frequência. O maior movimento relativo ocorre quando o rotor está parado, então a maior frequência e tensão são induzidas no rotor nessas condições. A menor frequência e tensão ocorrem quando o rotor se movimenta na mesma velocidade da onda de fluxo no estator, quando

não há movimento relativo. Segundo Chapman(2013), a tensão e frequência induzidas em qualquer velocidade entre esses dois extremos é diretamente proporcional ao escorregamento do rotor.

Sendo assim, se a tensão induzida quando o rotor está bloqueado for chamada de E_{R0} , a tensão induzida para qualquer escorregamento será dada por:

$$E_R = sE_{R0} \quad (24)$$

Onde s é o escorregamento do rotor.

Enquanto a frequência no rotor será dada por:

$$f_{re} = sf_{se} \quad (25)$$

Onde f_{se} é a frequência aplicada no estator.

A tensão da equação 22 é induzida no rotor que contém uma resistência e uma reatância. Enquanto a resistência do rotor R_R é constante, pois é aquela cujo valor é tomado na frequência do estator, a reatância depende da indutância do rotor e da frequência da tensão no rotor. Tem-se que a reatância do rotor é dada por:

$$X_{R0} = sX_{R0} \quad (26)$$

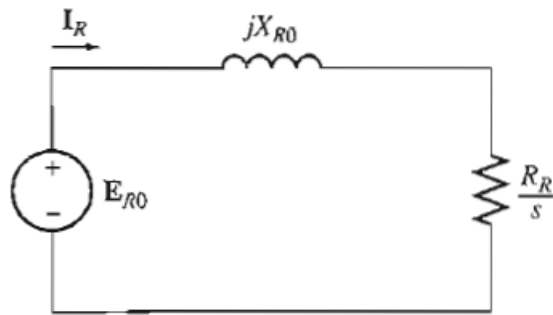
Onde X_{R0} é a reatância de rotor bloqueado.

Assim, tem-se que a corrente no rotor será dada por:

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (27)$$

É possível tratar todos os efeitos do rotor devido a mudança de velocidade como sendo causados por uma impedância variante suprida por uma fonte de tensão E_{R0} . Sendo assim, o circuito equivalente do rotor pode ser representado pela figura 13:

Figura 13 - Circuito Equivalente do Rotor



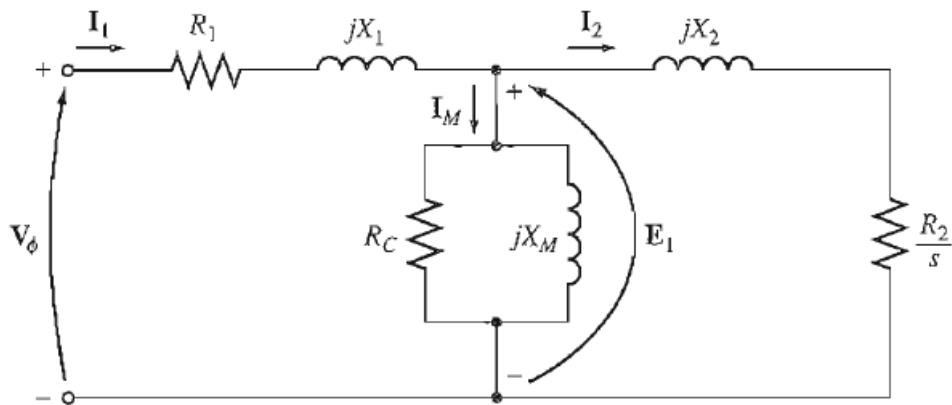
FONTE: (Chapman, 2012)

2.3.4 Circuito Equivalente Completo

Para obter o circuito equivalente completo, junta-se os circuitos do estator e do rotor

A figura 14 mostra o circuito equivalente completo para uma fase de um motor de indução rotativo:

Figura 14 - Circuito Equivalente Completo



FONTE: (Chapman, 2012)

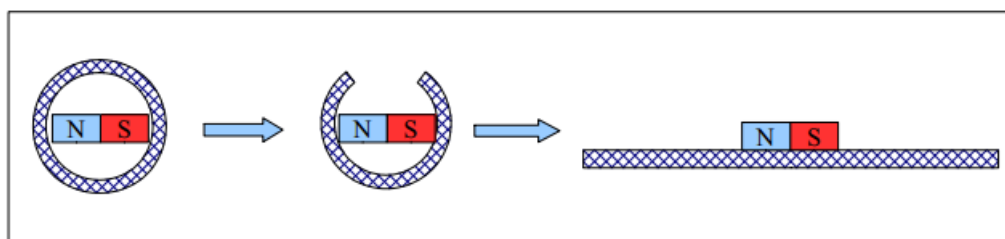
O circuito equivalente para uma fase pode ser utilizado para determinar a variação de corrente, velocidade e potência que ocorrem quando a carga é alterada em um motor.

3. MOTORES LINEARES

Os motores lineares pertencem a um grupo distinto de máquinas elétricas, pois a energia elétrica fornecida é transformada em energia mecânica em forma de movimento de translação. Em princípio, para cada máquina de indução rotativa, há uma máquina linear em contrapartida (Boldea & Nasar, 2002) e, devido a essa semelhança, a análise das máquinas lineares é similar a das máquinas rotativas. De maneira geral, dimensões e distâncias lineares substituem as medidas angulares e forças substituem os conjugados (Fitzgerald, 2006). Diferentemente do motor rotativo, o motor linear não possui um rotor como secundário, mas um secundário, que se move em linha reta.

Para visualizar de forma simples um motor linear, é possível desenrolar um motor rotativo, de forma que seu estator fique planificado, como demonstra a figura 15:

Figura 15- Representação de motor rotativo planificado



FONTE: (Idagawa,2009)

Desse modo, o campo magnético produzido não é mais um campo girante, e sim um campo transladante que vai fazer com que a parte móvel da máquina mova-se de forma linear, e não rotativa.

3.1 Características Construtivas

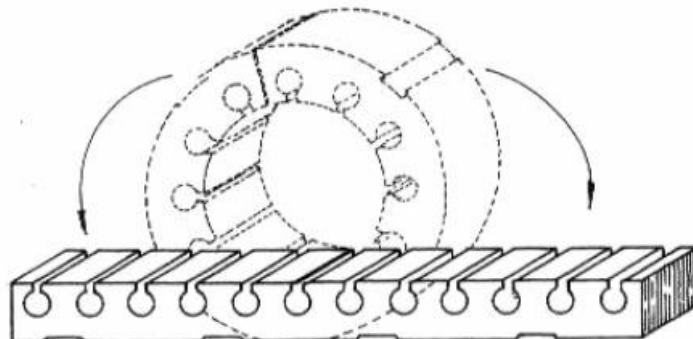
Os motores de indução lineares possuem diversas formas de construção, tornando o processo de classificá-los complexo. Um dos modelos adotados para realizar essa classificação é a partir da forma com que os estatores e os secundários são feitos. Essa classificação permite caracterizar os motores de indução lineares em planos, setoriais e tubulares (Creppe, 1997).

3.1.1 Motores Planos

São os motores mais utilizados e conforme o nome sugere, possuem um movimento plano em linha reta. O tamanho do primário e do secundário pode variar, sendo que a

parte móvel será a menor. A figura 16 mostra o princípio da obtenção de um motor linear a partir do “desenrolamento do estator”:

Figura 16 - Representação de estator desenrolado para formar motor linear



FONTE: (Manual de Manutenção Elétrica Industrial, 2006)

3.1.2 Motores Setoriais

Motores setoriais são similares em sua construção aos motores rotativos, mas possuem um corte no estator, que não se fecha. Devido a essa condição que produz assimetria no campo magnético produzido no primário, esse motor pode ser considerado linear (Oliveira, 2004). A figura 17 mostra um modelo de motor de indução setorial:

Figura 17 - Motor Setorial

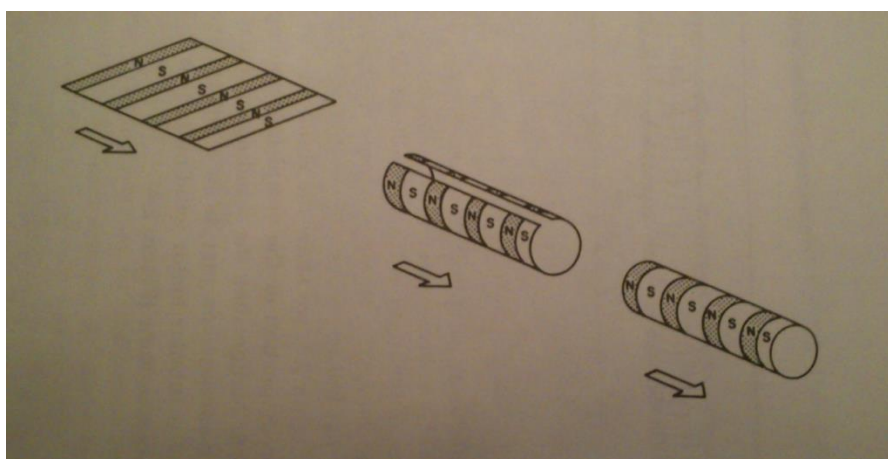


FONTE: (Oliveira, 2004)

3.1.3 Motores Tubulares

Possuem a forma de um tubo. Sua construção pode ser representada enrolando novamente o estator do motor linear plano de maneira diferente. A figura 18 representa essa situação:

Figura 18 - Representação da construção do motor tubular



FONTE: (Boldea & Nasar, 2002)

3.1.4 Diferenças entre um motor rotativo e um motor linear

A principal diferença entre motores de indução lineares e rotativos é o campo magnético. No caso das máquinas rotativas, há o campo girante, que cria um conjugado para movimentar o secundário em torno do seu próprio eixo, enquanto nas máquinas lineares há o campo transladante, que cria uma força que movimenta a parte móvel em linha reta.

