

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



LUCAS FREIRE SANTOS AZEREDO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO NO SOFTWARE DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS PSCAD/EMTDC E AFERIÇÃO DO MODELO VIA TESTES PRÁTICOS**

VITÓRIA
JULHO/2018

LUCAS FREIRE SANTOS AZEREDO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO NO SOFTWARE DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS PSCAD/EMTDC E AFERIÇÃO DO MODELO VIA TESTES PRÁTICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Lucas Freire Santos Azeredo, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 13, de julho de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr^a. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Ms. Giovani Freire Azeredo
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por todas as bênçãos e por todo amparo concedidos ao longo da realização desta pesquisa.

Agradeço, também, a minha família, em especial a minha esposa Bruna, aos meus pais, Elias e Jória, e a minha irmã Luana por todo apoio e paciência ao longo da escrita e da dedicação para realizar o melhor no presente trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação pelas orientações ao longo da elaboração deste trabalho e pela paciência ao me instruir ao longo de todo o desenvolvimento deste.

Por fim, agradeço a todos os integrantes do Laboratório de Eletricidade e Eletrônica e aos amigos que fiz ao longo do curso de Engenharia Elétrica.

RESUMO

Este trabalho tem como proposta a modelagem de um motor de indução, rotor bobinado de quatro polos, no programa PSCAD. Essa modelagem será efetuada após a realização dos ensaios a vazio, de rotor bloqueado e aplicação de tensão contínua no motor em questão para que os seus parâmetros elétricos sejam definidos. Em seguida, a validação deste modelo será realizada por meio de testes com variadas cargas que podem ser simuladas por meio do eletrodinamômetro.

Após a realização dos testes, o trabalho terá como foco a comparação da resposta obtida nos testes práticos com a obtida por meio dos testes realizados na simulação. Objetiva-se que o resultado da simulação seja bem próximo do obtido nos testes práticos a fim de se obter um modelo simulado mais próximo do modelo real do motor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estator do Motor de Indução.....	12
Figura 2 - Rotor Bobinado	13
Figura 3 -Circuito Equivalente do Motor de Indução.....	13
Figura 4 - Esquemático do ensaio com aplicação de tensão CC.	14
Figura 5 - Esquema de montagem do Ensaio a Vazio	15
Figura 6 - Circuito equivalente inicial do Ensaio a Vazio.....	16
Figura 7 - Circuito equivalente reduzido do Ensaio a Vazio.....	16
Figura 8 - Esquemático do ensaio de Rotor Bloqueado.....	17
Figura 9 - Circuito equivalente inicial do Ensaio de Rotor Bloqueado.....	18
Figura 10 - Carga de torque linear.	19
Figura 11 - Carga de torque quadrático.....	19
Figura 12 - Carga inversa.....	19
Figura 13 - Carga de torque constante.	20
Figura 14 - Ilustração dos equipamentos do LABVOLT	21
Figura 15 - Módulo DACI	22
Figura 16 – Eletrodinamômetro.....	23
Figura 17 - Módulo do Motor de Indução gaiola de esquilo.....	24
Figura 18 - Módulo do Motor de Indução de rotor bobinado	25
Figura 19 - Montagem da bancada para a realização do ensaio a vazio.	26
Figura 20 - Montagem para realização do ensaio a vazio.....	27
Figura 21 - Motor de indução de rotor bobinado no PSCAD	31
Figura 22 - Operação da chave seletora S comutando para a entrada TL em $t = T$	31
Figura 23 - Modelagem do circuito de potência do motor no PSCAD.	32
Figura 24 - Ajuste das resistências e indutâncias do motor.....	33
Figura 25 - Ajustes dos dados nominais do motor.....	34
Figura 26 - Curva fator de potência útil x velocidade	36
Figura 27 - Curva potência útil x velocidade	37
Figura 28 - Curva rendimento x velocidade	37
Figura 29 - Curva torque x velocidade	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos no ensaio sob tensão CC	26
Tabela 2 - Dados obtidos no ensaio a vazio	27
Tabela 3 - Dados obtidos no ensaio de rotor bloqueado.....	27
Tabela 4 - Valores das bases para o cálculo dos parâmetros em pu.	28
Tabela 5 - Parâmetros calculados do motor após a realização dos ensaios.	28
Tabela 6 – Parâmetros calculados conforme o roteiro seguindo para realização do ensaio.	29
Tabela 7 – Parâmetros calculados após a realização da modelagem no PSCAD.	34
Tabela 8 - Cálculo dos erros	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Rendimento e Escorregamento dos dados obtidos no Laboratório de Máquinas.	29
Gráfico 2 - Fator de Potência e Corrente dos dados obtidos no Laboratório de Máquinas.	30
Gráfico 3 - Rendimento e Escorregamento dos dados obtidos no PSCAD.	35
Gráfico 4 - Fator de Potência e Corrente dos dados obtidos no PSCAD.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFES	<i>Universidade Federal do Espírito Santo</i>
ES	<i>Espírito Santo</i>
V	<i>Volt – Unidade de medida de tensão elétrica no Sistema Internacional</i>
A	<i>Ampère – Unidade de medida de corrente elétrica no Sistema Internacional</i>
W	<i>Watt – Unidade de medida de potência ativa no Sistema Internacional</i>
VA	<i>Volt-ampère – Unidade de medida de potência aparente no Sistema Internacional</i>
ω	<i>Frequência angular</i>
R_1	<i>Resistência do enrolamento do estator</i>
R'_2	<i>Resistência do enrolamento do rotor referida ao enrolamento do estator</i>
X_1	<i>Reatância de dispersão do estator</i>
X_2	<i>Reatância de dispersão do rotor referida ao estator</i>
X_m	<i>Reatância de magnetização</i>
I_{cc}	<i>Corrente do ensaio sob aplicação de tensão CC</i>
V_{cc}	<i>Tensão do ensaio sob aplicação de tensão CC</i>
V_{vz}	<i>Tensão do ensaio a vazio</i>
I_{vz}	<i>Corrente do ensaio a vazio</i>
P_{vz}	<i>Potência do ensaio a vazio</i>
n_{vz}	<i>Velocidade do ensaio a vazio</i>
V_{rb}	<i>Tensão do ensaio de rotor bloqueado</i>
I_{rb}	<i>Corrente do ensaio de rotor bloqueado</i>
P_{rb}	<i>Potência do ensaio de rotor bloqueado</i>
n_{rb}	<i>Velocidade do ensaio de rotor bloqueado</i>

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa.....	11
1.2. Objetivos.....	11
1.2.1. Objetivo geral.....	11
1.2.2. Objetivo específico.....	11
2. EMBASSAMENTO TEÓRICO	12
2.1 Caracterização do Motor de Indução.....	12
2.2 Determinação dos Parâmetros do Motor de Indução	13
2.2.1 Ensaio com aplicação de tensão CC	14
2.2.2 Ensaio a Vazio.....	15
2.2.3 Ensaio de Rotor Bloqueado.....	17
2.3 Tipos de Cargas	18
2.3.1 Carga de torque variável	18
2.3.2 Carga de torque constante.....	20
2.3.3 Carga de Potência Constante	20
3. O LABVOLT	21
3.1 Eletrodinamômetro.....	23
3.2 Motor de Indução Gaiola de Esquilo.....	24
3.3 Motor de Indução de Rotor Bobinado	25
4. LEVANTAMENTOS DOS PARÂMETROS DO MOTOR.....	26
4.1 Realização dos Ensaios	26
4.2 Cálculo dos Parâmetros	28
5. REALIZAÇÃO DOS TESTES COM CARGAS.....	28
6. MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO NO PSCAD	31
6.1 Controle via torque no eixo da máquina (TL)	32
6.2 Controle via velocidade mecânica da máquina(W)	32
6.3 Modelagem do circuito de potência	32
6.4 Respostas Gráficas do modelo	34
7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	36
8. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO I	42
ANEXO II	43

1. INTRODUÇÃO

O motor de indução é o tipo de motor elétrico mais utilizado e difundido, tanto para motorização de sistemas, quanto para processos industriais. Sua principal vantagem é a eliminação do atrito de todos contatos elétricos deslizantes e uma construção bastante simples, o que possibilitou sua construção a um custo ainda mais baixo, sendo que estas máquinas são fabricadas para uma grande variedade de aplicações (LEONHARD, 1985). Além de ser robusto em termos de operação, proporcionando vantagens econômicas consideráveis tanto na aquisição, quanto na manutenção.

Além disso, o avanço da tecnologia também contribuiu para o avanço nas técnicas de modelagem, pois os novos processadores e programas existentes no mercado possibilitaram o estudo e o aprimoramento de novas técnicas de modelagem. Para tal fim é importante destacar o *Power Systems Computer Aided Design - PSCAD*.

O *PSCAD* é um *software* de interface gráfica que permite simular respostas transitórias. Este software melhora o ambiente de simulação gráfica, na medida em que permite aos usuários construir circuitos esquemáticos de forma eficiente, executar a simulação e analisar os resultados dessa. Portanto, é usado extensivamente para muitos tipos de estudos de simulação de alimentação de sistema CA e CC, tornando-se um instrumento indispensável na análise de projetos de energia. É uma ferramenta funcional, dado que é igualmente capaz nas áreas dos Sistemas de Energia, na simulação de projetos de eletrônica, na análise de qualidade de energia, nos sistemas de proteção e útil no estudo de planejamento do sistema.

A Energia Elétrica e os Sistemas Eletrônicos assumem um papel importante nos sistemas de potência e, através do *PSCAD*, permitem a simulação de forma eficaz e eficiente, dado a menor complexidade e custo necessários à execução, otimizando equipamentos e sistemas elétricos antes da realização de protótipos.

1.1 Justificativa

Dada à necessidade de aprimoramento dos estudos e conhecimentos dos usuários do Laboratório de Máquinas Elétricas, essa pesquisa foi desenvolvida, possibilitando, assim, o acesso à modelagem do motor de indução e a utilização desse para diversos fins possíveis no laboratório mencionado.

Além disso, a questão da modelagem é bastante difundida no meio de pesquisas sobre a representação de modelos reais, uma vez que obter um modelo simulado extremamente próximo ao modelo real é essencial para se alcançar um melhor aproveitamento desse motor para a finalidade que lhe foi atribuída.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Modelagem de um motor de indução e validação deste modelo, via testes práticos, e obtenção dos parâmetros atendendo aos requisitos da NBR 5383.

1.2.2. Objetivo específico

Para que o objetivo principal seja atingido, alguns objetivos específicos são requeridos. São eles:

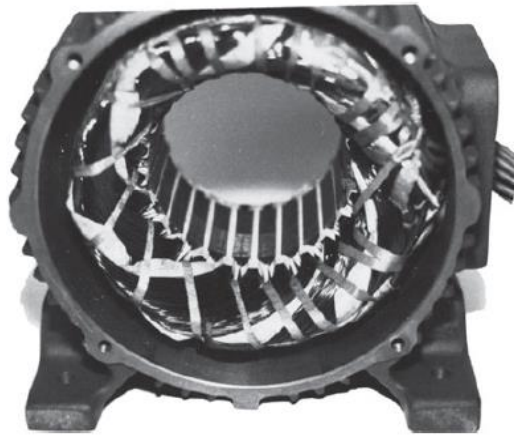
- Realizar o levantamento dos parâmetros do motor do laboratório;
- Realizar os testes com cargas no motor real
- Realizar a modelagem no PSCAD.
- Analisar os resultados obtidos e validar do modelo obtido no PSCAD.