Uma das maiores diferenças entre os motores lineares e os motores rotativos é que a máquina linear possui um começo e um fim na direção em que a parte móvel se dirige, o que ocasiona efeitos de borda, que acabam prejudicando o funcionamento do motor.

O tamanho do entreferro também é significativamente maior nas máquinas lineares devido a forma com a qual elas são construídas. A parte de um motor linear equivalente ao rotor da máquina rotativa não possui barras condutoras nem bobinas, sendo geralmente uma simples barra de metal condutor.

Outra distinção apresentada é a largura do secundário, que usualmente é maior que a do primário. Por último, nas máquinas lineares também é comum encontrar a ação de uma força normal de atração ou repulsão, visto que o secundário geralmente está em cima do primário.

Devido a distribuição de cada enrolamento de fase ao longo do estator, as tensões de fase induzidas no MIL não são balanceadas quando a velocidade do secundário for diferente de 0, pois a impedância de cada fase é diferente.

3.2 Campo Transladante

Assim como no motor de indução rotativo, um campo magnético pulsante é gerado no estator de um motor de indução trifásico linear. Esse campo é denominado de campo transladante e exerce uma força que desloca a parte móvel do motor em linha reta.

Segundo Tanimoto (2006), considerando uma distribuição senoidal dos enrolamentos no espaço, se a corrente I for constante no tempo irá gerar ao longo do entreferro um campo magnético de distribuição constante no tempo, mas variável no espaço, dado pela equação 28:

$$B(x) = B_{m\acute{a}x} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \quad (28)$$

Onde $B(x)$ = Densidade de fluxo magnético [T]

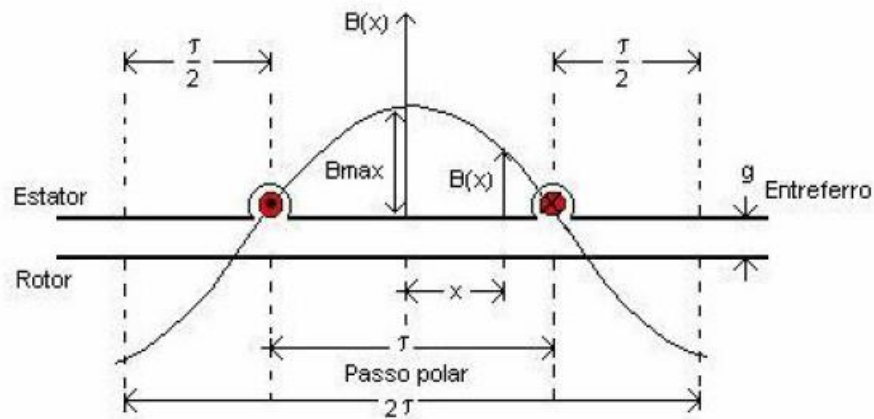
$B_{m\acute{a}x}$ = densidade máxima do fluxo magnético [T]

τ = passo polar [m]

x = distância de deslocamento do campo magnético [m]

A figura 19 apresenta o estator planificado, deixando clara a influência do passo polar na amplitude do campo magnético conforme a distância x varia:

Figura 19 - Campo magnético no estator planificado



FONTE: (Creppe, 1997)

Como a corrente I é variante no tempo e apresenta forma senoidal (é CA), o campo magnético é variante no espaço e no tempo conforme a equação 29:

$$B(x, t) = B_{m\acute{a}x} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau}\right) \cdot x \quad (29)$$

Considerando-se um motor de indução linear trifásico, tem-se que os enrolamentos são iguais, porém separados em 120° . Cada um desses enrolamentos é atravessado por um conjunto de correntes trifásicas, tal que:

$$i_1 = I_M \sin \omega t \quad (30)$$

$$i_2 = I_M \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (31)$$

$$i_3 = I_M \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (32)$$

A partir da passagem dessas três correntes pelos enrolamentos, são criados três campos magnéticos pulsantes variantes no tempo e no espaço, dados por:

$$B_1(x, t) = B_{m\acute{a}x} \sin(\omega t) \cdot \cos\frac{\pi}{\tau} x \quad (33)$$

$$B_2(x, t) = B_{m\acute{a}x} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} (x - \frac{2\pi}{3}) \quad (34)$$

$$B_3(x, t) = B_{m\acute{a}x} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} (x + \frac{2\pi}{3}) \quad (35)$$

Utiliza-se da seguinte relaao trigonométrica para modificar as equaoes 33 a 35:

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (36)$$

Desse modo, tem-se que:

$$B_1(x, t) = \frac{B_{m\acute{a}x}}{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x) + \frac{B_{m\acute{a}x}}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) \quad (37)$$

$$B_2(x, t) = \frac{B_{m\acute{a}x}}{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3}) + \frac{B_{m\acute{a}x}}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) \quad (38)$$

$$B_3(x, t) = \frac{B_{m\acute{a}x}}{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x + \frac{4\pi}{3}) + \frac{B_{m\acute{a}x}}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) \quad (39)$$

O campo resultante será a soma dos campos presentes em cada enrolamento, resultando em:

$$B(x, t) = B_1(x, t) + B_2(x, t) + B_3(x, t) \quad (40)$$

$$B(x, t) = \frac{3}{2} B_{m\acute{a}x} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \cdot x) \quad (41)$$

A onda resultante é uma onda girante com uma amplitude constante no valor de $\frac{3}{2} B_{m\acute{a}x}$ e velocidade dada por:

$$V_s = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (42)$$

Essa velocidade é a velocidade do campo magnético transladante que será aplicada à parte móvel do motor linear. Devido ao escorregamento sofrido pelo secundário, a velocidade com que ele se move será:

$$V_r = 2 \cdot \tau \cdot f \cdot (1 - s) \quad (43)$$

Onde s é deslizamento do secundário, dado por:

$$s = \frac{V_s - V_r}{V_s} \quad (44)$$

Chega-se a conclusão de que a velocidade de um motor linear é controlada pela frequência da rede elétrica e pelo passo polar. O sentido da máquina, assim como no motor de indução, é dado pela sequência de como as fases são ligadas na rede elétrica.

Se o primário e o secundário forem infinitos, então, a onda de campo transladante tem o mesmo formato da onda do campo girante. A única diferença entre ela é que a onda do campo girante possui uma velocidade angular enquanto a onda do campo transladante tem velocidade linear. Como o primário e o secundário não podem ser infinitos em uma situação real, no entanto, o campo magnético de um motor linear sofre alterações devido aos efeitos de borda.

3.3 O Fator de Qualidade

Segundo Laithwaite, o fator de qualidade é um parâmetro para qualificar sistemas de conversão eletromagnética com base nas suas características elétricas e magnéticas. Conforme Creppe(1997), visto que toda máquina elétrica pode ser analisada como a composição de um circuito elétrico com um circuito magnético, pode-se expressar sua qualidade através dos elementos que levem em consideração os dois circuitos. É considerado o melhor circuito elétrico aquele que produz a maior corrente para uma dada força eletromotriz, e o melhor circuito magnético aquele que produz o maior fluxo para uma dada força magneto motriz.

Conforme Tanimoto(2006), nas máquinas de conversão eletromagnéticas, a corrente e o fluxo estão associadas tanto à força eletromotriz quanto à força magneto motriz. A interação entre o circuito primário e o secundário ocorre, portanto, através da corrente elétrica e do fluxo magnético. O produto dessas duas grandezas é responsável pela força nos dispositivos que efetuam a conversão eletromecânica de energia. O fator de qualidade está ligado então a fatores como resistência elétrica do secundário e dos enrolamentos do estator e relutância dos circuitos. Conforme se observa na equação 41, quanto menores forem essas grandezas, maior será o fator de qualidade G:

$$G = \frac{\omega}{R \cdot \mathfrak{R}} \quad (45)$$

Segundo Creppe (1997), a unidade do inverso do produto da resistência (R) pela relutância (\mathfrak{R}) é o tempo, o que resulta no fato do fator de qualidade ser adimensional. O fator de proporcionalidade ligado ao tempo para máquinas de corrente alternada é a frequência angular (ω).

Para expressar o fator de qualidade de um motor de indução linear, a equação 43 pode ser particularizada levando-se em consideração o passo polar (τ), o entreferro (g), a resistividade superficial do secundário (ρ_r) e a frequência angular (ω), que resultam na equação 43:

$$G = \frac{\mu_o \cdot \tau^2 \cdot \omega}{\pi^2 \cdot \rho_r \cdot g} \quad (46)$$

Pode-se observar que o passo polar é diretamente proporcional ao fator de qualidade. Segundo Tanimoto, 2006, isto ocorre porque um aumento do passo polar implica no aumento da área efetiva dos circuitos magnético e elétrico, provocando um aumento no fluxo e na corrente do secundário, que tem como consequência um aumento da força longitudinal.

O aumento do passo polar, no entanto, provoca um aumento na velocidade da máquina de indução linear, que é dada pela equação 44:

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (47)$$

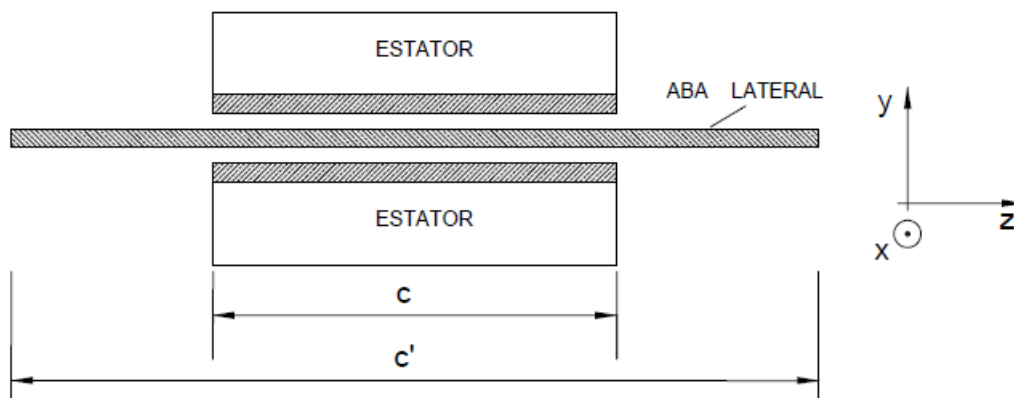
É necessário então que seja estabelecida uma relação entre o fator de qualidade e a velocidade de operação do motor.

O fator de qualidade varia de forma inversamente proporcional à resistência do secundário. Verifica-se que quanto menor a resistividade, maior será o valor do comprimento do secundário. O fator de qualidade também sofre variação inversamente proporcional ao entreferro. Com um entreferro menor, a relutância do circuito magnético também será menor, e assim o fluxo magnético será maior (Oliveira, 2004).

3.4 Efeito Transversal de Borda

O efeito transversal de borda se faz presente apenas em motores de indução lineares que possuem primário e secundário de largura finita (Gieras, 1994). Observe-se a figura 20 representando um motor de indução linear com estator duplo, viajando na direção x :

Figura 20 - Representação do Motor de Indução Linear

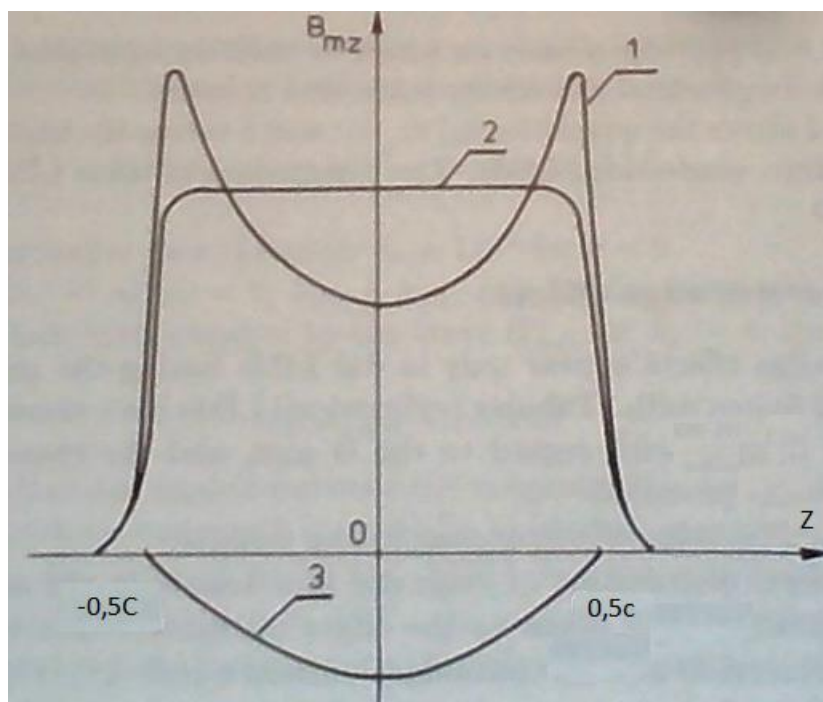


FONTE: (Tanimoto, 2006) (Creppe, 1997)

O comprimento do estator c e o comprimento do secundário c' , juntamente com a resistividade da lâmina são parâmetros importantes para a determinação do efeito transversal de borda.

Segundo (Gieras, 1994), o efeito transversal de borda aparece na forma de uma distribuição não uniforme da densidade de fluxo magnético ao longo do entreferro no eixo z , sendo que ela é maior nas bordas devido a um aumento na relutância nessa região. Ocorre também o aparecimento de forças laterais na direção z que incide sobre o secundário empurrando-o em uma direção perpendicular ao campo magnético transladante visto que a simetria no eixo x entre o primário e o secundário é deslocada. A figura 21 mostra a distribuição não uniforme da densidade de fluxo magnético no eixo z :

Figura 21 - Distribuição da densidade de fluxo ao longo do eixo z



FONTE: (Gieras, 1994)

Segundo Creppe(1997), Tanimoto(2006), a análise unidimensional efetuada na distribuição de densidade do campo magnético nos MIL pressupõe que as correntes induzidas no secundário possuem componentes apenas na direção z . Essa hipótese não permite que sejam consideradas correntes que circulam nas regiões do secundário externas ao entreferro em máquinas que possuem a lâmina do secundário mais comprida que o estator, o que ocorre na grande maioria das máquinas de indução lineares. Desse modo, o caminho das correntes é considerado uniforme e não se considera a circulação de corrente na direção x nem os fechamentos das linhas de corrente do secundário, na região de entreferro do MIL.

Ainda conforme Creppe(1997), Tanimoto(2006), ao observar a relação entre os comprimentos dos secundários e dos estatores, quando ambos possuem a mesma largura, a distribuição de correntes tem componentes de menor intensidade contribuindo para a criação de uma força de translação se comparadas ao motor com lâmina linórica maior que o estator. Além disso, apresentam instabilidade lateral no movimento. Os motores que apresentam um secundário maior que o estator, no entanto, não apresentam vantagem significativa e tem seu custo elevado.

Segundo Russel e Norsworthy(1958), o fator de correção de resistividade da lâmina secundária pode ser utilizado como um parâmetro de projeto para determinar o comprimento do secundário. A determinação desse parâmetro pode incluir um fator de correção que envolva o efeito transversal de borda através da observação do comportamento não uniforme das correntes que circulam no secundário.

Foi estabelecido que modificando a resistividade da lâmina secundária o efeito transversal de borda pode ser introduzido nos modelos matemáticos dos motores de indução lineares. Para modificar a resistividade da lâmina secundária, conforme Russel e Norsworthy(1958), deverá ser adotado o fator de correção para a resistividade superficial do secundário (k_s), que é dado pela equação 48:

$$k_s = \frac{\tanh \varepsilon_x}{\varepsilon_x \cdot (1 + \tanh \varepsilon_x + \tanh \varepsilon_y)} \quad (48)$$

Onde:

$$\varepsilon_x = \frac{\pi \cdot c}{2 \cdot \tau} \quad (49)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\pi \cdot (c' - c)}{2 \cdot \tau} \quad (50)$$

A equação 45 mostra que o fator de correção para resistividade superficial do secundário é função apenas dos parâmetros mecânicos do motor, variando com o comprimento do estator e do secundário. Segundo Creppe(1997), Tanimoto(2006) a variação de k_s acontece somente até certo ponto, a partir de onde é praticamente constante. É possível demonstrar que um valor ótimo para o secundário em função do passo polar é obtido quando $\varepsilon_y = 1$, conforme a equação 48:

$$1 = \frac{\pi \cdot (c' - c)}{2 \cdot \tau} \quad (51)$$

$$\frac{(c' - c)}{2} = \frac{\tau}{\pi} \quad (52)$$

Conforme, Creppe(1997), Tanimoto(2006) a resistividade superficial do secundário, considerando a presença do efeito transversal de borda é alterada para um novo valor dado pela equação 53:

$$\rho_c = \frac{\rho_r}{k_s} \quad (53)$$

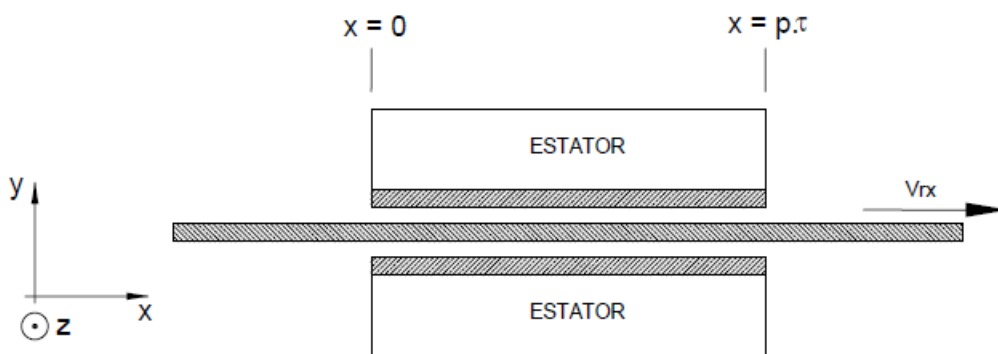
Como o fator k_s tem um valor menor que 1, a resistividade da lâmina aumenta provocando uma redução no fator de qualidade. Esse novo valor aproxima o modelo do motor do real. O fator de qualidade, quando é considerado o efeito transversal de borda passa a ser chamado de fator de qualidade realístico e é dado pela equação 54:

$$Q_e = \frac{\mu_o \cdot \tau^2 \cdot \omega}{\pi^2 \cdot \rho_c \cdot g} \quad (54)$$

3.5 Efeito Longitudinal de Extremidade

A diferença fundamental entre motores rotativos e motores lineares é o comprimento finito dos circuitos magnéticos e elétricos nos motores lineares na direção da onda de fluxo viajante. O circuito magnético aberto causa o início do efeito longitudinal de extremidade (Gieras, 1994). A figura 22 contém um modelo de motor linear se movimentando na direção do eixo x .