2. EMBASSAMENTO TEÓRICO

2.1 Caracterização do Motor de Indução

De acordo com Chapman (2013) denominamos máquina de indução as máquinas que possuem apenas um conjunto contínuo de enrolamentos amortecedores. Isso acontece porque a tensão do rotor (que produz a corrente do rotor e o campo magnético do rotor) é induzida nos enrolamentos do rotor ao invés de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios. Um diferencial do motor de indução é que não há necessidade de uma corrente de campo CC para fazer a máquina funcionar. A Figura 1 ilustra o estator de um motor de Indução.

Figura 1 - Estator do Motor de Indução



Fonte: MagneTek

No trabalho em questão será utilizado o motor de indução com rotor bobinado. Esse tipo de rotor é composto de um núcleo ferromagnético cilíndrico também constituído de lâminas, com a superfície externa ranhurada, onde é alojado um enrolamento trifásico similar ao do estator.

As terminações das bobinas que formam o enrolamento são conectadas a três anéis coletores solidários ao eixo (isolados eletricamente do mesmo e entre si). O acesso ao rotor é então obtido através de escovas de carvão apropriadas, fixadas à estrutura do motor. Desse modo, os anéis coletores e as escovas formam um sistema de contatos móveis tornando possível o acesso ao enrolamento mesmo com o rotor em movimento. O rotor do motor de indução de rotor bobinado está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Rotor Bobinado

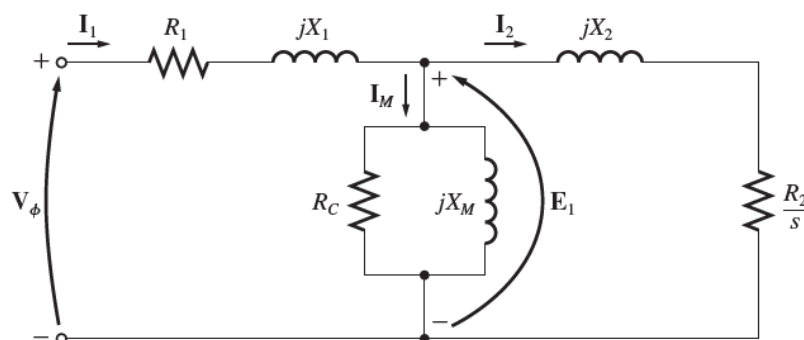


Fonte: RSA Engenharia

2.2 Determinação dos Parâmetros do Motor de Indução

O circuito equivalente de um motor de indução é uma ferramenta muito útil para determinar a resposta do motor às mudanças de carga. Entretanto, se o modelo é usado para representar uma máquina real, será necessário determinar os valores dos elementos de circuito que farão parte do modelo. A Figura 3 mostra o circuito equivalente de um motor de indução e os elementos necessários para a utilização no modelo simulado.

Figura 3 -Circuito Equivalente do Motor de Indução



Fonte: Chapman 2013

Onde:

R_1 = Resistência do estator.

R_2 = Resistência do rotor referida ao lado do estator.

X_2 = Reatância do rotor referida ao lado do estator.

$X1$ = Reatância do estator.

XM = Reatância de magnetização.

RC = Resistência do núcleo.

$I1$ = Corrente do estator.

$I2$ = Corrente do rotor.

Im = Corrente de magnetização.

s = escorregamento.

$V\phi$ = Tensão de fase.

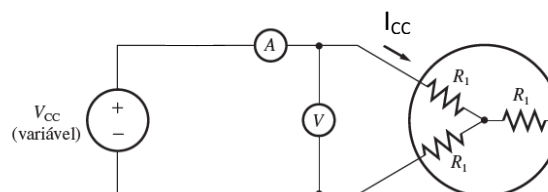
$E1$ = Tensão de rotor transformada.

As informações supracitadas podem ser obtidas executando uma série de testes ou ensaios no motor de indução. Esses testes são semelhantes aos ensaios de curto-circuito e a vazio de um transformador. Os ensaios devem ser executados sob condições precisamente controladas, porque as resistências variam com a temperatura e a reatância do rotor também varia com a frequência do rotor. Os detalhes exatos de como cada ensaio de motor de indução deve ser realizado para se obter resultados necessários são descritos pela NBR 5383.

2.2.1 Ensaio com aplicação de tensão CC

No ensaio com aplicação de tensão CC, usa-se uma fonte de tensão CC conectada a dois dos três terminais de um motor de indução ligado em Y. Para realizar o ensaio, a corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal e, em seguida, a tensão entre os terminais é medida. A Figura 4 ilustra o esquemático deste ensaio.

Figura 4 - Esquemático do ensaio com aplicação de tensão CC.



Fonte: Chapman 2013

No referido ensaio, será possível obter a resistência do estator, conforme mostra a equação (1).

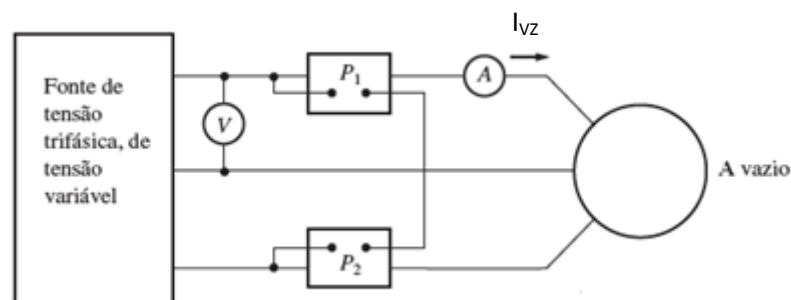
$$R1 = \frac{V_{cc}}{2 * I_{cc}} \quad (1)$$

Como a corrente é contínua, não haverá tensão induzida no circuito do rotor e fluxo resultante de corrente no rotor. Além disso, a reatância do motor é zero com corrente contínua. Portanto, a única grandeza que limita o fluxo de corrente no motor é a resistência do estator (R_1).

2.2.2 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio de um motor de indução mede as perdas rotacionais do motor e fornece informação sobre sua corrente de magnetização. O circuito para realização deste ensaio está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema de montagem do Ensaio a Vazio



Fonte: Chapman 2013

Inicialmente, a tensão no ensaio a vazio deve ser ajustada até o seu valor nominal e, por fim, os parâmetros referentes a corrente e potência serão coletados para esse valor de tensão. Vale ressaltar que toda a potência convertida é consumida por perdas mecânicas (perdas por atrito e ventilação) e o escorregamento na realização do respectivo ensaio é muito pequeno. Os parâmetros que são obtidos podem fornecer, de acordo com as equações abaixo, as seguintes informações:

$$P_{pce} = I_{vz}^2 * R_1 \quad (2)$$

$$|Z_{vz}| = \frac{V_{vz}}{I_{vz}} \approx X_1 + X_m \quad (3)$$

Onde:

P_{pce} = Perdas no cobre do estator monofásica.

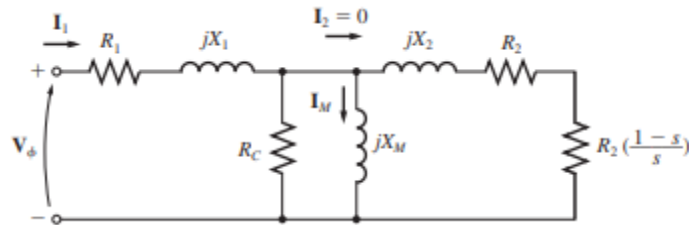
Z_{vz} = impedância a vazio.

V_{vz} = Tensão a vazio.

I_{vz} = Corrente a vazio.

O circuito equivalente inicial para esse ensaio está mostrado na Figura 6:

Figura 6 - Circuito equivalente inicial do Ensaio a Vazio.



Fonte: Chapman 2013

Onde:

R_1 = Resistência do estator.

R_2 = Resistência do rotor referida ao lado do estator.

X_2 = Reatância do rotor referida ao lado do estator.

X_1 = Reatância do estator.

X_M = Reatância de magnetização.

R_C = Resistência do núcleo.

I_1 = Corrente do estator.

I_2 = Corrente do rotor.

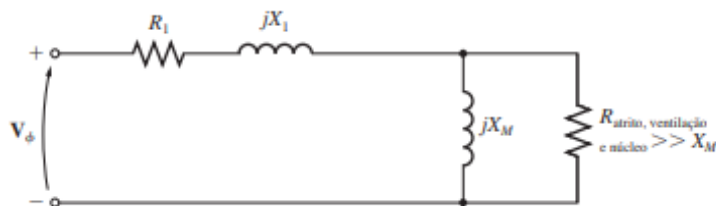
I_m = Corrente de magnetização.

$R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$ = resistência correspondente à potência convertida.

V_ϕ = Tensão nominal de fase.

No ensaio a vazio as perdas por atrito e ventilação são a única carga do motor. Desse modo toda a potência convertida desse motor é consumida por perdas mecânicas e o escorregamento do motor é muito pequeno. O circuito equivalente desse ensaio está mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Circuito equivalente reduzido do Ensaio a Vazio



Fonte: Chapman 2013

Onde:

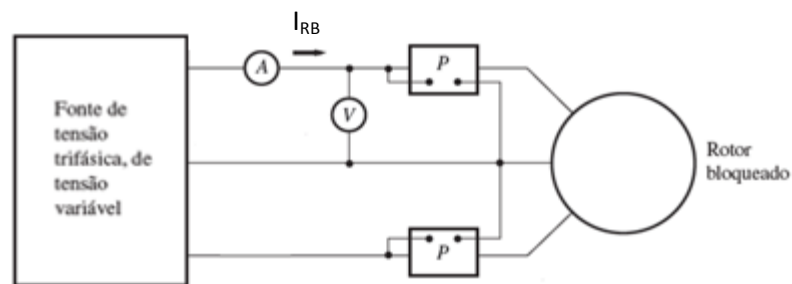
$R_{\text{atrito, ventilação e núcleo}}$ = combinação em paralelo da resistência do núcleo com a resistência correspondente à potência convertida.

Como o escorregamento é muito pequeno a resistência correspondente a potência convertida é muito maior do que a resistência R_2 correspondente às perdas no cobre do rotor e muito maior do que a reatância X_2 do rotor. Sendo assim, o circuito equivalente inicial se reduz ao circuito mostrado na Figura 7, no qual a resistência $R_{\text{atrito, ventilação e núcleo}}$ está em paralelo com a reatância de magnetização.

2.2.3 Ensaio de Rotor Bloqueado

Nesse ensaio, o rotor é bloqueado ou travado de modo que não possa se mover. Primeiramente, uma tensão é aplicada ao motor de tal forma que a corrente medida atinja o valor nominal. Em seguida, os valores de corrente e potência resultantes são coletados. Além disso, o respectivo ensaio é usado para determinar a resistência total do circuito do motor. A Figura 8 ilustra o esquemático deste ensaio.

Figura 8 - Esquemático do ensaio de Rotor Bloqueado



Fonte: Chapman 2013

Os parâmetros que são obtidos podem fornecer, de acordo com as equações abaixo, as seguintes informações:

$$R_{rb} = R_1 + R_2 \quad (4)$$

$$X_{rb} = X_1 + X_2 \quad (5)$$

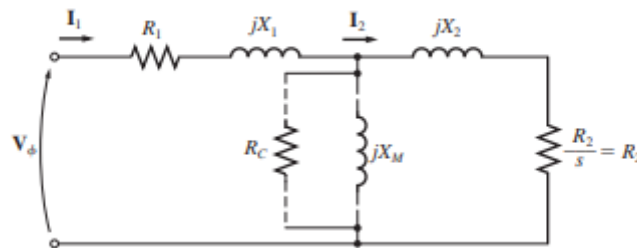
Onde:

R_{rb} = Resistência de rotor bloqueado

X_{rb} = Reatância de rotor bloqueado

O circuito equivalente inicial para esse ensaio está mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Circuito equivalente inicial do Ensaio de Rotor Bloqueado.



Fonte: Chapman 2013

Como o rotor não está se movendo, o escorregamento é igual a um e, portanto, a resistência $\frac{R_2}{s}$ é simplesmente igual a R_2 . Como os valores de R_2 e X_2 são muito baixos, grande parte da corrente de entrada circulará através de R_2 e X_2 , em vez de fluir através da reatância de magnetização X_m e da resistência do núcleo R_c , que são muito maiores. Portanto, no ensaio de rotor bloqueado o ramo de magnetização é desprezado.

2.3 Tipos de Cargas

Conforme o artigo técnico da WEG acerca de motores de indução acionados por inversores de frequência, as cargas podem ser classificadas em três tipos: torque variável, torque constante e potência constante.

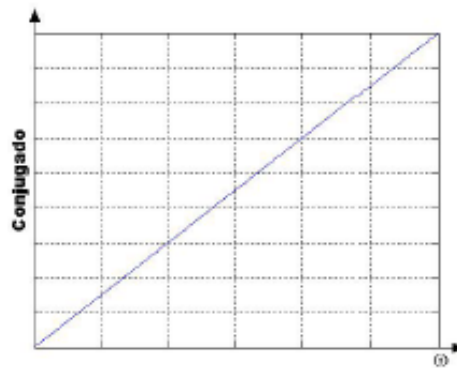
2.3.1 Carga de torque variável

A potência mecânica disponibilizada na saída do motor não será constante, mas variará convenientemente de acordo com a exigência da carga. Sendo assim, as cargas de torque variável podem ser classificadas da seguinte forma:

- Carga linear;
- Carga quadrática;
- Carga inversa;

As cargas lineares são aquelas que variam linearmente com a rotação, conforme mostra a Figura 10, sendo que tal tipo de carga é encontrada em diversas aplicações como moinhos de rolos, bombas de pistão, serras para madeira.

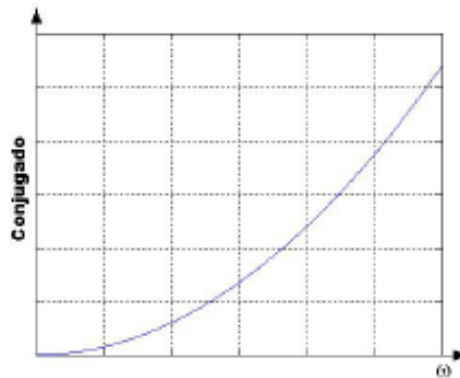
Figura 10 - Carga de torque linear.



Fonte: Sergio 2007

As cargas quadráticas são cargas que variam com o quadrado da rotação e são encontradas em aplicações como ventiladores, centrífugas, exaustores. O seu comportamento é ilustrado através da Figura 11.

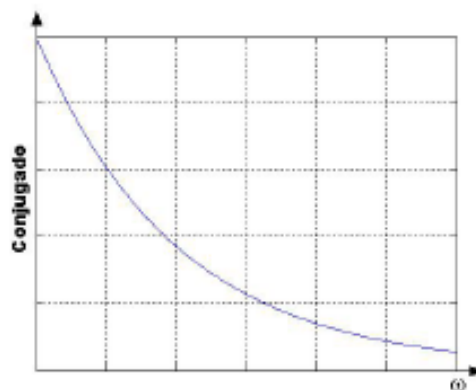
Figura 11 - Carga de torque quadrático



Fonte: Sergio 2007

A carga cujo conjugado varia inversamente com a rotação, resultando em potência constante, ou seja, diminuindo com o aumento da velocidade é denominada de carga inversa. As cargas inversas são encontradas em aplicações como máquinas operatrizes. O comportamento desse tipo de carga pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Carga inversa



Fonte: Sergio 2007

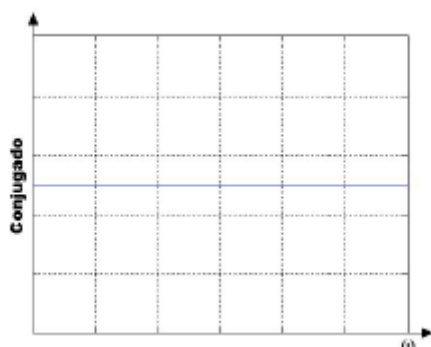
2.3.2 Carga de torque constante

O torque da carga é constante durante toda a faixa de velocidade, a potência varia linearmente com a velocidade de operação. Alguns exemplos típicos:

- Compressores alternados;
- Compressores helicoidais;
- Elevadores de caneca;
- Esteiras transportadoras;
- Bombas de deslocamento positivo.

A Figura 13 ilustra o comportamento desse tipo de carga.

Figura 13 - Carga de torque constante.



Fonte: Sergio 2007

2.3.3 Carga de Potência Constante

O torque da carga diminui com o aumento de velocidade e a potência é constante durante toda a faixa de operação. Alguns exemplos típicos:

- Ferramentas de usinagem;
- Bobinadeiras.

3. O LABVOLT

O Laboratório de Máquinas Elétricas possui os equipamentos da LABVOLT para implementação dos objetivos do trabalho. Com base na facilidade que o laboratório proporciona, vale destacar o *AC Power Transmission Training System* que combina uma abordagem de design modular com aquisição e controle de dados. A Figura 14 ilustra os equipamentos que fazem parte da estrutura descrita anteriormente.

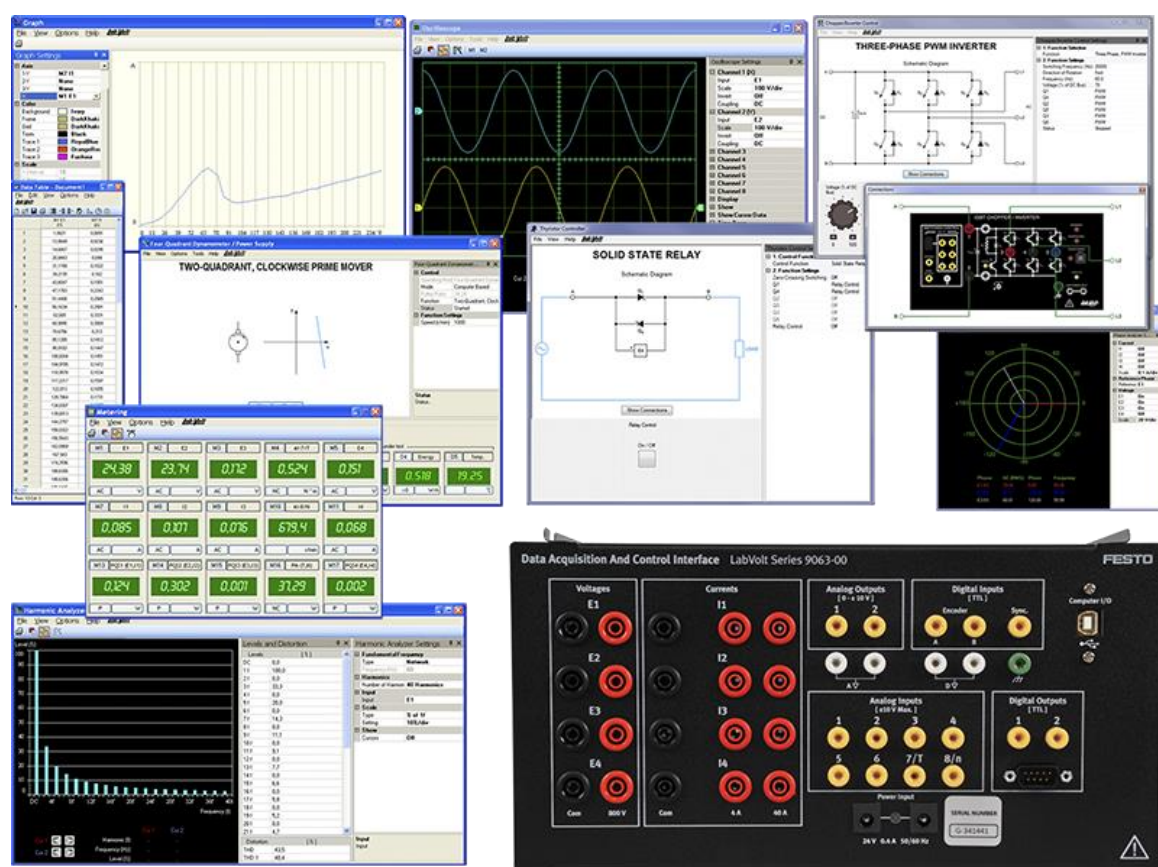
Figura 14 - Ilustração dos equipamentos do LABVOLT



Fonte: LABVOLT

O sistema possui a Interface de Controle e Aquisição de Dados (DACI) e um periférico USB versátil usado para medir, observar, analisar e controlar parâmetros elétricos e mecânicos em sistemas de energia elétrica e circuitos eletrônicos de potência. Para esse propósito, um conjunto de instrumentos baseados em um aplicativo computacional e uma variedade de funções de controle está disponível para o DACI. Esses instrumentos e funções de controle são acessados através do software LVDAC-EMS. A Figura 15 ilustra a representação desse módulo e as telas que podem ser vistas ao acessar o LVDAC-EMS.

Figura 15 - Módulo DACI



Fonte: LABVOLT

Quando usado em conjunto, o DACI e o software LVDAC-EMS oferecerem a possibilidade de estudo em várias áreas, como, por exemplo, a área de máquinas elétricas, energia renovável e linhas de transmissão, permitindo o uso de instrumentos de medição modernos e versáteis.

Apesar dos diversos equipamentos presentes na estrutura, o foco do trabalho será na utilização dos dois elementos abaixo:

1. Eletrodinamômetro.
2. Motor de Indução de Rotor Bobinado.

O motor de indução de rotor bobinado foi escolhido devido a sua maior facilidade para ser modelado no software que será realizado para executar a simulação e modelagem do motor.