Figura 22 - Modelo de motor linear se movimentando

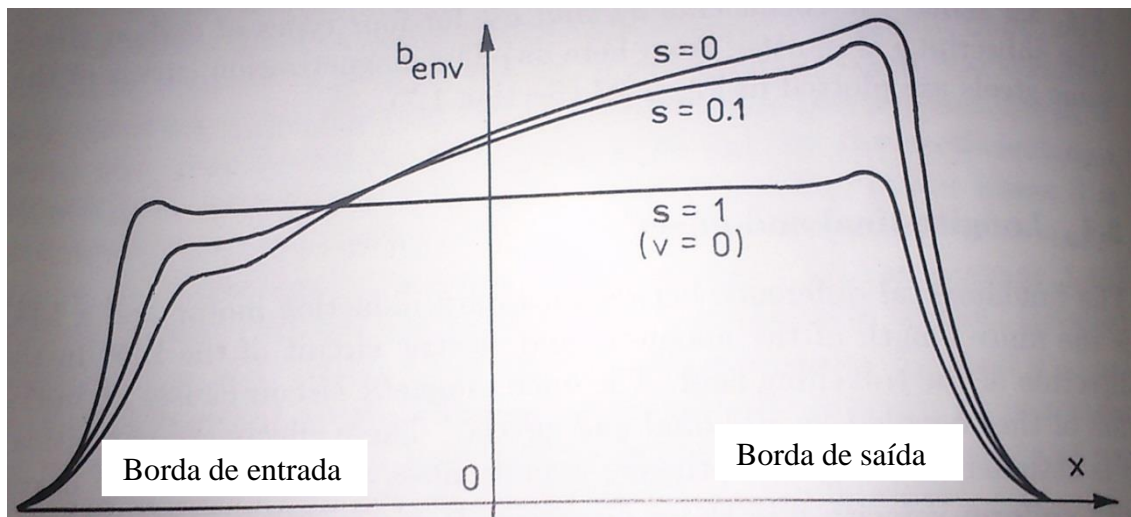


FONTE: (Creppe, 1997)

Assumindo que o primário seja imóvel e que o secundário se movimenta na direção do eixo x a uma velocidade constante v é possível provar que a componente normal da densidade de fluxo magnético no entreferro (na direção do eixo y) é enfraquecida na borda de entrada e ampliada na borda de saída. A figura 22 apresenta a variação da

densidade de fluxo magnético nas diferentes regiões do LIM em função do escorregamento do secundário:

Figura 23 - Densidade do fluxo magnético na borda de entrada e na borda de saída



FONTE: (Gieras, 1994)

Conforme Gieras(1994), desconsiderando-se as ranhuras do estator, a distribuição da componente normal da densidade de fluxo magnético na direção x a uma velocidade nula pode ser considerada praticamente uma função retangular. É possível observar na figura 23 que a influência do efeito longitudinal de extremidade é proporcional a velocidade do secundário. Enquanto MILs de baixa velocidade praticamente não são afetados pelo efeito longitudinal de extremidade, os MILs de alta velocidade sofrem uma forte influência deste efeito. O efeito longitudinal de extremidade aparece nas seguintes formas:

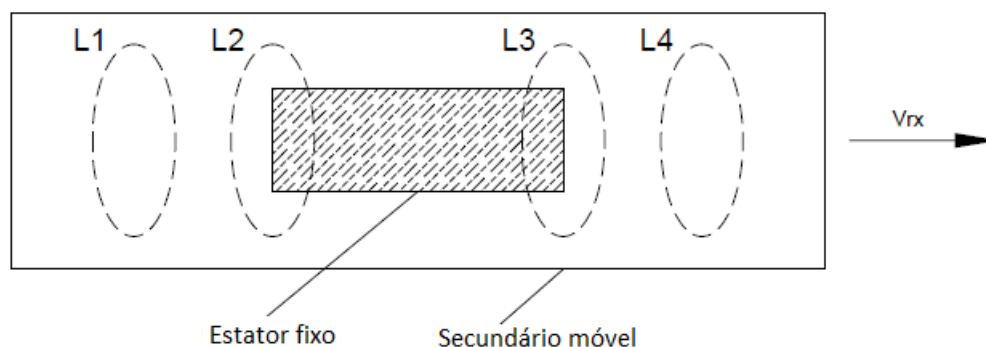
- A distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é não uniforme e dependente da velocidade
- As correntes de Foucault tem uma distribuição não uniforme no secundário
- Forças de frenagem parasitas

O efeito longitudinal de extremidade ocorre devido ao “corte” da onda viajante em cada borda do MIL (Gieras, 1994). Ele é causado pela interferência das ondas de fluxo magnético e pela variação em degrau das relutâncias para o fluxo magnético em cada borda do circuito magnético.

3.5.1 Efeito Longitudinal de Extremidade em um MIL Setorial

O comportamento de um motor de indução linear setorial quanto ao efeito longitudinal de extremidade é muito similar ao comportamento de um MIL de estator curto, análise que será apresentada a seguir. Observe-se a figura 25, uma representação do motor linear de estator curto:

Figura 24 - Representação de MIL de Estator Curto



FONTE: Creppe(1997)

Traçando-se quatro laços fictícios sobre o secundário, é possível fazer uma observação para um instante em particular t Creppe(1997) e Tanimoto(2006). Os laços L1 e L4 estão muito distantes das extremidades do estator, de forma que é possível afirmar que os mesmos não estão concatenando fluxo magnético no instante t . Desta forma, não estão sujeitos a forças eletromotrizes induzidas nem a circulação de correntes elétricas.

Os laços L2 e L3, por apresentarem velocidade em relação ao campo magnético de translação, concatenam fluxo magnético variante no tempo e no espaço e estão sujeitos a forças eletromotrizes induzidas. Imaginando-se o estator estático e a lâmina se movendo no sentido positivo de x pode-se observar diversos fenômenos nos laços L2 e L3.

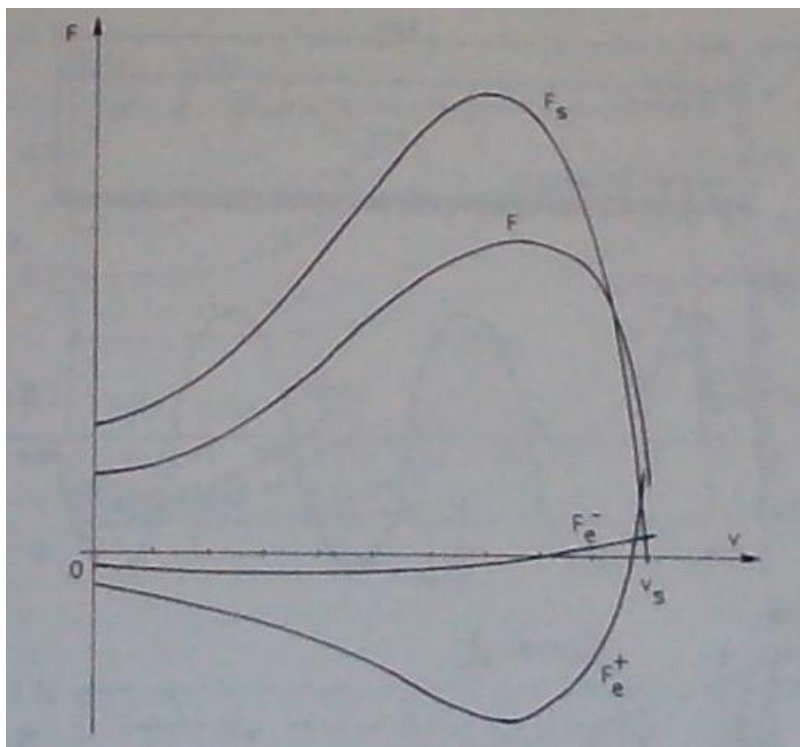
Como a lâmina se movimenta no sentido positivo de x , a extremidade esquerda é considerada de entrada e a direita é considerada a extremidade de saída. Os pontos situados à esquerda do laço L2 estão fora da região ativa, enquanto os pontos à direita de L2 estão sofrendo ação do fluxo magnético criado pelo indutor. No laço L3 ocorre a situação inversa.

No laço L2, a situação imposta pelas correntes induzidas no secundário opõe-se ao crescimento do fluxo concatenado pelo mesmo. No laço L3, a reação imposta pelas correntes opõe-se ao decréscimo do fluxo concatenado nesse laço. Pode-se observar que a reação nos dois laços é oposta.

Como há circulação de correntes no laço L3, após sua saída da região ativa há um aumento das perdas por correntes parasitas. O fluxo magnético criado por essas correntes interage com o fluxo magnético de espraio do estator, originando uma componente de força frenante. Essa força frenante é proporcional a velocidade relativa entre o estator e o secundário. Como há corrente induzida no laço L2 é gerado um forte fluxo magnético que interage com o fluxo de translação, reduzindo a força de propulsão. Desse modo, as extremidades do estator dão origem as duas forças frenantes que caracterizam o efeito longitudinal de extremidade.

A figura 26 mostra a alteração causada pelo efeito longitudinal de borda em um motor linear:

Figura 25 - Forças devido ao efeito longitudinal de borda



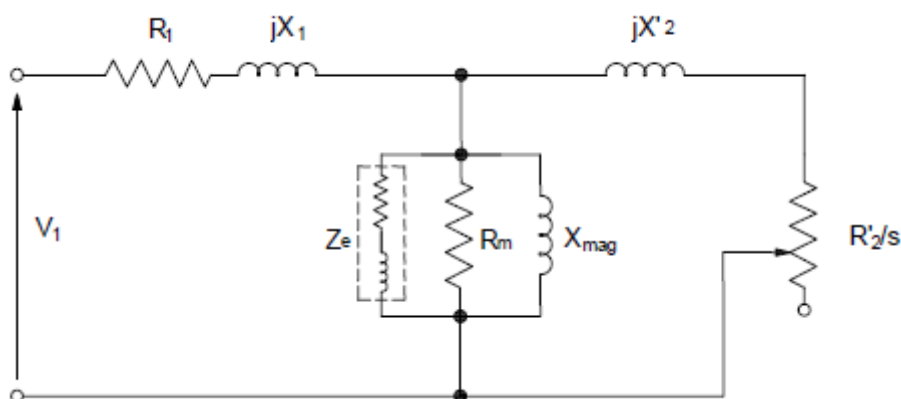
FONTE: (Gieras, 1994)

No gráfico da figura 26, F_s representa a força produzida pela onda de fluxo viajando na velocidade síncrona, enquanto F_e^+ e F_e^- representam as forças devido à onda atingir as bordas do estator.

3.6 Circuito Equivalente do Motor Linear

O circuito equivalente do motor linear é semelhante ao circuito do motor rotativo, no entanto, os efeitos relativos à descontinuidade do estator devem ser levados em conta, uma vez que esses efeitos são difíceis de serem modelados e atuam de forma significativa no desempenho do motor. A forma de introduzir o efeito longitudinal de extremidade no circuito equivalente é adicionar uma impedância ao ramo de magnetização, de forma que uma impedância adicional é colocada em paralelo com o ramo de magnetização. A figura 26 mostra o circuito equivalente para o motor linear:

Figura 26 - Circuito equivalente do motor linear



Onde:

R_1 é a resistência de perdas do estator.

X_1 é a reatância de fugas do estator.

R_m é a resistência de perdas no ferro devido às correntes de Foucault e histerese magnética do material ferromagnético do estator.

X_m é a reatância de magnetização.

X'_2 é a reatância do secundário refletida para o estator

$\frac{R'_2}{S}$ é a resistência equivalente do secundário refletida para o estator.

Z_c é a impedância adicionada ao ramo de magnetização devido ao efeito longitudinal de extremidade.

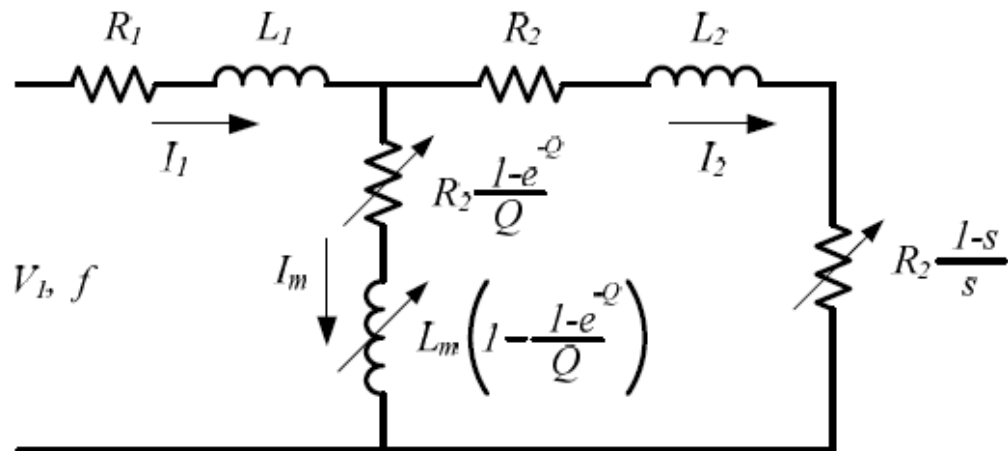
3.6.1 Circuito Equivalente de Duncan

O modelo do circuito equivalente de Duncan foi utilizado para obter os parâmetros do circuito equivalente de forma experimental. Esse circuito equivalente será utilizado pela facilidade de obter os dados do circuito equivalente, que serão usados apenas para fazer uma análise preliminar dos parâmetros do motor.

O efeito transversal de borda pode ser levado em conta corrigindo a impedância do secundário, enquanto o efeito longitudinal de extremidade é inserido no circuito através de uma impedância com valor dependente do escorregamento em paralelo com o ramo de magnetização. No modelo de circuito tradicional, o ramo de excitação é composto pela resistência de perdas no núcleo e a corrente de magnetização. O circuito equivalente de Duncan, no entanto, despreza as perdas no núcleo, uma vez que as máquinas lineares possuem um entreferro maior, resultando numa baixa densidade de fluxo magnético no núcleo. Como essa máquina setorial foi projetada para obter uma densidade de fluxo baixa no entreferro, as perdas no núcleo podem ser desconsideradas e a corrente de excitação é igual a corrente de magnetização.

A figura 27 mostra o circuito equivalente para o motor linear em cada fase do circuito:

Figura 27 - Circuito equivalente de Duncan



FONTE: (Tavares, 2011)

Onde:

R_1 é a resistência de perdas do estator, a resistência dos enrolamentos.

L_1 é a indutância de dispersão do estator. Representa o fluxo magnético de dispersão do estator. Não atravessa o secundário e influencia nas perdas porque muda a tensão do ramo magnetizante e a corrente de entrada do estator.

R_2 é a resistência de perdas do rotor. A potência dissipada nessa resistência é devida ao aparecimento de harmônicas indesejadas no secundário e pela ação do efeito longitudinal de extremidade.

L_2 é a indutância de dispersão do secundário.

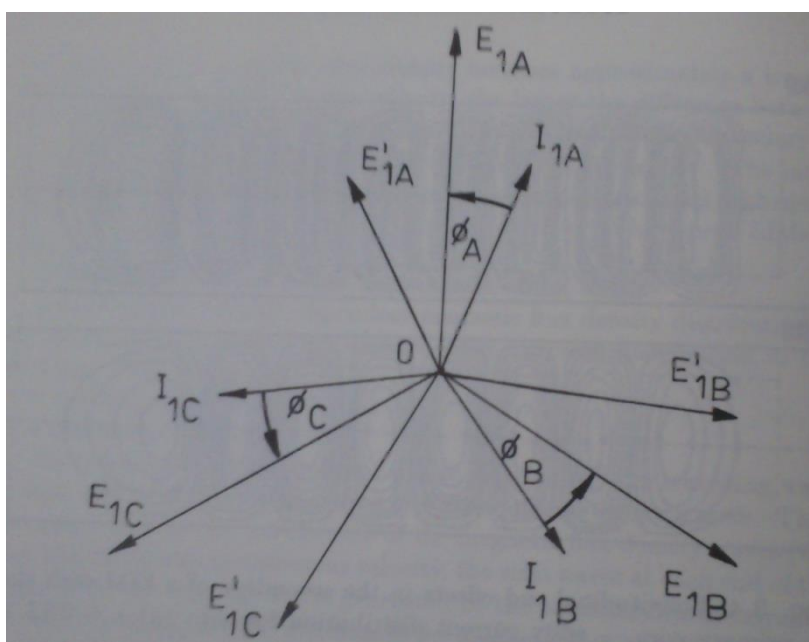
$R_2 \frac{1-s}{s}$ é a resistência equivalente do secundário refletida ao estator. Representa as perdas por Efeito Joule no secundário. É função do escorregamento do secundário. No circuito do motor de indução linear, essa resistência tem grande importância porque a partir dela é possível modelar o efeito transversal de borda.

$R_2 \frac{1-e^{-Q}}{Q}$ e $L_m \frac{1-e^{-Q}}{Q}$: Devido ao efeito longitudinal de extremidade a impedância é colocada em paralelo com o ramo de magnetização, reduzindo a tensão no ramo de

força (Gieras, 1994). Essa alteração na tensão pode ser entendida como uma alteração na densidade do campo magnético do entreferro (Creppe, 1997). A impedância do ramo de magnetização varia com a velocidade e assume valores reduzidos quando o escorregamento é alto. Conseqüentemente, a corrente sobre o ramo de força também diminui, reduzindo a força propulsora.

As correntes apresentadas no circuito, em cada fase, no entanto, são desequilibradas. A figura 28 apresenta o diagrama fasorial trifásico de um motor linear com as correntes desbalanceadas:

Figura 28 – Diagrama fasorial com as correntes desequilibradas do MIL



FONTE: (Gieras, 1994)

3.6.2 Correntes do Circuito Equivalente

A corrente que flui no estator (I_1) pode ser decomposta em duas componentes. Uma dessas componentes é a corrente necessária para alimentar a carga (I_2) e a outra componente é a corrente de magnetização (I_m), que cria a onda de densidade de fluxo magnético.

3.6.3 Análise do Circuito Equivalente

O fator de qualidade Q no circuito equivalente de Duncan é dado por:

$$Q = \frac{L_{\tau} R_2}{(L_m + L_2)v} \quad (55)$$

Onde:

L_{τ} = comprimento do núcleo do eixo

v = velocidade linear do secundário

O fator de qualidade é dependente da velocidade, logo, o ramo de magnetização depende da velocidade para levar em conta o efeito longitudinal de extremidade.

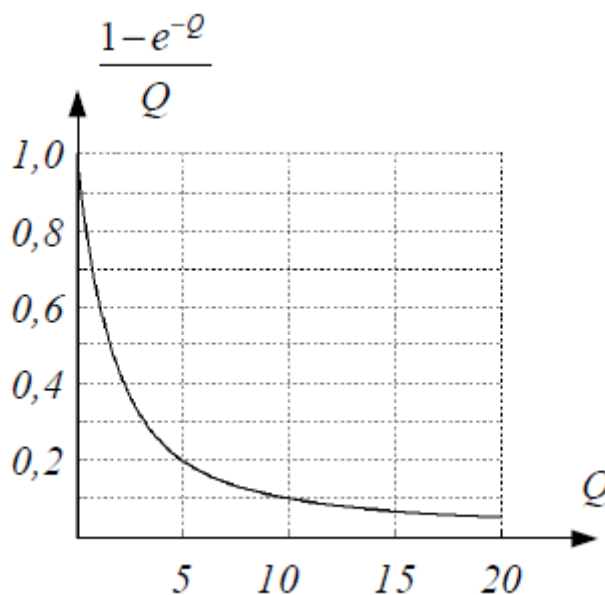
A resistência $R_2 \frac{1-e^{-Q}}{Q}$ representa as perdas de potência (P_p) e as forças de frenagem parasitas (F_p) devido ao efeito longitudinal de extremidade.

$$P_p = m_1 \left(R_2 \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \right) I_m^2 \quad (56)$$

$$F_p = \frac{m_1}{v} \left(R_2 \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \right) I_m^2 \quad (57)$$

A densidade de fluxo no entreferro depende da corrente de magnetização e da indutância de magnetização $L_m \left(1 - \frac{1-e^{-Q}}{Q} \right)$.