3.1 Eletrodinamômetro

O Eletrodinamômetro possui dois modos de operação: dinamômetro e fonte de alimentação. Uma ampla variedade de funções selecionáveis pelo usuário está disponível em cada modo de operação.

No modo dinamômetro, a unidade torna-se um dinamômetro de quatro quadrantes que pode atuar como um freio totalmente configurável ou um motor primário totalmente configurável. No modo de fonte de alimentação, a unidade torna-se uma fonte de alimentação de quatro quadrantes, podendo atuar como fonte de tensão de corrente contínua ou de energia CA. O módulo referente ao eletrodinamômetro está ilustrando na Figura 16.

Figura 16 – Eletrodinamômetro



Fonte: LABVOLT

Em cada modo operacional, os parâmetros-chave relacionados à função selecionada são exibidos. Velocidade, torque, potência mecânica e energia são exibidas no modo *Dynamometer*, enquanto a tensão, corrente e energia são exibidas no modo de Alimentação. Existem dois modos para controlar a função que o eletrodinamômetro executa, o modo manual e por meio de um computador.

No modo de controle manual, o módulo funciona como uma unidade autônoma e a função executada poderá ser selecionada, configurada e monitorada, usando controles e exibição montados no painel frontal, fornecendo acesso a todas as funções básicas. No modo de controle baseado em computador, a função executada pelo módulo é selecionada, configurada e monitorada usando o software LVDAC-EMS através de uma conexão USB. Esse modo fornece acesso a todas as funções básicas, bem como as funções avançadas adicionais.

3.2 Motor de Indução Gaiola de Esquilo

O motor de indução presente na estrutura do LAVOLT é uma máquina de indução de gaiola de esquilo de $\frac{1}{4}$ Hp, quatro polos, e os enrolamentos do estator da máquina são conectados de forma independente, permitindo a conexão em configuração estrela ou delta. Além disso, as conexões com a máquina são feitas através de conectores de segurança codificados por cores localizados no painel lateral do módulo. O módulo é representado pela Figura 17.

Figura 17 - Módulo do Motor de Indução gaiola de esquilo



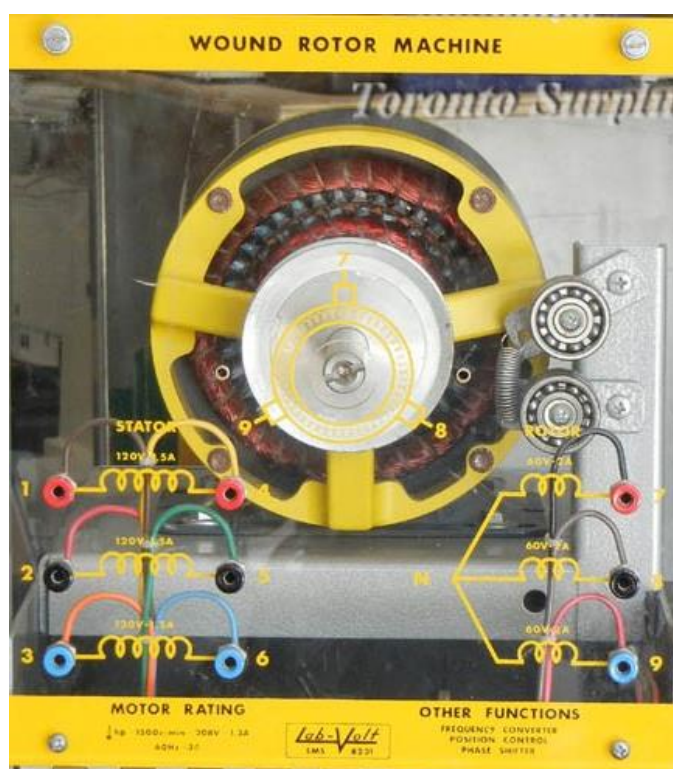
Fonte: LABVOLT

O painel frontal do módulo de motor de indução pode ser aberto para instalar uma correia dentada no eixo da máquina. Isso permite o acoplamento mecânico dessa máquina ao eletrodinamômetro.

3.3 Motor de Indução de Rotor Bobinado

O motor de indução de rotor bobinado presente na estrutura do LABVOLT é uma máquina que possui potência no valor de $\frac{1}{4}$ Hp, quatro polos, velocidade nominal de 1500 rpm, 208 V de tensão nominal e 1.3 A de corrente nominal. Além disso, cada fase dos enrolamentos do estator deste motor é terminada de forma independente e identificada na placa frontal para permitir a operação na configuração delta ou estrela. Os enrolamentos do rotor são levados para a placa frontal através de anéis deslizantes externos e escovas. Essa máquina pode ser usada como um motor de indução de rotor enrolado, deslocador de fase, transformador de acoplamento variável monofásico, transformador trifásico, controle *selsyn*, conversor de frequência ou gerador de indução assíncrono.

Figura 18 - Módulo do Motor de Indução de rotor bobinado



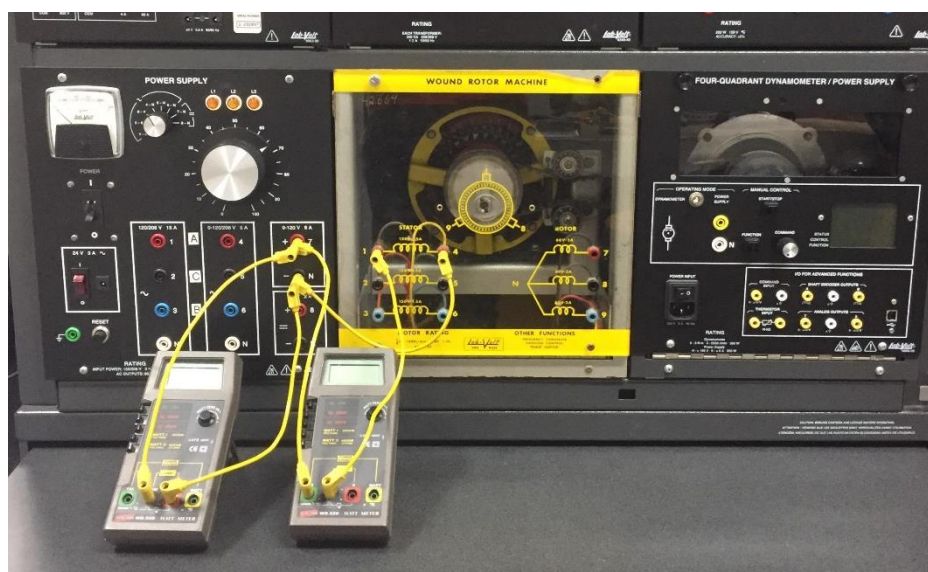
Fonte: TORONTO SURPLUS

4. LEVANTAMENTOS DOS PARÂMETROS DO MOTOR

4.1 Realização dos Ensaio

Os levantamentos dos parâmetros do motor de indução de rotor bobinado são de extrema importância para que possamos realizar a modelagem no PSCAD. Para realizar essa etapa do projeto foram executados os ensaios descritos na Seção 2.2. O primeiro ensaio realizado foi o ensaio sob tensão CC e a montagem que foi realizada na bancada do laboratório está ilustrada na Figura 19.

Figura 19 - Montagem da bancada para a realização do ensaio a vazio.



Fonte: O Autor.

Após a realização do ensaio os valores obtidos foram expostos na tabela abaixo.

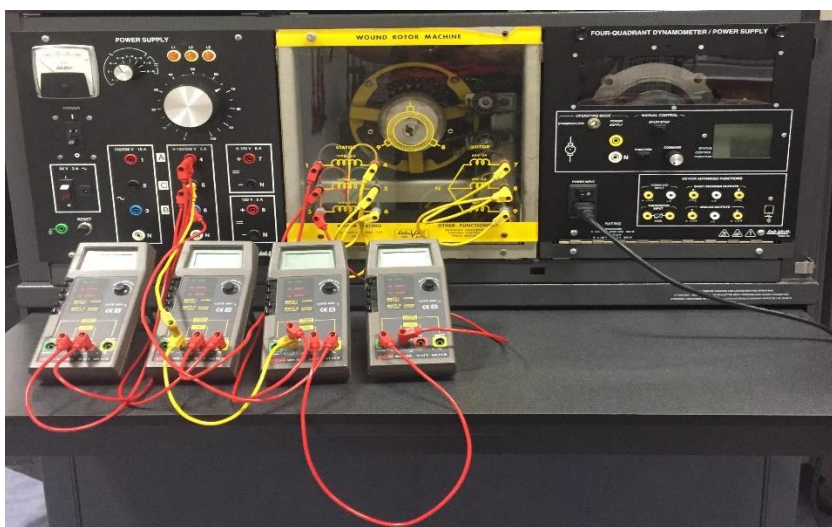
Tabela 1 - Dados obtidos no ensaio sob tensão CC

ENSAIO SOB TENSÃO CC

$I_{cc} (A)$	1,5
$V_{cc} (V)$	22

Com a finalização do ensaio a vazio a banca foi montada para realização do ensaio a vazio. A montagem desse ensaio está ilustrada na Figura 20.

Figura 20 - Montagem para realização do ensaio a vazio.



Fonte: O Autor.

Após a realização do ensaio os valores obtidos foram expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados obtidos no ensaio a vazio

ENSAIO A VAZIO	
$V_{vz}(V)$	208
$I_{vz}(A)$	0,8
$P_{vz}(W)$	58
$n_{vz}(rpm)$	1771

O último ensaio realizado no motor de indução foi o ensaio de rotor bloqueado. A montagem referente ao ensaio a vazio (Figura 19) foi mantida, porém nesse ensaio o módulo referente ao motor de indução de rotor bobinado foi aberto para que fosse realizado o bloqueio do rotor. Após a realização desse ensaio os dados foram coletados e expostos na Tabela 1.

Tabela 3 - Dados obtidos no ensaio de rotor bloqueado

ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO	
$V_{rb}(V)$	74
$I_{rb}(A)$	1,3
$P_{rb}(W)$	146
$n_{rb}(rpm)$	0

4.2 Cálculo dos Parâmetros

De posse dos resultados obtidos, é possível calcular os parâmetros do motor de indução de acordo com as equações que são indicadas na Seção 2.2. Sendo assim, os dados calculados por meio dessas equações são apresentados através da Tabela 5 abaixo. A Tabela 4 apresenta as bases em pu que foram utilizadas.

Tabela 4 - Valores das bases para o cálculo dos parâmetros em pu.

VALORES DAS BASES	
<i>V</i>base(V)	120
<i>I</i>base(A)	1,3
<i>Z</i>base(Ω)	92,37604

Tabela 5 - Parâmetros calculados do motor após a realização dos ensaios.