Figura 29 – Função $\frac{1-e^{-Q}}{Q}$ em função de Q



FONTE: (Tavares, 2011)

A partir da equação 53, é possível observar que quando a velocidade tende a zero o fator de qualidade Q tende ao infinito. Quando Q tende ao infinito, o termo $\frac{1-e^{-Q}}{Q}$ tende a zero. A nulidade deste termo significa que o efeito longitudinal de extremidade não produz forças de frenagem nem perdas de potência quando a velocidade é zero, logo, no ramo de magnetização, só restará a indutância L_m .

Quando a velocidade aumenta, no entanto, o termo $\frac{1-e^{-Q}}{Q}$ também aumenta e a indutância L_m diminui, provocando um enfraquecimento da densidade de fluxo no entreferro.

A partir da teoria de circuitos e de algumas medidas, é possível obter os parâmetros do circuito.

A impedância complexa de perdas do primário é dada por:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (58)$$

A impedância complexa de perdas do secundário é dada por:

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (59)$$

A impedância complexa total do ramo do secundário é dada por:

$$Z_{eq2} = \frac{R_2}{s} + j\omega L_2 \quad (60)$$

A impedância complexa do ramo de excitação é dada por:

$$Z_m = R_2 \frac{1 - e^{-Q}}{Q} + j\omega L_m \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (61)$$

A impedância complexa equivalente vista do primário é dada por:

$$Z_{eq1} = Z_1 + \frac{Z_m Z_{eq2}}{Z_m + Z_{eq2}} = Z_{eq1} \angle \varphi \quad (62)$$

O fasor da corrente do primário é dada por:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq1}} = \frac{V_1 \angle 0}{Z_{eq1} \angle -\varphi} \quad (63)$$

O fasor da corrente de magnetização é dada por:

$$I_m = \frac{Z_{eq2}}{Z_m + Z_{eq1}} I_1 \quad (64)$$

O fasor da corrente do secundário é dado por:

$$I_2 = I_1 - I_m \quad (65)$$

Com as correntes todas calculadas, é possível calcular as potências ativas.

As perdas Joule do primário e do secundário são dadas por:

$$P_1 = m_1 R_1 I_1^2 \quad (66)$$

$$P_2 = m_1 R_2 I_2^2 \quad (67)$$

A potência dissipada na resistência é a potência mecânica desenvolvida:

$$P_{mec} = m_1 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2 \quad (68)$$

Por fim, a potência ativa fluindo pelo primário e pelo secundário é dada pela soma de todas as potências e perdas:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_{mec} + P_p \quad (69)$$

3.7 Bobinagem do Motor

Nesta seção serão mostrados os aspectos construtivos com relação aos enrolamentos da máquina. Será mostrada a influência da bobinagem dos enrolamentos do estator sobre as grandezas eletromagnéticas. A partir destes dados será possível determinar o tipo de enrolamento, assim como o número de fios em cada espira e a seção do fio.

3.7.1 Número de Ranhuras por Polo e por Fase

Segundo Simões(2010), um maior número de ranhuras por polo e por fase permite uma melhor distribuição da indução magnética na máquina, conseqüentemente gerando uma melhor distribuição também da forma de onda da força eletromotriz e das demais grandezas eletromagnéticas.

O número de ranhuras por polo e por fase é calculado através da equação 70:

$$q_1 = \frac{z_1}{m_1 \cdot 2p} \quad (70)$$

Onde:

z_1 = número de ranhuras

m_1 = número de fases

$2p$ = número de polos

3.7.2 Passo da Ranhura

O passo da ranhura é a distância em graus elétricos entre uma ranhura e outra. Graus elétricos no enrolamento do motor representam o deslocamento angular em ciclos, ou seja, quando um ciclo da onda é completo, são percorridos 360° elétricos. A distância entre um polo e outro representa um deslocamento de 180° elétricos.

O passo de ranhura é dado por:

$$\alpha_1 = \frac{180^\circ E}{m_1 \cdot q_1} \quad (71)$$

3.7.3 Fator de distribuição do enrolamento

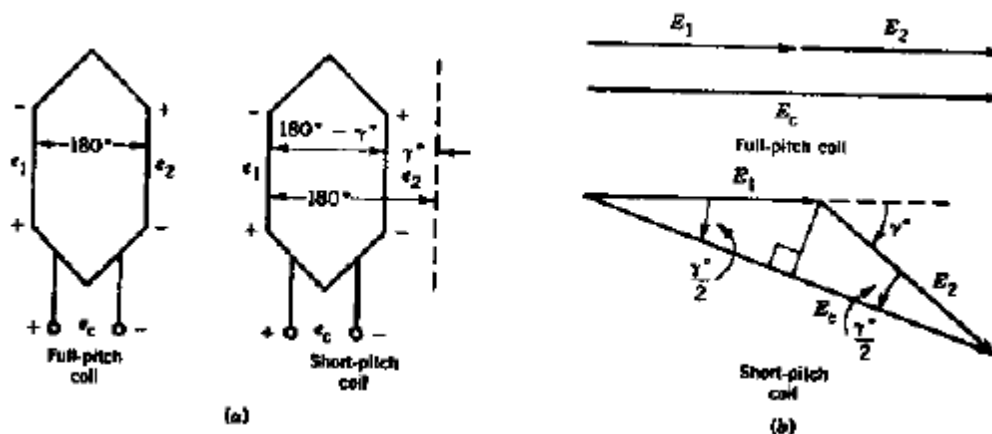
Segundo Sen(1987), se todas as bobinas das fases dos enrolamentos estiverem localizadas em apenas duas ranhuras, as tensões induzidas nesta bobina estão em fase. Como as bobinas estão distribuídas por diferentes ranhuras, as tensões induzidas nas bobinas estão deslocadas pelo passo de ranhura. A tensão no enrolamento é a soma fasorial das tensões presentes nas bobinas. O fator de distribuição do enrolamento é dado por:

$$k_{d1} = \frac{\sin q_1 \left(\frac{\alpha_1}{2} \right)}{q_1 \sin \left(\frac{\alpha_1}{2} \right)} \quad (72)$$

3.7.4 Fator de passo

Para o enrolamento de passo encurtado, onde o passo da bobina é menor que um passo polar, ou seja, menor que 180° elétricos, a tensão induzida é menor do que a tensão que poderia ser induzida no passo pleno (Sen, 1987). A figura 30 mostra a diferença entre as tensões induzidas em um enrolamento de passo pleno e um enrolamento de passo encurtado:

Figura 30 - Tensões em bobinas com enrolamento de passo pleno e encurtado



FONTE: (Sen, 1987)

Como é possível observar na figura 29, as tensões E_1 e E_2 tem seus máximos em instantes iguais para enrolamentos de passo pleno e em momentos diferentes para

enrolamentos encurtados, provocando uma diferença na tensão induzida nos dois casos. Para representar essa situação, o fator de passo é dado por:

$$k_{p1} = \sin\left(90^\circ \frac{\tau_c}{\tau}\right) \quad (73)$$

Tal que:

τ_c = passo de bobina

τ = passo polar

3.7.5 Fator de Enrolamento

Se os enrolamentos possuírem bobinas de passo encurtado e tiverem o enrolamento distribuído, esses dois fatores irão afetar a tensão induzida no primário. O fator de enrolamento para essa distribuição de bobinas no primário é dada pelo produto do fator de enrolamento e do fator de passo:

$$k_{el} = k_{dl} k_{pl} \quad (74)$$

3.7.6 Comprimento do Estator

Para transformar um motor rotativo em um motor linear setorial, corta-se um pedaço do estator. A partir de dados do estator original e do novo, é possível obter os dados do estator do motor linear a partir da seguinte equação:

$$L_e = \pi D \frac{z_1}{z_0} + c_1 \quad (75)$$

Onde:

L_e = comprimento do estator [m]

D = diâmetro interno do estator [m]

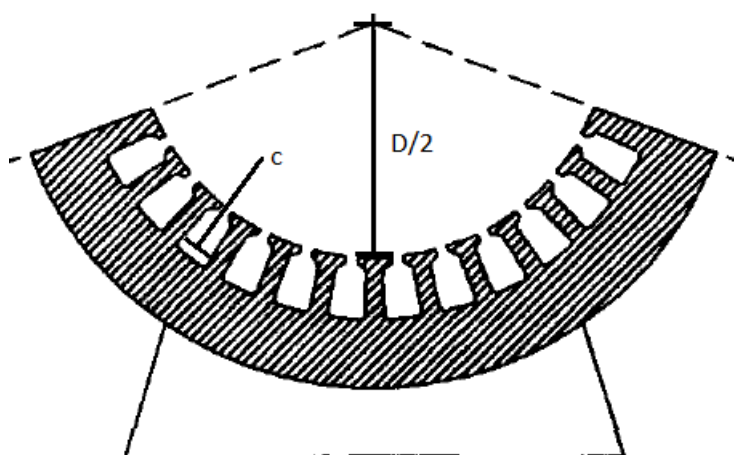
z_1 = número de ranhuras do estator atual

z_0 = número de ranhuras do estator original

c_1 = comprimento da saliência entre as ranhuras [m]

Conforme apresenta a figura 31:

Figura 31- Representação do estator do motor setorial



FONTE:

3.7.7 Passo Polar

O passo polar é a distância entre um polo e outro percorrendo o estator. Para enrolamentos de cada simples é dado pela seguinte equação:

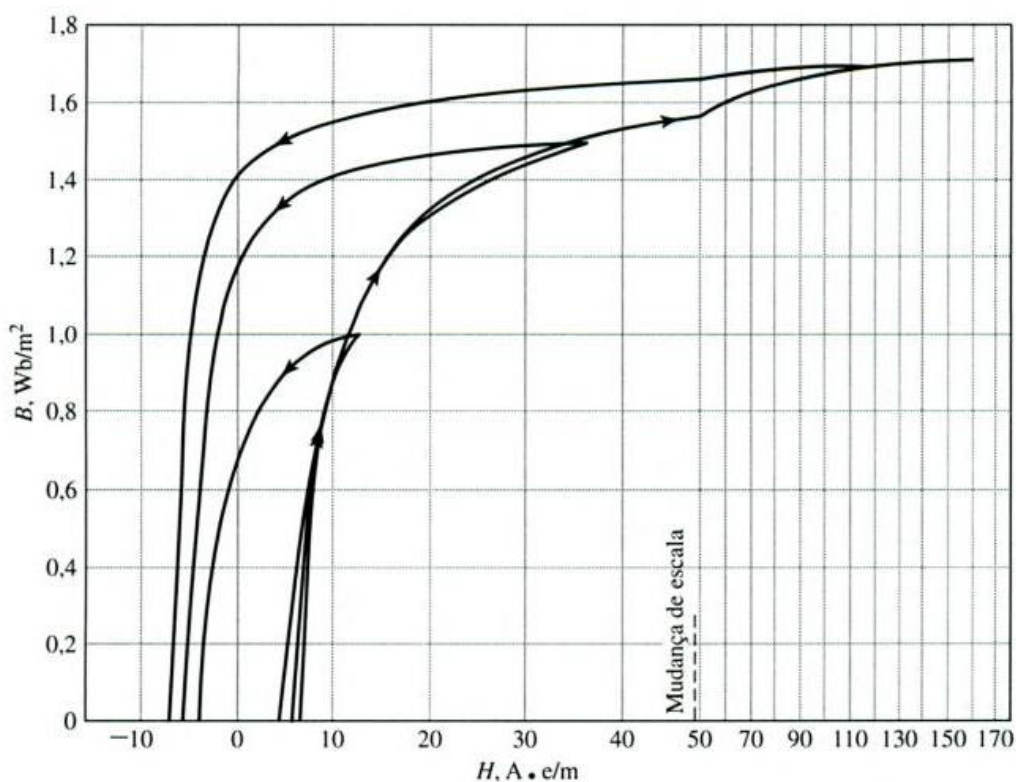
$$\tau = \frac{L_\tau - c_1}{2p} \quad (76)$$

3.7.8 Fluxo magnético por polo

Uma máquina de indução linear geralmente apresenta um entreferro maior que uma máquina rotativa. Este fato faz com que o circuito magnético de uma máquina de indução linear apresente uma característica linear, com permeabilidade constante e saturação desprezível (Tavares, 2011). Como uma máquina setorial não possui essa

característica, é possível compensar esse efeito estabelecendo que o motor deve trabalhar com baixa densidade de fluxo magnético no entreferro, fazendo com que ele trabalhe na zona linear da curva de saturação eletromagnética. Estabelecendo um valor máximo para a densidade de fluxo, é possível utilizá-lo para calcular o fluxo magnético por polo. A figura 32 mostra a curva da densidade de fluxo magnético para o aço silício, material da construção do estator:

Figura 32 - Curva da densidade de fluxo magnético do aço silício



FONTE: (Fitzgerald, 2006)

Considerando-se uma densidade de fluxo com distribuição espacial senoidal, tem-se a seguinte equação:

$$\varphi = \frac{2}{\pi} B_m \tau L_i \quad (77)$$

Onde:

B_m = densidade máxima de fluxo magnético [T]

L_i = comprimento do primário [m]

3.7.9 Número de espiras por fase

O número de espiras por fase corresponde ao número total de espiras somadas em todas as bobinas que compõem uma fase.

$$N_1 = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot \varphi \cdot k_{el}} \quad (78)$$

Onde f = frequência da rede [Hz]

E_1 = força eletromotriz [V]

A partir do número de espiras por fase é possível descobrir o número de espiras por bobina, que é dado pela equação :

$$N_b = \frac{N_1}{N_f} \quad (79)$$

Onde N_f = número de bobinas por fase

3.7.10 Seção do Fio

De posse do número de voltas do condutor por espira, é possível obter a seção do condutor. A área da ranhura pode ser considerada com um trapézio (Tavares, 2011), e é dada pela equação abaixo:

$$A = \frac{(b_{11} + b_{12}) \cdot h_{11}}{2} \quad (80)$$

Onde b_{11} = base menor [m]

b_{12} = base maior [m]

h_{11} = altura da ranhura [m]

A área total ocupada pelo fio depende do fator de preenchimento da ranhura. Se o fator de preenchimento for pequeno, os fios ficarão soltos e se for grande, será difícil colocar o fio dentro das ranhuras. O fator de preenchimento usual na fabricação de motores é de 70%. A seção do fio será dada por:

$$S = \frac{A \cdot f_e}{N_b} \quad (81)$$

Onde f_e = fator de preenchimento da ranhura

A corrente nominal do motor, segundo o Manual de Bobinagem da WEG, é dada pela equação :

$$I = \frac{S \cdot J \cdot 1,73}{k_2} \quad (82)$$

Onde:

J = densidade de corrente [A/mm^2]

k_2 = constante: 1,73 para conexão em estrela e 1 para conexão triângulo

3.7.11 Procedimentos para cálculo de bobinagem

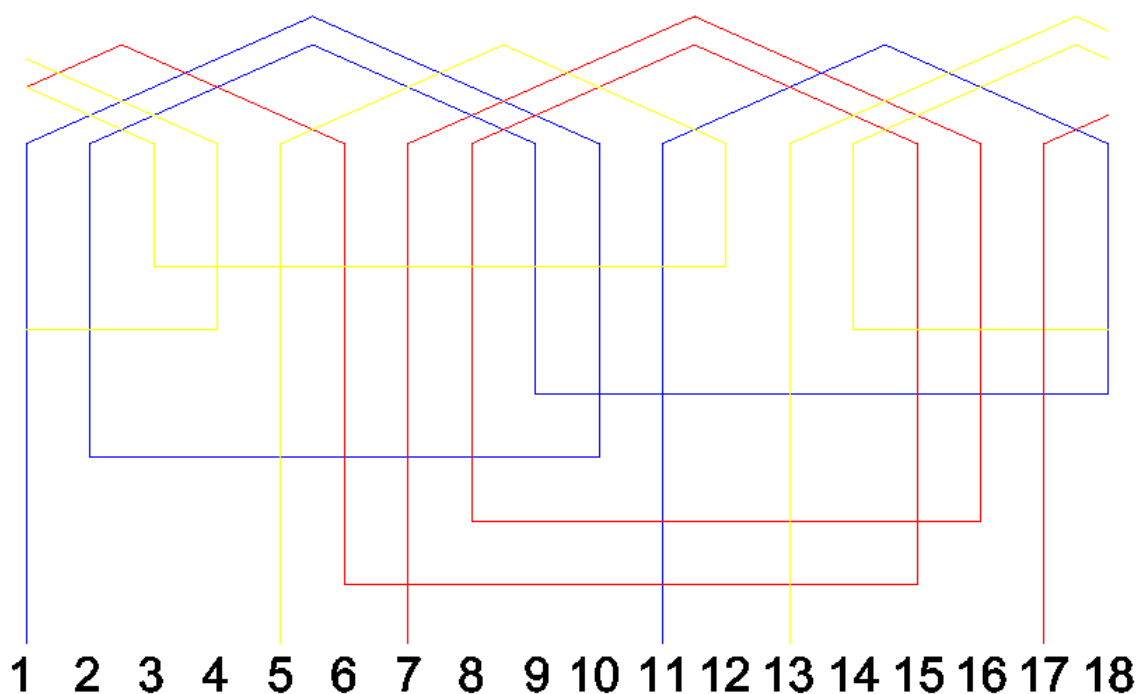
O motor original possuía um estator com 24 ranhuras, com um eixo de 69mm, diâmetro interno de 96mm e diâmetro externo de 152mm. A bobinagem original do motor era constituída de um esquema para 4 polos, com 70 fios AWG 22 em cada ranhura. Aproximadamente um quarto do estator foi cortado para deixar o rotor exposto, deixando-o com 18 ranhuras apenas.

Ao cortar o estator, foram retiradas parte do enrolamento também. Para que o motor se torne uma máquina setorial que efetivamente funcione, é necessário remodelar o motor. Como o estator do motor não pode ser remodelado, as modificações devem ser feitas

nos enrolamentos. Os procedimentos a seguir mostram os cálculos usados para definir os parâmetros de bobinagem implementados no motor:

Foi utilizado um esquema de bobinagem de 2 polos, com 18 ranhuras. Embora um esquema com dois polos proporcione uma maior velocidade a onda de fluxo produzida, acarretando numa maior influência do efeito longitudinal de extremidade, a área de cada circuito magnético é maior, aumentando assim também o fator de qualidade. A figura 33 mostra

Figura 33 - Esquema de bobinagem de 2 polos utilizado



Através da equação 70, obtém-se o número de ranhuras por polo e fase. Foram utilizadas as 18 ranhuras, para um motor trifásico e 2 polos.

$$q_1 = 3$$

A partir da equação 71, obtém-se o passo da ranhura:

$$\alpha_1 = 20^\circ \text{ elétricos}$$

A partir da equação 72, obtém-se o fator de distribuição do enrolamento:

$$k_{d1} = 0.96$$

A partir da equação 73, obtém-se o fator de passo:

$$k_{p1} = 0.98$$

A partir da equação 74, tem-se o fator de enrolamento:

$$k_{el} = 0.94$$

A partir da equação 75, tem-se o comprimento do estator:

$$L_{\tau} = 234 \text{ mm}$$

A partir da equação 76, tem-se o passo polar:

$$\tau = 113 \text{ mm}$$

A partir da equação 77, tem-se o fluxo magnético por polo. Observa-se que foi utilizado 0,3T para a densidade de fluxo magnética máxima, visto que essa fica na parte linear da curva de saturação magnética apresentada na figura 30.

$$\varphi = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

A partir da equação 78, obtém-se o número de espiras por fase:

$$N_1 = 585 \text{ espiras/fase}$$

Da equação 79, o número de espiras por bobina:

$$N_b = 195 \text{ espiras/bobina}$$

Sabe-se da equação 80 que a área da ranhura é a seguinte:

$$A = 57,7 \text{ mm}^2$$

Da equação 81 tem-se que a seção reta do fio é:

$$S = 0,207 \text{ mm}^2$$

Conclui-se então, que para o esquema de bobinagem escolhido, será utilizado o fio AWG 24 com 195 espiras por bobina.