PARÂMETROS	OHMS(Ω)	PU
R1	14,667	0,15877
R'2	14,13	0,15296
X1	7,918	0,08571
X2	7,918	0,08571
XM	139,01	1,50485

5. REALIZAÇÃO DOS TESTES COM CARGAS

Para a realização dos testes com cargas foi utilizado o roteiro disponibilizado na disciplina de Máquinas Elétricas. O roteiro apresenta uma tabela com cargas a serem aplicadas no motor, mas para uma melhor definição das curvas houve o levantamento de mais pontos. Além disso, durante os testes práticos foram aferidos outros parâmetros como velocidade, potência de entrada e corrente de linha. Essas medições foram importantes para poder obter outros parâmetros, são estes: fator de potência, potência útil e rendimento. O cálculo desses parâmetros realizou-se por meio das equações abaixo:

$$Fp = \frac{P_{in}}{S_{in}} \quad (6)$$

$$P_{util} = T * \omega \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_{in}} \quad (7)$$

No que se refere a montagem da bancada, foi mantida a montagem referente ao ensaio a vazio (Figura 19) com o eletrodinômetro acoplado. A tabela com os valores obtidos na realização dos testes práticos está exposta na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros calculados conforme o roteiro seguindo para realização do ensaio.

TESTES COM CARGAS										
T(N.M)	Pin(W)	Vin(V)	I1(A)	n(rpm)	n(rad/s)	P _{util} (W)	f _p	η	s	Pin/Pn
0	87	208	0,81	1747	182,85	0,00	0,30	0,00%	2,94%	0%
0,226	126	208	0,84	1717	179,71	41,33	0,42	32,80%	4,61%	22%
0,452	164	208	0,88	1687	176,57	79,81	0,52	48,67%	6,28%	43%
0,6215	197	208	0,93	1658	173,54	107,85	0,59	54,75%	7,89%	58%
0,791	230	208	0,98	1630	170,61	134,95	0,65	58,67%	9,44%	72%
0,9605	267	208	1,05	1582	165,58	159,04	0,71	59,57%	12,11%	85%
1,13	303	208	1,11	1562	163,49	184,74	0,76	60,97%	13,22%	99%
1,243	330	208	1,15	1542	161,40	200,62	0,80	60,79%	14,33%	108%
0	350	208	1,20	1522	159,30	216,01	0,81	61,72%	15,44%	116%

Para uma melhor visualização do desempenho do motor durante a realização dos testes, os Gráficos 1 e 2 mostram as curvas obtidas.

Gráfico 1 - Rendimento e Escorregamento dos dados obtidos no Laboratório de Máquinas.

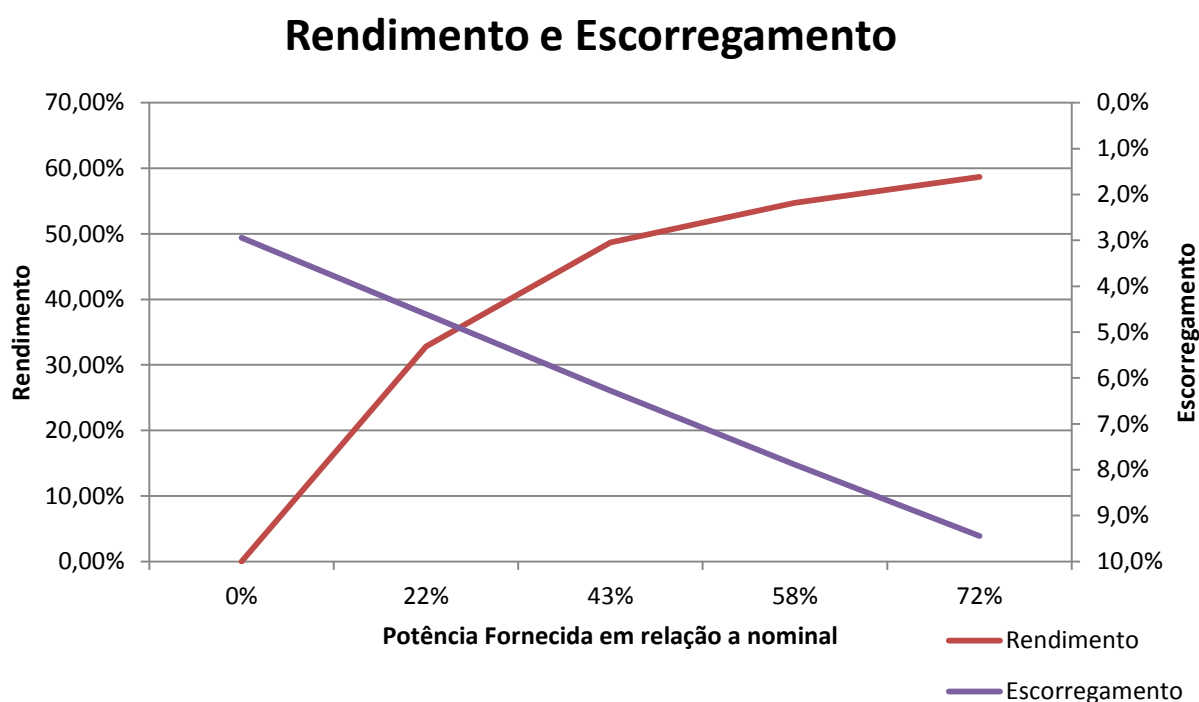
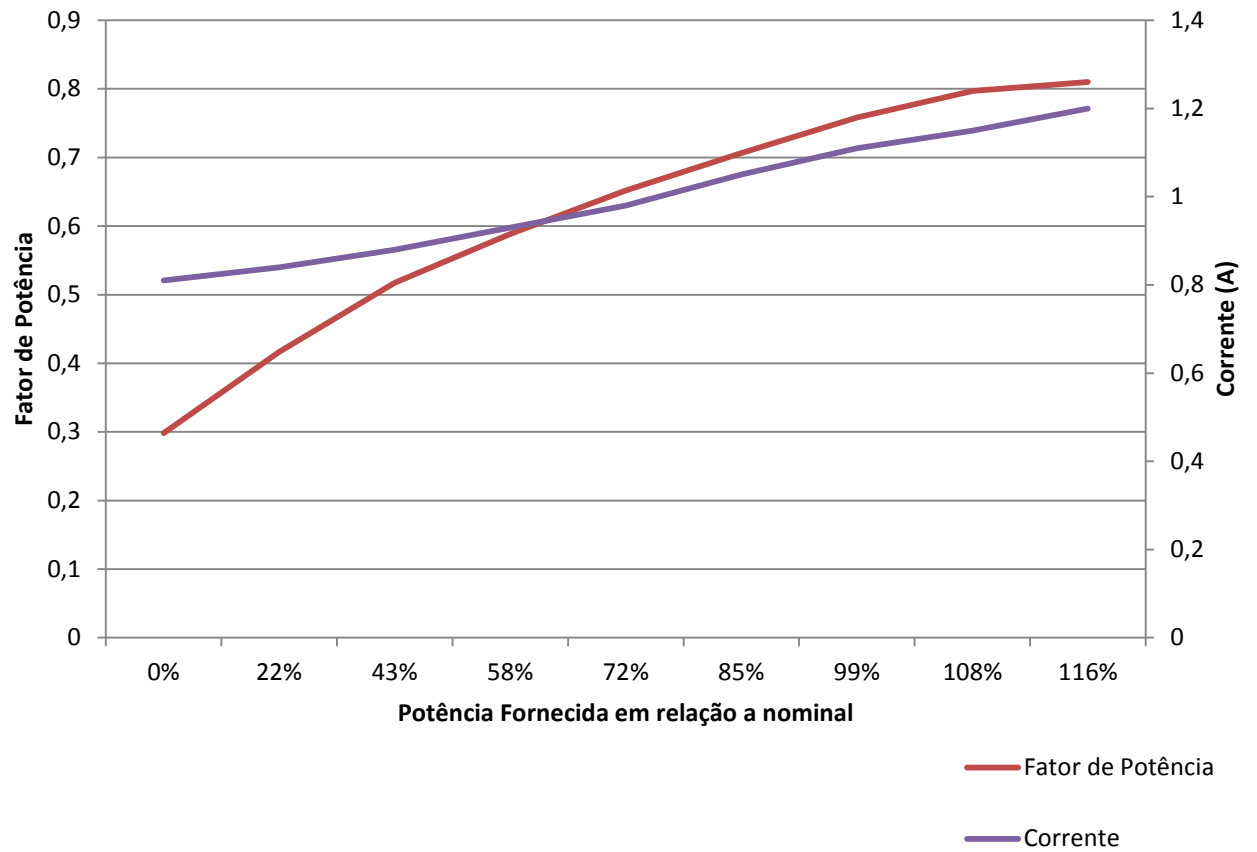


Gráfico 2 - Fator de Potência e Corrente dos dados obtidos no Laboratório de Máquinas.

Fator de Potência e Corrente

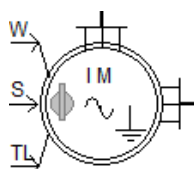


6. MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO NO PSCAD

A biblioteca do PSCAD possui dois modelos de máquinas de indução totalmente desenvolvidas e planejadas, são eles motor de indução gaiola de esquilo e de rotor bobinado.

O modelo referente à máquina de rotor bobinado (Figura 21) é matematicamente igual à máquina de indução gaiola de esquilo. Além disso, o manual do programa PSCAD recomenda que seja usado o modelo de rotor bobinado para simular as duas máquinas.

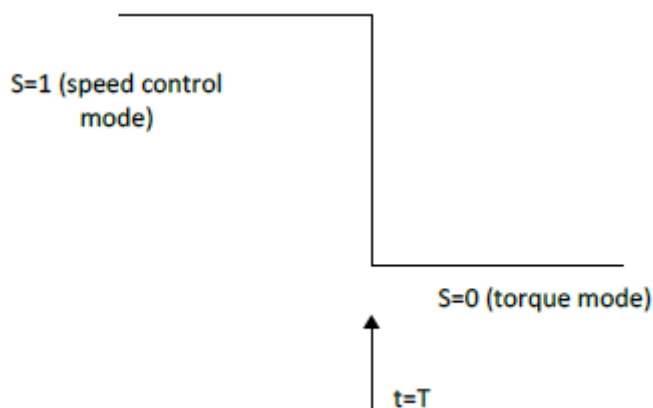
Figura 21 - Motor de indução de rotor bobinado no PSCAD



Fonte: PSCAD

O modelo citado pode ser controlado especificando o torque no eixo da máquina, representado pela variável TL, ou ainda diretamente pela velocidade mecânica que é representada pela variável W. Para selecionar qual dos dois modos será usado, a variável de entrada S é utilizada como chave seletora. Quando a variável S assume valor zero a entrada TL é selecionada e, quando a variável S assume valor um, a variável W é selecionada. Isso pode ser verificado na Figura 22.

Figura 22 - Operação da chave seletora S comutando para a entrada TL em $t = T$.



Fonte: PSCAD

6.1 Controle via torque no eixo da máquina (TL)

No modo de controle via torque no eixo da máquina, a velocidade da máquina é calculada com base nas equações de movimento mecânico:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (8)$$

O torque elétrico (T_e) é calculado por modelo com base em suas condições nominais. O torque mecânico (T_m) é uma entrada para o modelo da máquina. A variável J é a inércia devido às partes móveis combinadas do eixo da máquina, ω_m é a frequência do rotor e B é responsável pelo amortecimento mecânico.

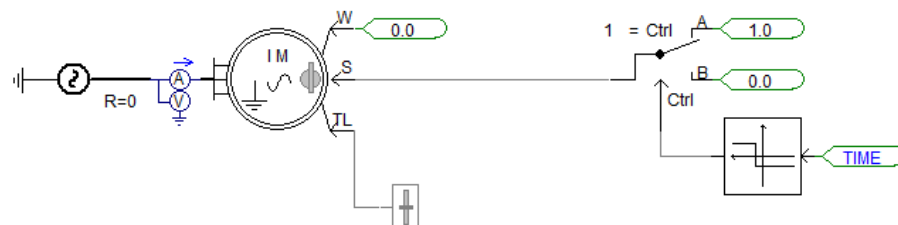
6.2 Controle via velocidade mecânica da máquina(W)

No modo de velocidade, a máquina operará na velocidade especificada pela entrada W, que pode ser um sinal de tipo variável ou constante. Em algumas simulações como a partida das máquinas, pode ser funcionalmente mais vantajoso iniciar a máquina no modo de velocidade e depois mudar para o modo de torque assim que o estado estacionário for alcançado.

6.3 Modelagem do circuito de potência

Para a modelagem foi necessário montar o circuito de potência do motor conforme mostra a Figura 23:

Figura 23 - Modelagem do circuito de potência do motor no PSCAD.



Fonte: PSCAD

Além disso, torna-se necessário indicar para o programa PSCAD os parâmetros do motor como a resistência e a reatância do estator, a resistência e a reatância do rotor e a reatância de magnetização.

Com isso, os valores (Tabela 5) foram inseridos em *pu*, considerando as bases indicadas para o cálculo dos parâmetros obtidos na realização dos ensaios (Seção 4.2). A Figura 24 demonstra o ajuste desses parâmetros.

Figura 24 - Ajuste das resistências e indutâncias do motor

É igualmente importante que seja definida a tensão nominal do motor, a potência nominal e a frequência angular. Além disso, para o cálculo da potência nominal utilizou-se a equação abaixo:

$$S_{nom} = \sqrt{3} * V_{nom} * I_{nom} \quad (9)$$

Onde:

S_{nom} = Potência nominal.

V_{nom} = Tensão nominal.

I_{nom} = Corrente nominal.

A Figura 25 ilustra como foi realizado a inserção dos dados nominais para o motor modelado.

Figura 25 - Ajustes dos dados nominais do motor.

[wound_rotor] Wound Rotor Induction Machine

General data

Motor Name: |

Rated Power: 468 [VA]

Rated Voltage (L-L): 208 [V]

Base Angular Frequency: 376.99 [rad/s]

Stator / Rotor Turns Ratio: 1

Angular Moment of Inertia (J=2H): 1 [s]

Mechanical Damping: 0.166[pu]

Graphics Display: Single line view

OK Cancel Help...

Vale ressaltar que o parâmetro *Mechanical Damping* é de suma importância para a simulação do modelo, pois esse parâmetro com valor em *pu* é ajustado para compensar as perdas por atrito e ventilação do motor. O valor indicado na Figura 25 foi o valor que obteve os melhores resultados para a modelagem do motor. Para uma melhor compreensão da metodologia adotada na simulação, realizou-se a elaboração de um fluxograma que se encontra no ANEXO .

6.4 Respostas Gráficas do modelo

Após a modelagem do motor com os parâmetros definidos na seção 6.3, foram geradas as tabelas referentes ao motor. Para uma melhor visualização das curvas foram adicionados mais pontos de análise no *software* para que o circuito modelado fique mais próximo do circuito real. A Tabela 7 mostra os valores obtidos na simulação de regime permanente.

Tabela 7 – Parâmetros calculados após a realização da modelagem no PSCAD.

TESTES PRÁTICOS REALIZADOS NO PSCAD

T(N.M)	Pin(W)	Vin(V)	I1(A)	n(rpm)	n(rad/s)	P _{util} (W)	fp	Rendimento	s	Pin/Pn
0	104	208	0,824	1747	182,85	0,00	0,350593	0,00%	2,9%	0%
0,226	144	208	0,8597	1717	179,71	40,62	0,465279	28,20%	4,6%	22%
0,452	186	208	0,913	1687	176,57	79,81	0,5659	42,91%	6,3%	43%
0,6215	220	208	0,96	1662	173,96	108,11	0,636574	49,14%	7,7%	58%
0,791	245	208	1,02	1636	171,23	135,45	0,667211	55,28%	9,1%	73%
0,9605	288	208	1,09	1608	168,30	161,66	0,733945	56,13%	10,7%	87%
1,13	324	208	1,17	1578	165,16	186,64	0,769231	57,60%	12,3%	100%
1,243	349	208	1,23	1557	162,97	202,57	0,788166	58,04%	13,5%	109%
1,356	373	208	1,29	1535	160,66	217,86	0,803187	58,41%	14,7%	117%

Com posse desses dados, é possível traçar as mesmas curvas que foram traçadas para o ensaio realizado no Laboratório de Máquinas Elétricas.

Gráfico 3 - Rendimento e Escorregamento dos dados obtidos no PSCAD.

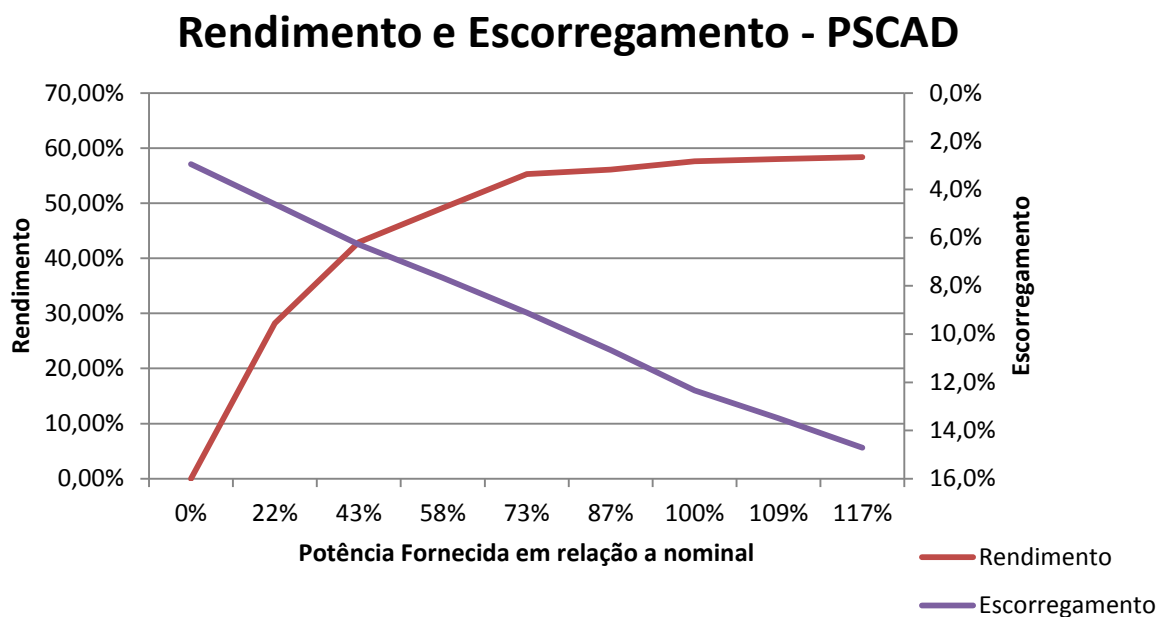
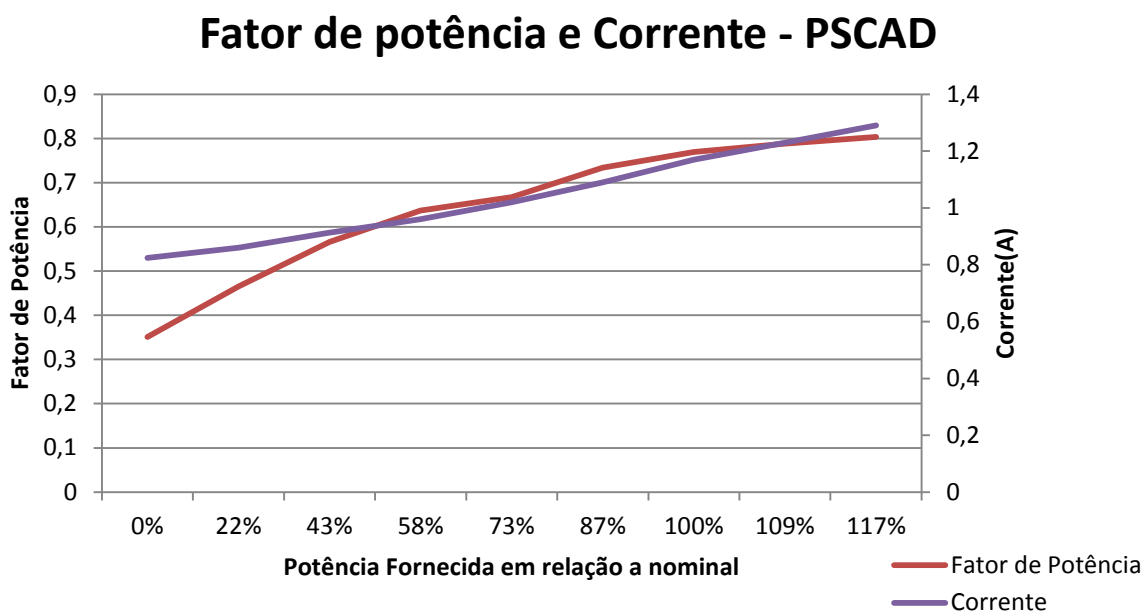


Gráfico 4 - Fator de Potência e Corrente dos dados obtidos no PSCAD.



7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para uma análise mais detalhada sobre a efetividade do sistema modelado, tornou-se necessário comparar as curvas de torque, fator de potência, de rendimento e de potência útil do motor simulado com o motor real. Para realizar a comparação foi necessário utilizar as ferramentas do MATLAB, o código utilizado para realizar a comparação encontra-se no ANEXO II. As figuras a seguir mostram essas comparações gráficas resultantes da rotina criada no MATLAB.