Com os dados obtidos, a partir da equação 44 tem-se que a velocidade linear da onda de fluxo do motor é:

$$v_s = 13.56 \text{ m/s}$$

Como o eixo gira em torno do próprio eixo, tem-se que a velocidade angular da onda de fluxo é dada por:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot v_s}{D} \text{ rad/s} \quad (83)$$

$$n_s = \frac{60 \cdot \omega_s}{2\pi} \text{ rpm} \quad (84)$$

Assim, a partir da equação 84, tem-se:

$$n_s = 2697 \text{ rpm}$$

A partir da equação 82, obtém-se a corrente nominal do motor:

$$I = 1,25 \text{ A para conexão em triângulo}$$

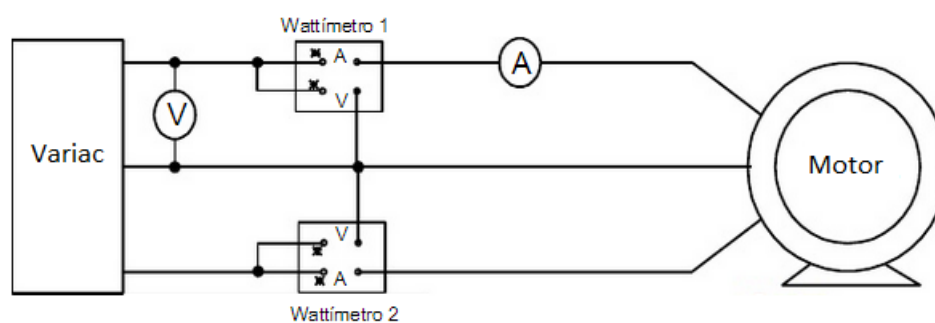
$$I = 0,77 \text{ A para conexão em estrela}$$

A densidade de corrente utilizada foi $3,5 \text{ A/mm}^2$, baseado na seção do fio de cobre e na corrente máxima suportada pelo fio.

3.7.12 Ensaio para obtenção do Circuito Equivalente

Foi realizado um ensaio para a obtenção de parâmetros do circuito para montar o circuito equivalente de Duncan. Foram utilizados dois wattímetros, um amperímetro e um voltímetro para medir a potência, a corrente e a tensão de entrada do motor. A figura 34 mostra a configuração utilizada nos testes:

Figura 34 - Configuração dos testes do motor



O primeiro ensaio realizado foi com o rotor bloqueado, pois como a velocidade do rotor é nula o motor não sofre ação do efeito transversal de borda. No circuito equivalente de Duncan, isso significa que o fator de qualidade tende a infinito e o termo $\frac{1-e^{-Q}}{Q}$ é zero, resultando em escorregamento unitário do rotor. Foi aplicada uma tensão de forma que a corrente medida no motor não ultrapassasse a corrente nominal do motor.

O segundo ensaio realizado foi com o motor a vazio, onde foram aplicadas diferentes tensões, até a tensão máxima fornecida pela rede. Neste ensaio foi medida também a velocidade do motor utilizando um tacômetro para calcular o escorregamento do rotor.

Foi realizado um ensaio com uma fonte de corrente contínua para obter a resistência dos enrolamentos do estator.

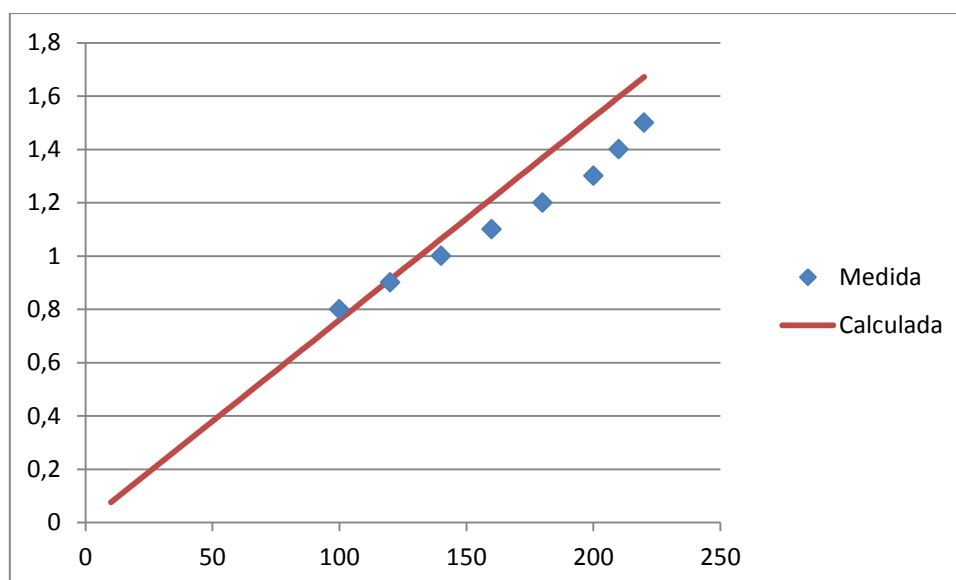
Os parâmetros do circuito equivalente da figura 26 encontrados são apresentados na figura 35:

Figura 35 Parâmetros do circuito equivalente

R_1	24 Ω
L_1	0,051H
R_2	23 Ω
L_2	0,051H
L_m	0,750H

A figura 36 mostra a relação entre a tensão aplicada nos terminais do motor e a corrente medida e calculada.

Figura 36 - Corrente medida x corrente calculada



Há uma diferença de aproximadamente 10% entre as correntes medidas e as calculadas, pois foi medida apenas uma das fases do motor e as correntes são desequilibradas.

3.7.13 Cálculo da potência e das perdas do motor

Foi utilizada a corrente de entrada nominal do motor para calcular a potência mecânica desenvolvida pelo motor, através da equação 68:

$$P_{mec} = 5,46 \text{ W}$$

Utilizando-se a equação 66 foram calculadas as perdas devido à resistência do estator:

$$P_1 = 39,96 \text{ W}$$

Utilizando-se a equação 67 foram calculadas as perdas devido a resistência do rotor:

$$P_2 = 12,75 \text{ W}$$

Utilizando-se a equação 56 foram calculadas as perdas devido ao efeito longitudinal de extremidade:

$$P_p = 5,9 \text{ W}$$

A potência total de entrada é dada pela soma de todas as outras, como mostra a equação 69:

$$P_{\text{total}} = 64,07 \text{ W}$$

A potência encontrada foi praticamente a mesma potência medida, de 62W.

4. CONCLUSÃO

Foram mostradas as diferenças entre motores rotativos e máquinas lineares, como os efeitos de borda causados pelo início e fim do primário e a existência de um campo transladante, e não mais um campo girante. Foram mostrados cálculos para projeto dos enrolamentos do primário e a partir destes foi refeita a bobinagem do motor.

Depois de construído o motor setorial, foram realizados testes para levantar o modelo teórico do motor. Foi mostrado que a partir de um motor de indução rotativo que teve seu estator cortado é possível construir uma máquina setorial, que se comporta de forma semelhante a uma máquina linear, mas tem como vantagem o seu baixo custo e a simplicidade na construção.

Referências Bibliográficas

- [1] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., C.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006
- [2] CHAPMAN, S.J., Electric Machinery Fundamentals, 5th ed., USA ,McGraw-Hill, 2012
- [3] NASAR, S. ; BOLDEA, I. Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987
- [4] GIERAS, J. F. Linear Induction Drives. New York: Oxford University Press, 1994.
- [5] CREPPE, R. C. Uma Contribuição a Modelagem de Máquinas de Indução Lineares. Campinas – SP. UNICAMP, 1997.
- [6] TAVARES, A. M. ; FLORES FILHO, A. F. ; BLAUTH, Y. B. . A Simple and Low Cost Three-Phase Sector Induction Machine. In: International Electric Machines and Drives Conference, 2011, Niagara Falls.
- [7] TANIMOTO, S. C. Uma contribuição para a aplicação de motores de indução lineares em secadores de cereais. 2006. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- [8] LAITHWAITE, E.R. Linear Induction Machines – A Personal View. Proceedings of the IEEE, v. 63, p. 250-290, February, 1975.
- [9] Oliveira, M.A.P. Controle de Velocidade do Motor de Indução Linear Utilizando DSP. 2004. 170f. Dissertação – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.
- [10] DUNCAN, J., Linear induction motor-equivalent-circuit model. *IEE PROC*, Vol. 130, PL B, No. 1, JANUARY 1983
- [11] YAMAMURA, S. Theory of Liner Induction Motors. 2nd ed. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972.
- [12] SEN, P.C. , PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS
- [13] GASTLI A. Electromechanical Systems & Actuators. Disponível em:
< http://emsa.gastli.net/Chapter8/Linear_Motors.pdf >
- [14] TAVARES, A. M Estudo Teórico e Experimental sobre a Frenagem Regenerativa da Máquina de Indução Linear. Tese(Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.