Figura 26 - Curva fator de potência útil x velocidade

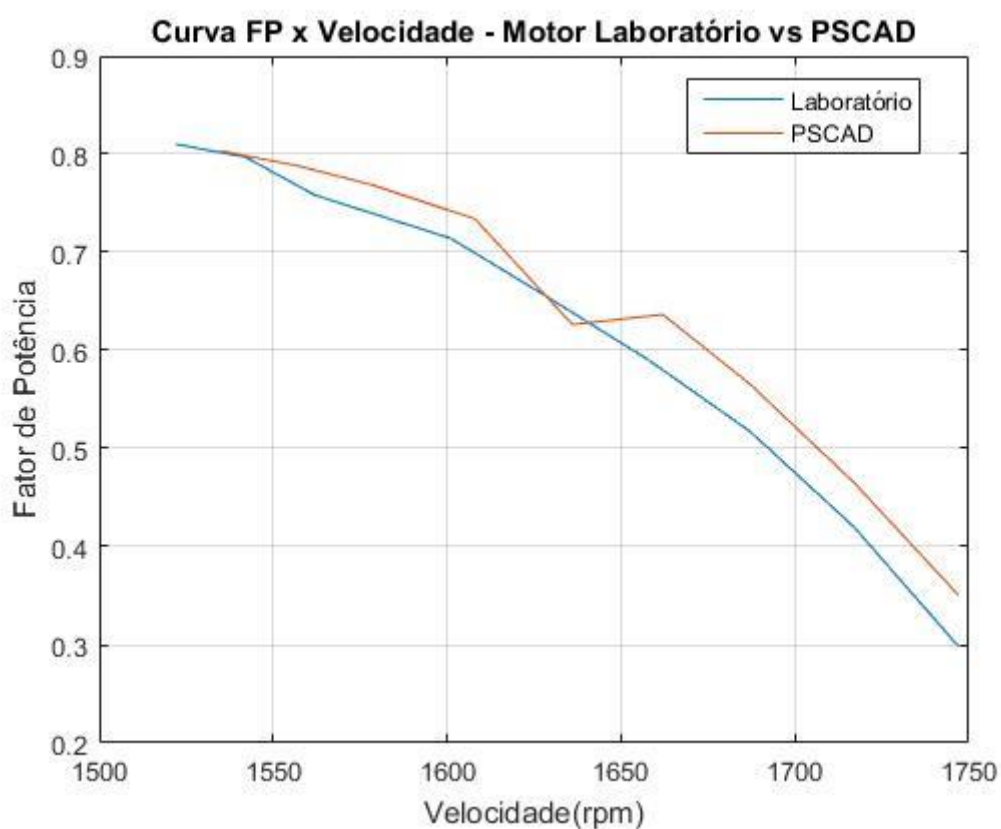


Figura 27 - Curva potência útil x velocidade

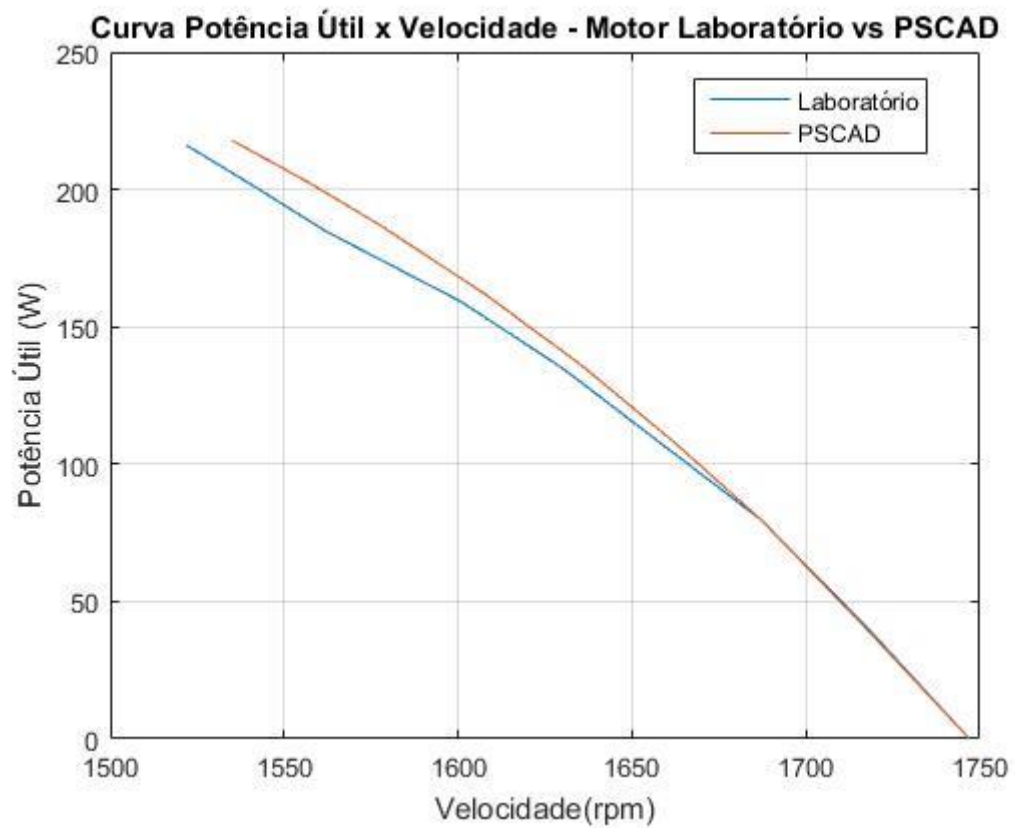


Figura 28 - Curva rendimento x velocidade

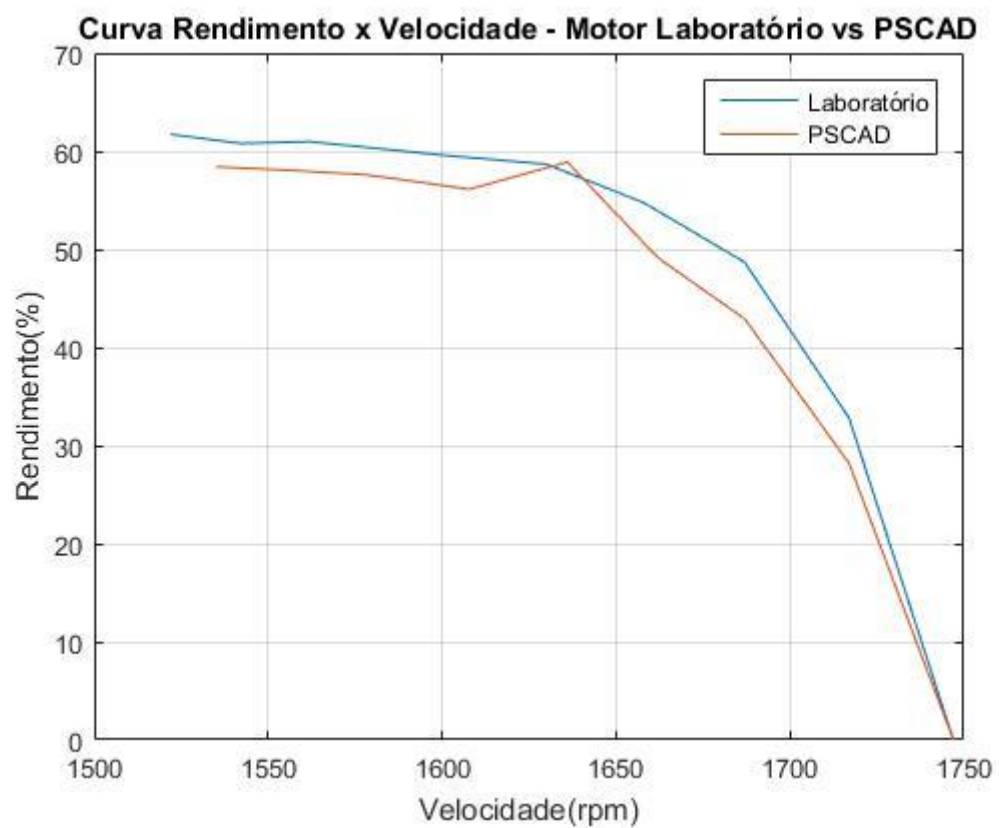
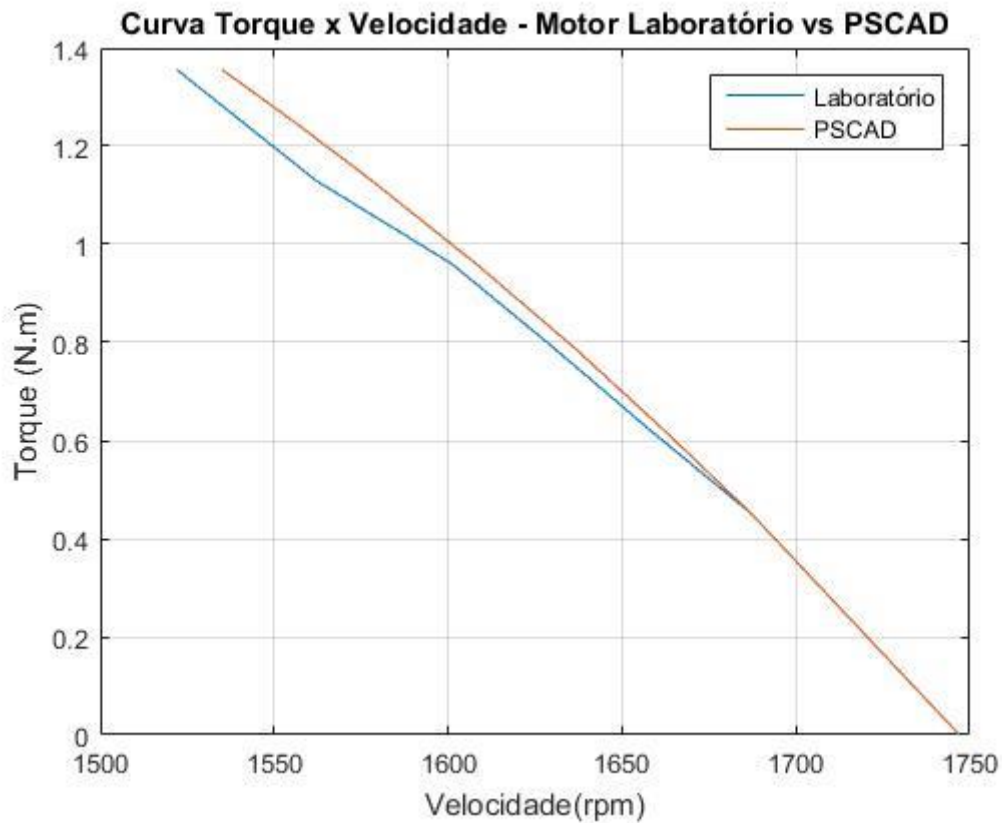


Figura 29 - Curva torque x velocidade



Para uma análise quantitativa sobre a proximidade da curva real com a curva simulada, torna-se necessário a análise do erro para cada conjunto de pontos que foram apresentados nas curvas acima. Para realizar essa análise foi necessário realizar uma tabela para os erros de velocidade, potência útil, rendimento e fator de potência. As equações referentes ao cálculo do erro e do erro médio quadrático estão expostas nas equações abaixo.

$$Erro(\%) = \frac{V_{simulado} - V_{real}}{V_{real}} * 100 \quad (10)$$

$$REM Q = \sqrt{\frac{\sum (V_{simulado} - V_{real})^2}{np}} \quad (11)$$

Onde:

$V_{simulado}$ = valor da variável no PSCAD.

V_{real} = Valor da variável no motor real.

$REM Q$ = Raiz do erro médio quadrático.

np = número de pontos

A tabela referente aos erros encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Cálculo dos erros

CÁLCULO DO ERRO				
T (N.M)	Erro velocidade (%)	Erro Putil(%)	Erro fp(%)	Erro Rendimento (%)
0	0,00%	0,00%	17,51%	0,00%
0,23	0,00%	-0,02	11,67%	-14,02%
0,452	0,00%	0,00	9,32%	-11,83%
0,6215	0,24%	0,00	8,19%	-10,24%
0,791	0,37%	0,00	2,34%	-5,78%
0,9605	0,44%	0,00	3,91%	-6,89%
1,13	1,02%	0,01	1,45%	-5,52%
1,243	0,97%	0,01	-1,12%	-4,52%
1,356	0,85%	0,01	-0,86%	-5,36%
REMQ	0,96	1,16	0,03	0,04

Para uma simulação perfeita considera-se a raiz do erro médio quadrático igual a zero e pela Tabela 8, verifica-se que para o fator potência e rendimento, o motor modelado obteve respostas satisfatórias pois a raiz do erro médio quadrático ficou próximo de zero em ambos. Para a velocidade e potência útil verifica-se que o erro médio quadrático é em torno de um, porém não é um valor muito distante de zero, pois quanto mais distante de zero mais imperfeita a simulação se torna.

Sendo assim, a simulação para velocidade e potência útil foram satisfatórias e de um modo geral observa-se que o motor modelado apresentou a maioria das curvas próximo ao obtido para o modelo real do motor em questão para o regime permanente, o que torna o modelo representado bem próximo do modelo real do motor do Laboratório.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho visou desenvolver um modelo computacional para um motor de indução de rotor bobinado, de modo que o modelo do motor tivesse uma representatividade bem próxima ao comportamento real da máquina. Desse modo, será permitido aos alunos, que realizam o uso do Laboratório de Máquinas Elétricas em outros trabalhos envolvendo a utilização dessa máquina, possam fazer uso desse modelo.

Para o levantamento do modelo, buscou-se extrair a maior quantidade possível de informações dos dados de placa da máquina, que foi uma das fontes disponíveis para o trabalho. Justamente nesse ponto, houve dificuldade para a obtenção de informações. Por se tratar de uma máquina antiga e pela dificuldade em encontrar o seu *data sheet*, algumas perdas que o motor possui não foram expostas no modelo, no entanto, isso não afetou o resultado, tendo em vista que as curvas resultantes do modelo foram bastante próximas do apresentado pelo motor real.

Para a complementação deste trabalho, seria importante o estudo do comportamento da máquina em regimes transitórios e análise do comportamento do motor ao ser acionado por *soft-started*. Para isso seria necessária a realização de mais testes em laboratórios para obter as respostas da máquina operando e cada tipo de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5383: Norma brasileira para ensaios em motores de indução trifásico. Rio de Janeiro, 2002.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas e conversão eletromecânica de energia**. New York: McGraw-Hill, 2008.

HVDC. **PSCAD: Power Systems Computer Aided Design**. Disponível em:
< <https://hvdc.ca/pscad/> >. Acesso em: 27 nov. 2017.>

LABVOLT. **Four-Pole Squirrel-Cage Induction Motor: Power Systems Computer Aided Design**. Disponível em:
<https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8221-20_four_pole_squirrel_cage_induction_motor>. Acesso em: 28 nov. 2017.>

LABVOLT. **Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply: Power Systems Computer Aided Design**. Disponível em:
< https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8960-E0_four_quadrant_dynamometer_power_supply>. Acesso em: 28 nov. 2017.>

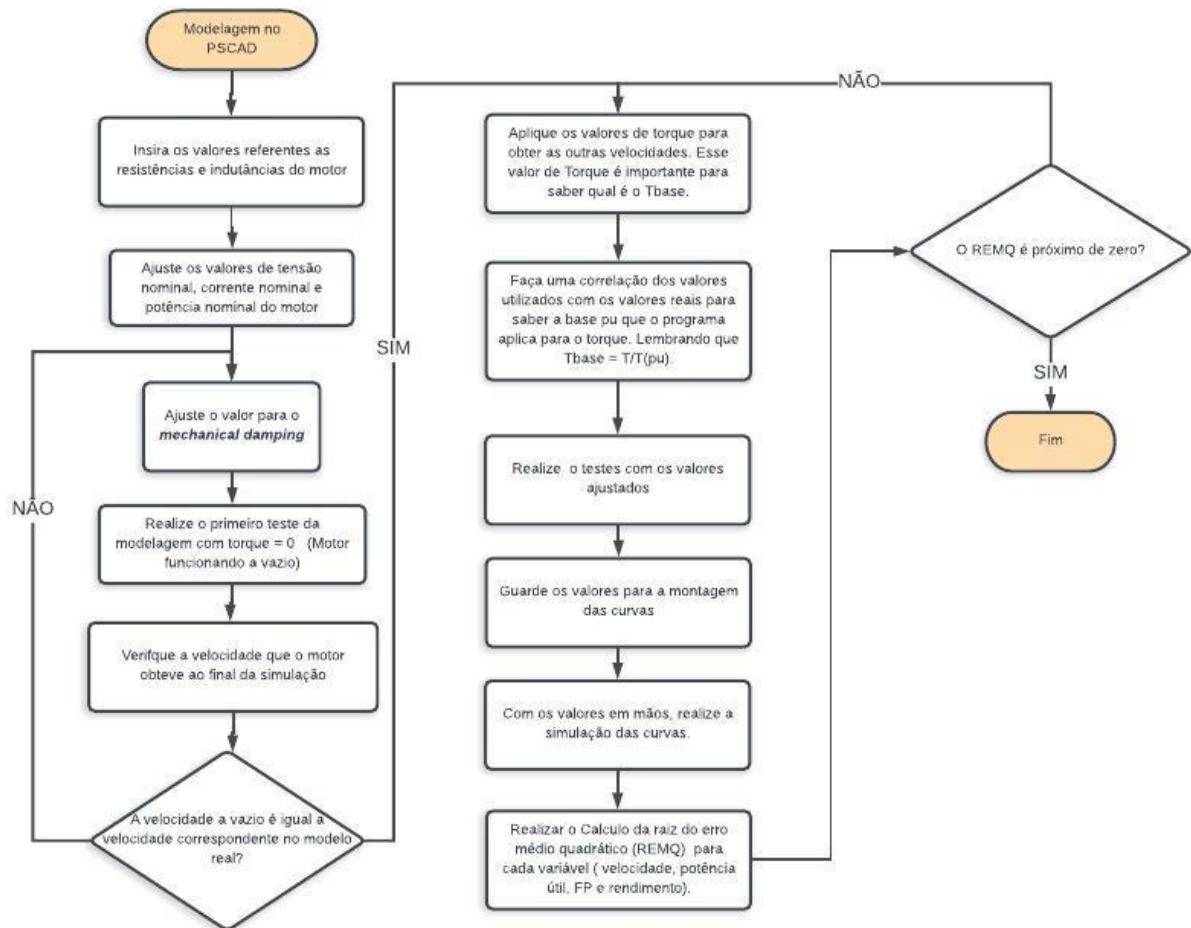
WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**– Brasil, 2016.

Manitoba HVDC Research Centre. **Pscad cookbook induction machines**. Canada, 2003.

ALGER, Philip L., (1975). **The Nature of Polyphase Induction Machines**. John Wiley & Sons, Inc., New York Chapman & Hall, Ltd., London.

O. S. Lobosco and J. L. d. C Dias, Philip L., (1988). **Seleção e Aplicação de Motores Elétricos**. McGraw-Hill, 1988.

ANEXO I



ANEXO II

```

%*****
%
%                               %
%                               %
%                               %
%                               %
%                               %
%*****

% Dados do motor - MIRB
v_nom = 208;
i_nom = 1.3;
S_nom = (v_nom/sqrt(3))*i_nom;
P_nom = 175;
n_nom = 1500;
t_nom = P_nom/(n_nom*2*pi/60);

%-----
% Dados do Ensaio do MIRB
%-----

% Ensaio CC
vdc = 13.2;
idc = 1.3;

% Ensaio a Vazio

vvz = 208;
ivz = 0.76;
Pvz = 54;
nvz = 1766;

%Ensaio Rotor Bloqueado
vrb = 76;
irb = 1.3;
Prb = 145;

% Calculado a Resistência do Estator (R1)
R1 = vdc/idc;

% Calculando |Zvz|
zvz = abs((vvz/sqrt(3))/ivz);

% Calculando a resistência do rotor R'2
R2 = (Prb/(3*irb*irb)) - R1;

% Calculando X1 e X2
zrb = abs((vrb/sqrt(3))/irb);
xrb = sqrt(zrb*zrb - (R1+R2)*(R1+R2));

X1 = xrb/2;
X2 = xrb/2;

% Calculando a reatância de magnetização Xm:

Xm = zvz - X1;

```

```

%-----
% Dados do laboratório de Máquinas elétricas:
%-----

Tm_lab = [0 0.226 0.452 0.6215 0.791 0.9605 1.13 1.243 1.356];
n_lab = [1747 1717 1687 1658 1630 1601 1562 1542 1522];
fp_lab = [0.298353909 0.42 0.517676768 0.59 0.651927438 0.71429 0.758258258
0.7971 0.810185185];
rendimento_lab = [0.00 32.80 48.67 54.75 58.67 59.57 60.97 60.79 61.72];
putil_lab = [0 41.33 79.81 107.85 134.95 159.04 184.74 200.62 216.01];

%-----
% Dados do Pscad:
%-----

Tm_pscad = [0 0.226 0.452 0.6215 0.791 0.9605 1.13 1.243 1.356];
n_pscad = [1747 1717 1687 1662 1636 1608 1578 1557 1535];

fp_pscad = [0.350593312 0.465278586 0.565899963 0.636574074 0.626361656
0.733944954 0.769230769 0.788166215 0.803186908];
rendimento_pscad = [0 28.20 42.91 49.14 58.89 56.13 57.60 58.04 58.41];
putil_pscad = [0 40.62 79.81 108.11 135.45 161.66 186.64 202.57 217.86];

figure
plot(n_lab,Tm_lab)
hold on
plot(n_pscad,Tm_pscad)
grid on
title('Curva Torque x Velocidade - Motor Laboratório vs PSCAD')

figure
plot(n_lab,fp_lab)
hold on
plot(n_pscad,fp_pscad)
grid on
title('Curva FP x Velocidade - Motor Laboratório vs PSCAD')

figure
plot(n_lab,rendimento_lab)
hold on
plot(n_pscad,rendimento_pscad)
grid on
title('Curva Rendimento x Velocidade - Motor Laboratório vs PSCAD')

figure
plot(n_lab,putil_lab)
hold on
plot(n_pscad,putil_pscad)
grid on
title('Curva Potência Útil x Velocidade - Motor Laboratório vs PSCAD')

```